

На правах рукописи



Глаголева Ирина Викторовна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ
КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ КЛИНКЕРА
ВЕЛЬЦЕВАНИЯ ЦИНКОВЫХ КЕКОВ**

Специальность 2.8.9. Обогащение полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой
степени

кандидата технических наук

Магнитогорск – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

Научный руководитель - доктор технических наук, доцент
Орехова Наталья Николаевна

Официальные оппоненты: **Игнаткина Владислава Анатольевна**,
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский технологический
университет «МИСИС», г. Москва,
профессор кафедры обогащения и
переработки полезных ископаемых и
техногенного сырья

Клюшников Антон Михайлович
кандидат технических наук, ведущий
научный сотрудник лаборатории
гидрометаллургии АО «Уралмеханобр»,
г. Екатеринбург

Ведущая организация - Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Забайкальский
государственный университет», г. Чита

Защита диссертации состоится « 27 » декабря 2023 г. в 10³⁰ на заседании диссертационного совета 24.2.324.06 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова») по адресу: 455000, Челябинская область, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, малый актовЫй зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» и на сайте ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»: <http://www.magtu.ru>.

Автореферат разослан « » 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук



С.Н. Корнилов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Медь является очень важным металлом для многих областей промышленности, в том числе для стратегически значимых. Ежегодный прирост потребления меди оценивается в 415 тыс. т. Импорт меди в Россию в 2022 году составил 2,59 тыс. т. Снижение этой цифры возможно за счет вовлечения в переработку техногенного сырья. Медь объявлена стратегическим металлом и объемы её добычи должны расти.

Ресурсный потенциал техногенных образований Урала по меди оценивается в несколько миллионов тонн. Ежегодно только с клинкером вельцевания цинковых кеков Челябинского цинкового завода отправляется в отвал порядка 9000 т меди. Чаще всего клинкер подвергается разделению при помощи магнитной сепарации на железо и углеродсодержащий продукт, который возвращается в производство, при этом медь теряется. В последнее время клинкер используется как сырье для флотационного извлечения меди. Однако технологические показатели обогащения низкие. Извлечение меди не превышает 65% при массовой доле в концентрате от 4 до 10%.

Клинкер вельцевания имеет комплексный состав, техногенные фазы, по свойствам отличающиеся от природных минералов. При этом содержание меди в клинкере находится на уровне массовых долей в медных рудах. Заскладированный в отвалах дисперсный материал представляет опасность для окружающей среды. Все это свидетельствует о необходимости переработки клинкера с минимизацией отходов.

Степень разработанности проблемы. Анализ теории и практики переработки клинкера вельцевания показал, что вопрос переработки клинкера был поднят Митрофановым С.И. и Ереминым П.Ф. в 1940 г. В настоящее время известны труды Аллабергена Р.Д., Ахмедова Р.К., Балатбаева К.Н., Богомолова Н.С., Брянцевой О.С., Дюбанова В.Г., Козырева Е.Н., Кондратьева Ю.И., Козлова П.А., Набойченко С.С., Паншина А.М., Ходжаева О.Ф., Хулелидзе К.К., Andres A., Cheeseman C., Coz A., Quijorna N. и др.

Цель данной работы состоит в совершенствовании схемы переработки лежалого медистого клинкера вельцевания цинковых кеков за счет комбинации методов магнитного, гравитационного и флотационного обогащения, реагентного режима флотации и повышения технологических показателей извлечения меди.

Для достижения указанной цели поставлены следующие **задачи**:

- провести анализ теории и практики переработки клинкера вельцевания в России и за рубежом;
- изучить характер минеральных ассоциаций, текстурно-структурные особенности нахождения минеральных форм железа, меди и цинка, определяющие их трудную обогатимость;
- обосновать рациональные параметры обогатительных операций и изучить возможность повышения концентрации меди в промежуточном продукте перед флотацией с использованием комбинации магнитного и гравитационного методов;
- выявить причины низкой эффективности медной флотации с использованием потенциометрической диагностики процессов, происходящих в пульпе,

обосновать эффективный реагентный режим на основе установленных закономерностей разделения минеральных фаз клинкера в зависимости от использования сочетаний реагентов;

— обосновать и усовершенствовать комбинированную схему обогащения клинкера вельцевания;

— провести экономическую оценку практического применения разработанных решений.

Идея работы заключается в использовании особенностей ассоциации железно- и медьсодержащих фаз клинкера для комбинирования методов магнитного и гравитационного разделения с целью максимально возможного концентрирования меди в питании флотации и совершенствования реагентного режима медной флотации с использованием потенциометрической диагностики процессов, протекающих в пульпе.

Объект исследования – лежалый клинкер вельцевания цинковых кеков (на примере клинкера Челябинского цинкового завода (ЧЦЗ)).

Предмет исследования – текстурно-структурные особенности клинкера и закономерности разделения клинкерообразующих фаз.

Методы исследований. При выполнении работы использован комплексный метод исследований, включающий: анализ и обобщение научно-технической информации, аналитические исследования, лабораторные эксперименты на гравитационных, флотационных установках, гранулометрический, микроскопический (анализатор изображения «Минерал С-7»), электронно-микроскопический (JEOL JSM-6460 LV) анализы, pH-метрию, статистическую обработку экспериментальных данных методами математической статистики с использованием Microsoft Excel, потенциометрическую диагностику.

Положения, выносимые на защиту:

1. Распределение медных техногенных минералов между сростками с магнитными фазами клинкера (пирротин, магнетитом) и более 25% с немагнитными фазами (FeS_2 , FeS , $(\text{Ca}, \text{Na})_2(\text{Mg}, \text{Al})[(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_7]$), плотность рядовых и богатых сростков минералов меди с основными немагнитными фазами клинкера, обеспечивающая коэффициент гравитационного разделения их с коксом более 1,75, и наличие ферритных медьсодержащих твердых растворов обуславливает необходимость комбинации магнитных и гравитационных методов разделения для концентрирования медьсодержащих фаз клинкера в питании флотации.

2. Повышение флотационного извлечения меди в концентрат при снижении массовой доли железа в нем достигается комплексом технологических решений путем введения: сернистого натрия для уменьшения отрицательных эффектов от перехода ионов железа в жидкую фазу пульпы и образования комплексных соединений с ксантогенатом $\text{Fe}(\text{OH})\text{Kx}_2$; фторсиликата натрия для снятия экранирующих поверхность минералов гидроксидов железа в расходах, определенных потенциометрической диагностикой по уменьшению отклонения потенциала от линии электрохимической модели; медного купороса для активации флотации медьсодержащих твердых растворов.

3. Комбинированная магнитно-гравитационно-флотационная технология переработки медистых клинкеров вельцевания цинковых кеков позволяет осуществить безотходное разделение клинкера на три продукта, пригодных для использования в смежных отраслях черной и цветной металлургии: медьсодержащий $\beta_{\text{Cu}}=14,52\%$, железосодержащий $\beta_{\text{Fe}}=50,17\%$, углеродсодержащий $\beta_{\text{C}}=40\%$.

Достоверность результатов обеспечивается: значительным объемом и представительностью исходных данных; использованием сертифицированного оборудования, современных методик проведения исследований. Подтверждается: согласованностью выводов теоретического анализа и данных эксперимента; адекватностью полученной модели при доверительной вероятности 95%; сопоставимостью результатов химических анализов в параллельных опытах.

Научная новизна заключается в том, что:

- установлены закономерности распределения медьсодержащих фаз клинкера между железосодержащими магнитными и немагнитными фазами пирит-пирротинового ряда, обуславливающими необходимость комбинации магнитных и гравитационных операций в схемах переработки для концентрации меди перед флотацией;
- выявлены факторы, влияющие на потерю меди в процессе медной флотации и перерасход ксантогената, заключающиеся в присутствии в пульпе ионов железа в виде комплексных соединений, способствующих образованию пленок гидроксида железа на поверхности частиц клинкера и комплекса $Fe(OH)Kx_2$ в пульпе, а не на поверхности частиц;
- предложен подход к обоснованию крупности материала для эффективного гравитационного обогащения, заключающийся в расчете значений критерия разделения Мейстера для отделения бедных сростков от богатых и рядовых сростков медьсодержащих минералов и основных фаз клинкера вельцевания;
- установлена зависимость извлечения меди в концентрат от расходов реагентов-модификаторов, выраженная математической моделью в виде полиномиального уравнения:

$$\varepsilon = 55,01 + 0,11Q_{CuSO_4} + 0,02Q_{Na_2SiF_6} + 0,41pH - 0,00002 Q_{CuSO_4} Q_{Na_2SiF_6},$$

где Q_{CuSO_4} и $Q_{Na_2SiF_6}$ – расход реагентов соответственно $CuSO_4$ и Na_2SiF_6 , г/т.

Личный вклад автора заключается: в разработке новых технологических решений при обогащении клинкера вельцевания; постановке и проведении экспериментов; обработке и интерпретации экспериментальных данных; анализе, обобщении полученных результатов и обосновании выводов; подготовке публикаций; в оценке контрастности минерального сырья в куске любой крупности с использованием разработанной автором программы для ЭВМ.

Теоретическая значимость работы состоит в расширении знаний о текстурно-структурных особенностях клинкера вельцевания как объекта обогащения и научном обосновании комбинации разделительных операций и параметров разделения для повышения комплексности обогащения.

Практическая значимость работы состоит в следующем: установлены особенности раскрываемости сростков медных техногенных минералов с немагнитными фазами клинкера (меллилитом, пиритом, троилитом) и с магнитными (пирротин, магнетитом) и крупности проведения основных операций; разработана программа для ЭВМ (свидетельство № 2022619332 от 20 мая 2022 г.), позволяющая оценить контрастность минерального сырья в куске любой крупности, на основе уравнения Мокроусова В.А., с построением кривых контрастности по данному минеральному сырью в автоматическом режиме; предложены и обоснованы последовательность и рациональные параметры проведения операций магнитного и гравитационного разделения, позволяющие максимально сконцентрировать медь в питании флотации при получении

углеродсодержащего продукта, пригодного для рециклинга; показана возможность применения потенциометрической диагностики для совершенствования реагентного режима флотации техногенного сырья; предложена безотходная схема обогащения клинкера вельцевания, позволяющая получить следующие продукты: угольный, железный и медный концентраты.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы использованы ООО «НОВОМЕК ИНЖИНИРИНГ» г. Санкт-Петербург при разработке программы и проведении исследований на обогатимость техногенного минерального сырья. Материалы диссертации использованы при чтении лекций и проведении практических, лабораторных занятий по специальности 21.05.04 «Горное дело», специализация «Обогащение полезных ископаемых», при выполнении научно-исследовательских и выпускных квалификационных работ по тематике, связанной с переработкой горно-металлургических отходов.

Апробация результатов работы. Результаты исследований и основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и межрегиональных конференциях и симпозиумах: «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (Магнитогорск, 2017, 2019-2021 гг.), «Комбинированная геотехнология: Ресурсосбережение и энергоэффективность» (Магнитогорск, 2017 г.), «Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья» (Красноярск, 2017), «Проблемы недр в XXI веке глазами молодых» (Москва, 2019 г.), «Строительство, архитектура и техносферная безопасность» (Сочи 2020 г.), «Неделя горняка» (Москва, 2021 г.), «Проблемы комплексной и экологически безопасной переработки природного и техногенного минерального сырья» (Владикавказ, 2021 г.).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 16 научных работах, из них: 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ; 2 – в изданиях, индексируемых в базе цитирования Scopus; 10 – в прочих печатных изданиях, а также зарегистрирована 1 программа для ЭВМ.

Исследования были проведены на основании выполненного гранта «Исследование химических и физико-химических закономерностей селективного концентрирования металлов из техногенных фаз для адаптации разделительных процессов», 2017-01 ГЗ МОиН РФ проект №5.8708.2017/БЧ.

Структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав и заключения, изложенных на 174 страницах машинописного текста, содержит 52 таблицы, 54 рисунка, список использованной литературы из 131 наименования и 8 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *введении* обозначена актуальность выбранной темы исследования, определены цель, объект, предмет, задачи; описаны этапы и методы; раскрыты научная новизна, теоретическая и практическая значимость; представлены основные положения, выносимые на защиту, сведения о личном вкладе автора, апробация результатов проведенного исследования.

В *первой главе* проводится обзор и анализ: состояния проблемы переработки техногенных отходов, исследовательских работ по обогащению клинкера вельцевания, описывается получение и практика переработки клинкера и его химико-минералогические характеристики.

Во *второй и третьей главах* доказывается первое научное положение, описываются методики исследования состава и технологических свойств клинкера вельцевания, магнитное, гравитационное, флотационное обогащение и приводятся результаты лабораторных исследований, изучаются технологические свойства и факторы, определяющие построение технологической схемы переработки лежалого клинкера вельцевания цинковых кеков. Введена *дополнительная трактовка старого* понятия «медьсодержащие фазы клинкера» - фазы, находящиеся в частицах клинкера, включающие в себя реликты минералов, вновь образованные техногенные минералы и металлургические фазы, а также твердые растворы, в составе которых есть медь.

В *четвертой главе* доказывается второе научное положение, изучаются закономерности флотационного обогащения клинкера, проводится потенциометрическая диагностика флотационного процесса, анализируются способы снижения влияния ионов железа и его гидроксидных пленок на поверхности минералов при сульфидной флотации, проверяются предложенные по результатам диагностики реагентные режимы флотации и определяются рациональные расходы реагентов модификаторов.

В *пятой главе* описывается предложенная обоснованная и усовершенствованная технология обогащения клинкера, приводятся результаты флотационных опытов в замкнутом режиме, результаты укрупненных лабораторных испытаний предлагаемой схемы обогащения и рассчитывается экономический эффект переработки клинкера вельцевания.

Основные этапы экспериментальных исследований по разработке комбинированной технологии обогащения клинкера вельцевания ЧЦЗ включают: изучение вещественного состава и структурных особенностей, изучение физико-механических свойств и закономерностей обогащения.

Первое защищаемое положение (доказано во 2-й и 3-й главах): *Распределение медных техногенных минералов между сростками с магнитными фазами клинкера (пирротин, магнетит) и более 25% с немагнитными фазами (FeS_2 , FeS , $(Ca,Na)_2(Mg,Al)(Si,Al)_2O_7$), плотность рядовых и богатых сростков минералов меди с основными немагнитными фазами клинкера, обеспечивающая коэффициент гравитационного разделения их с коксом более 1,75, и наличие ферритных медьсодержащих твердых растворов обуславливает необходимость комбинации магнитных и гравитационных методов разделения для концентрирования медьсодержащих фаз клинкера в питании флотации.*

Объект исследования – лежалый клинкер вельцевания цинковых кеков ЧЦЗ является типичным представителем полиметаллических отходов пирометаллургического передела, содержащих цветные и благородные металлы в количествах, сопоставимых с рудами. Состав клинкера ЧЦЗ в сравнении с обобщенным составом клинкеров вельцевания и цинковых кеков представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Обобщенный состав цинковых кеков и клинкера вельцевания

Продукт	Элемент или фаза, %										г/т
	Zn	Pb	Cu	Fe	S	SiO ₂	Ca	Mg	Mn	C	Ag
Цинковый кек	19-24	5-12	0,5-1,5	23-32	5-10	1-12	0,4-3,2	0,3-1,3	0,5-1,0	-	200-450
Клинкер	0,2-5,04	0,1-1,5	0,9-6	20-40	1,38-5	16-32	5-11	0,28-1	0,11-1,96	10-20	50-350
Клинкер ЧЦЗ	2,1	0,8	3,34	33,8	5,1	17,5	6,4	1	-	13,6	345

Изучение контрастности исходного клинкера (анализ 100 кусков крупностью 25-50 мм) по уравнению Мокроусова В.А. ($M = \frac{\sum_{i=1}^n (y_1 - \bar{a}) |y_1|}{100 * \bar{a}}$, где \bar{a} – содержание ценного компонента в руде (классе), %; y_1 – содержание ценного компонента в кусках, %; γ_1 – выход куска от общей массы изучаемой пробы, %; n – число кусков, составляющих пробу) показало, что показатель контрастности, рассчитанный как для однокомпонентного сырья, по железу, меди соответствует значениям 0,81 и 0,67, что позволяет отнести клинкер к высококонтрастному сырью по железу, но к низкоконтрастному по меди. Следовательно, в крупном куске (25-50 мм) можно провести радиометрическую сепарацию с получением железного концентрата, но тогда задача высокого извлечения меди будет невыполнима, поскольку часть медных фаз клинкера потеряется с железным концентратом. Полностью сконцентрировать медь в продукте перед флотацией методом радиометрической сепарации не получится.

Проведенным комплексом оптико-микроскопических и электронно-микроскопических исследований установлено, что частицы исходного клинкера подвергнуты окислению, представляют собой сростки кокса со шлаком, штейном и металлическим железом. Текстура клинкера с позиции рудной минералогии характеризуется как массивная, а структура порфирировая – неполнокристаллическая и неравномерно зернистая (рисунок 1).

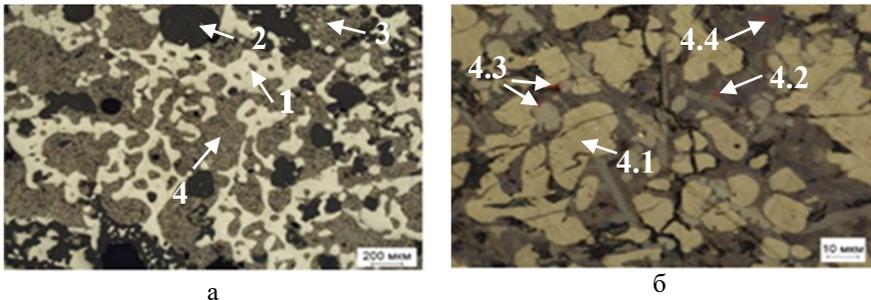


Рисунок 1 – Микрофотография клинкера (Отраженный свет) : а – общий вид рудной части клинкера (ЧЦЗ): 1 – ферриты; 2 – нерудные; 3 – пирит; 4 – смесь из 4-х различных фаз; б – увеличенная область рудной части клинкера зоны 4: 4.1 – сульфид железа; 4.2 – темно-серая игольчатая фаза – сложный алюмосиликат калия, кальция и железа; 4.3 – светло-серая ксеноморфная фаза – шпинель; 4.4 – смесь медных минералов ковеллин-борнитового состава

При увеличении в 200 раз (см. рисунок 1, а), кроме коксовой фазы, визуально просматриваются зоны концентрации ферритов, нерудных минералов и зоны, состоящие из мелкокристаллической смеси четырех фаз: сульфида железа, сложного алюмосиликата калия, кальция и железа, сложного состава по типу твердого раствора и смеси медных минералов ковеллин-борнитового состава, что хорошо видно при большем увеличении (см. рисунок 1, б).

Рентгенофазовый анализ показал, что медьсодержащие фазы в клинкере представлены: сульфидами меди в форме халькозина Cu_2S , халькопирита CuFeS_2 , ковеллина CuS в количестве 5 %; ферритами меди CuFeO_2 и металлической медью, на долю которых суммарно приходится немного больше 0,1 %. По фазовому анализу медь на 69,79 % представлена вторичными и на 29,04 % – первичными сульфидами. Электронно-микроскопический анализ показал наличие халькозина, ковеллина, халькопирита, борнита с размерами зерен в диапазоне 10-100 мкм. Богатые по меди сульфиды рассредоточены в шпинелевой, мелилитовой матрицах или являются компонентами эвтектических сростаний с сульфидами железа (рисунок 2). Медь присутствует также в фазах твердых растворов в относительных массовых долях от 1,5 до 10 % и более.

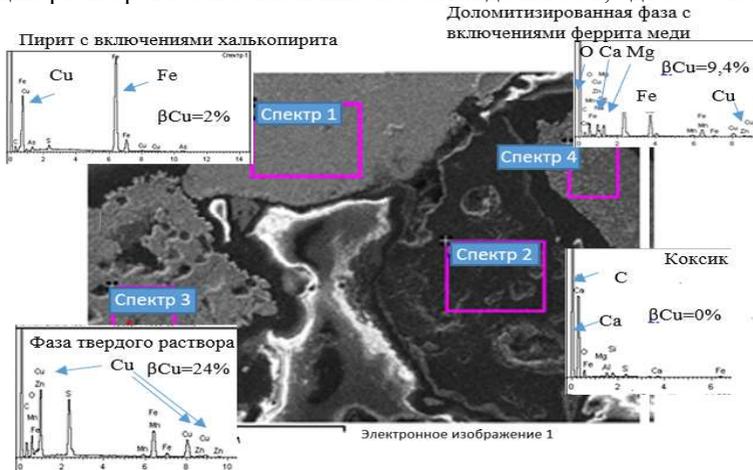


Рисунок 2 – Электронное изображение клинкера, спектрограммы минеральных фаз и массовая доля меди в них

На долю железосодержащих фаз суммарно приходится 36%, в том числе в виде оксидов и гидроксидов 8%, сульфидов пирротин-пиритового ряда – 11%, а на долю силикатов – 5% и сложных сплавов, по типу твердых ферритных растворов – 9%. На долю металлического железа приходится только 3%. Присутствует лимонит, что объясняется окислением сульфидов железа в результате одновременного контакта клинкера с воздухом и осадками.

Выявленная электронно-микроскопическим анализом и анализом атомарного соотношения элементов в фазах особенность клинкера – одновременное присутствие разных минералов пирротин-пиритового ряда (пирит FeS_2 , троилит FeS , пирротин Fe_7S_8) с размерами выделений до 200 мкм (рисунок 3).

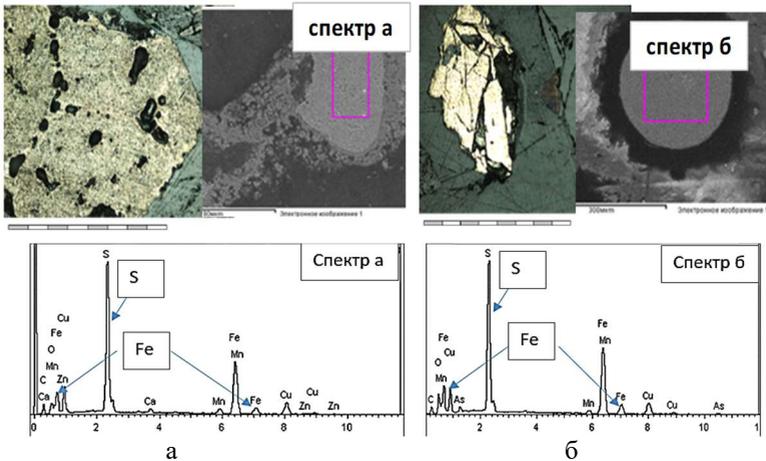


Рисунок 3 – Оптико-микроскопическое, электронно-микроскопическое изображения и характеристические спектры сульфидов железа в клинкере: а – троилит; б – пирит

Теоретически обосновано, что пирит, температура плавления которого равна $1177-1188^{\circ}\text{C}$, разлагаясь под воздействием температуры в вельц-печи, которая в зависимости от зоны печи составляет от 1100 до 1460°C , переходит в метастабильный пирротин и затем в троилит, образуя различное сочетание фаз, размеры выделений достигают 200 мкм.

Результаты раскрываемости минералов показывают, что в клинкере крупностью -3 мм сульфиды меди находятся преимущественно в сложных сростках. В бинарных сростках с магнитными фазами (магнетитом и твердыми растворами) находится $49,94\%$, с немагнитными фазами (FeS или FeS_2 , $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$) и коксом – $24,66\%$. В клинкере крупностью $-0,5$ мм $81,63\%$ сульфидов меди находятся преимущественно в бинарных сростках с магнитными фазами. Анализом распределения медьсодержащих фаз по сросткам установлено, что соотношение сростков техногенных медных минералов с немагнитными фазами клинкера и с магнитными фазами клинкера составляет $1/2,5$. При использовании магнитной сепарации для отделения кокса, даже при уменьшении крупности до $-0,5$ мм, вместе с ним в немагнитной фракции окажется в среднем 19 отн. % медьсодержащих минералов.

Изучение компонентов по классам крупности показало, что наибольшее количество металлов приходится на преобладающие классы крупности $-3+1$ и $-1+0,5$ мм, их выход составляет $56,1$ и $34,72$ % соответственно. При этом наибольшая массовая доля железа – $37,98\%$, меди – $4,73\%$ и цинка – $6,24\%$ приходится на класс $-0,071$ мм. Суммарно в немагнитную фракцию из классов крупности $-3+0,14$ мм переходит от 35 до 40 % железа, что коррелирует с переходом меди от $20-30$ % в этой же крупности. Углерод распределяется равномерно в мелких классах между магнитной и немагнитной фракциями, что связано с переизмельчением углерода и налипанием на магнитные частицы.

При уменьшении тонины помола значительный прирост извлечения углерода приходится на класс -0,071 мм, что свидетельствует о переизмельчении кокса (рисунок 4).

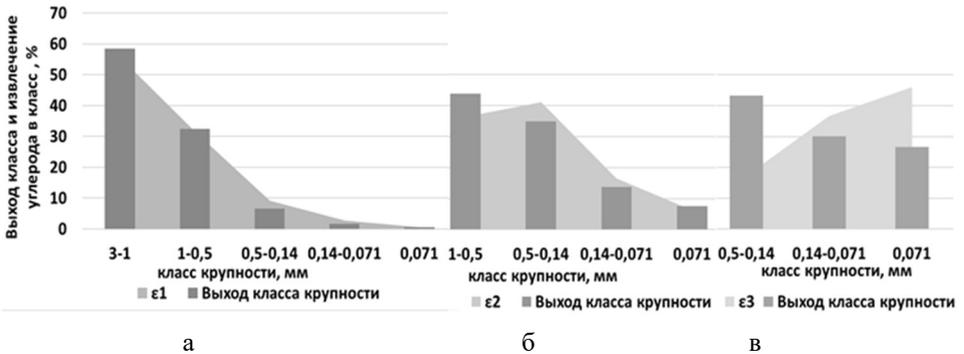


Рисунок 4 – Перераспределение углерода по классам крупности при разной продолжительности измельчения до достижения крупности: а – минус 3 мм; б – минус 1 мм; в – минус 0,5 мм

Изучение микротвердости фаз клинкера показало, что твердость медьсодержащих фаз по типу твердого раствора находится в очень широком диапазоне – от 1782 до 9830 МПа, при этом микротвердость кокса составляет 410 МПа. Основная часть кокса находится в мелкозернистой части клинкера (класс -5 мм) в виде свободных зерен крупностью менее 2 мм в исходном клинкере.

Таким образом, применение только магнитного разделения клинкера не позволит полно сконцентрировать медьсодержащие фазы в магнитной фракции при одновременном эффективном извлечении кокса в немагнитную фракцию.

Теоретический анализ возможности разделения на концентрационном столе бинарных сростков медных минералов халькозина и халькопирита с коксом, троилитом, мелилитом (окерманитом), магнетитом и фаялитом по соотношению $M = \frac{\rho_{г}-\rho_{ж}}{\rho_{л}-\rho_{ж}}$ показал, что для рядовых и богатых сростков халькозина и халькопирита с основными фазами клинкера и сростками кокса составляет более 1,75, что позволяет сделать вывод об эффективности гравитационного разделения при крупности материала менее 0,15 мм. Для избежания переизмельчения кокса рациональной крупностью для разделения на столе выбрана фракция клинкера -0,5 мм, содержание в которой класса крупности -0,15 мм составляет 60 % (таблица 2).

Анализ эффективности разделения магнитной сепарацией показал, что для клинкера крупностью -3 мм за рациональный параметр принята напряженность магнитного поля 102 кА/м. При данной напряженности извлечение железа и углерода в магнитный продукт составило 74,69 и 20,3% соответственно. Увеличению извлечения железа в магнитную фракцию в 3 раза способствует уменьшение крупности до -1 мм. При дальнейшем снижении крупности клинкера до -0,5 мм извлечение железа в немагнитную фракцию возрастает, что свидетельствует о раскрытии сростков магнитных железосодержащих фаз с немагнитными железосодержащими фазами.

Таблица 2 – Соотношение М для сростков
«мелилит-халькопирит» / «кокс-халькопирит»

Плотность сростка «мелилит-халькопирит», %	Доля халькопирита, %	Плотность сростка «кокс-халькопирит»			
		1,995	2,24	2,485	2,73
		Доля халькопирита, %			
		10	20	30	40
3,12	10	2,13	1,71	1,43	1,23
3,24	20	2,25	1,81	1,51	1,29
3,36	30	2,37	1,90	1,59	1,36
3,48	40	2,49	2,00	1,67	1,43
3,60	50	2,61	2,10	1,75	1,50
3,72	60	2,73	2,19	1,83	1,57
3,84	70	2,85	2,29	1,91	1,64
3,96	80	2,97	2,39	1,99	1,71
4,08	90	3,10	2,48	2,07	1,78
4,20	100	3,22	2,58	2,15	1,85

Примечание. Зеленый цвет – обогащение эффективно, желтый цвет – эффективное обогащение при крупности материала не более 0,07 – 0,15 мм, белый цвет – обогащение затрунено.

На основании вышеизложенного проведены опыты по схемам, представленным на рисунке 5.

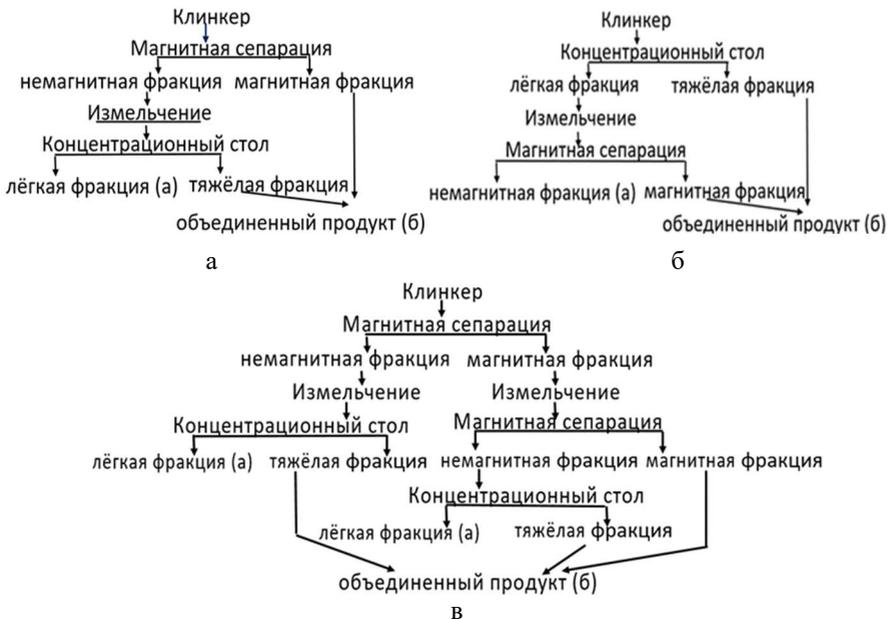


Рисунок 5 – Схемы обогащения клинкера

По совокупности показателей извлечение углерода в углеродсодержащий продукт (продукт а) и полноте извлечения меди в объединенный продукт (продукт б) за рациональную принята схема 3 (рисунок 5, в), результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты опытов

Продукт	Выход, %	Массовая доля, %			Извлечение, %		
		Cu	Fe	C	Cu	Fe	C
Объединенный (б) (рисунок 5, а)	74,85	4,18	35,26	5,78	93,67	94,84	30,90
Объединенный (б) (рисунок 5, б)	67,6	4,76	39,74	8,05	83,78	96,65	37,17
Объединенный (б) (рисунок 5, в)	65,37	4,70	39,74	3,49	92,05	93,36	16,31
Исходный	100,00	3,34	27,83	14,00	100,00	100,00	100,00

Второе научное положение (доказано в 4-й главе): *Повышение флотационного извлечения меди в концентрат при снижении массовой доли железа в нем достигается комплексом технологических решений путем введения: сернистого натрия для уменьшения отрицательных эффектов от перехода ионов железа в жидкую фазу пульпы и образования комплексных соединений с ксантогенатом $Fe(OH)Kx_2$; фторсиликата натрия для снятия экранирующих поверхность минералов гидроксидов железа в расходах, определенных потенциометрической диагностической по уменьшению отклонения потенциала от линии электрохимической модели; медного купороса для активации флотации медьсодержащих твердых растворов.*

Флотационное разделение медьсодержащего промежуточного продукта магнитно-гравитационного разделения клинкера с использованием базового реагентного режима, применяемого на Сибайской ОФ при переработке клинкера, не позволяет получить извлечение меди в коллективный концентрат более 72,16% (таблица 4) при массовой доле меди в нем 6,31%. Углерод «засоряет» медный концентрат, в связи с чем перед медной флотацией введена угольная флотация.

Таблица 4 – Результаты флотационного опыта в открытом режиме

Наименование продукта	Выход, %	Содержание, %			Извлечение, %		
		Cu	Fe	C	Cu	Fe	C
Концентрат 1	16,13	9,50	33,82	5,85	35,46	15,70	10,28
Концентрат 2	10,75	7,30	33,20	6,39	18,16	10,27	7,48
Концентрат 3	6,34	6,12	30,97	10,48	8,98	5,65	7,24
Концентрат 4	5,79	3,65	22,93	18,17	4,89	3,82	11,46
Концентрат 5	5,71	2,19	18,56	27,65	2,90	3,05	17,20
Концентрат 6	4,67	1,64	16,67	29,29	1,77	2,24	14,90
Коллективный концентрат	49,39	6,31	28,66	12,74	72,16	40,74	68,55
Хвосты	50,61	2,38	40,69	5,70	27,84	59,26	31,45
Клинкер	100,0	4,32	34,75	9,18	100,0	100,0	100,0

Подбор в процессе однофакторных экспериментов рациональных расходов реагентов на основе фабричного реагентного режима и введение угольной флотации позволили повысить массовую долю меди в медном концентрате на

4% и снизить массовую долю углерода в нем. Отмечен завышенный суммарный расход собирателя бутилового ксантогената калия – 700 г/т. Снижение суммарного расхода приводит к ухудшению показателей.

Проанализировали причины завышенного расхода собирателя и недостаточного извлечения меди. Изучили состав водной вытяжки из клинкера на оборотной и дистиллированной воде, pH вытяжек составил соответственно 9,3 и 9,7. В вытяжках отмечена аномально высокая концентрация ионов железа (7,82 и 9,59 мг/дм³), что в несколько раз выше теоретически рассчитанной остаточной концентрации железа в форме несвязанных ионов над осадком гидроксидов железа 1,5 мг/дм³ при pH 8,5-9,0. Выдвинута гипотеза о присутствии в водной вытяжке из клинкера ионов железа в виде комплексных соединений.

Для проверки гипотезы использовали методику потенциометрической диагностики Г.Н. Машевского и С.А. Романенко, заключающуюся в определении электрохимических параметров пульпы, полученной в процессе измельчения, без добавления каких-либо реагентов. Все реагенты добавляются непосредственно во флотационную камеру. Методика для техногенного сырья применяется впервые. Для исследований измельчали клинкер до тонины помола 80 % класса -0,071 мм. Для выявления эффекта комплексобразования собирателя, в лабораторную флотационную машину дробно подавали ксантогенат калия и фиксировали значения Ag₂S- и Pt-электродов. Также для изучения вопросов перехода в раствор ионов железа и образования комплексных соединений железа с ксантогенатом опыты проводили с предварительной аэрацией до подачи ксантогената и с последующей аэрацией.

При исходном перемешивании пульпы зафиксированы высокие отрицательные значения потенциалов Pt- и Mo-электродов на уровне -500 мВ и последующее снижение в сторону уменьшения отрицательных значений, что свидетельствует об образовании в пульпе гидроксидных комплексов железа [Fe(OH)]⁺ (рисунок 6).



Рисунок 6–Кинетики изменения электрохимических потенциалов электродов

С помощью электрохимической модели $Eh(Ag_2S)=Eh(Pt)-208$, описывающей работу Pt- и Ag₂S-электродов в присутствии сульфгидрильных компонентов, осуществлялась оценка присутствия в пульпе гидроксида железа и его

комплекса с ксантогенатом. Зафиксировали отклонение в область более положительных значений электрохимических потенциалов аргентитового электрода в опыте от оптимальных значений, фиксируемых линией электрохимической модели флотации (рисунок 7, а).

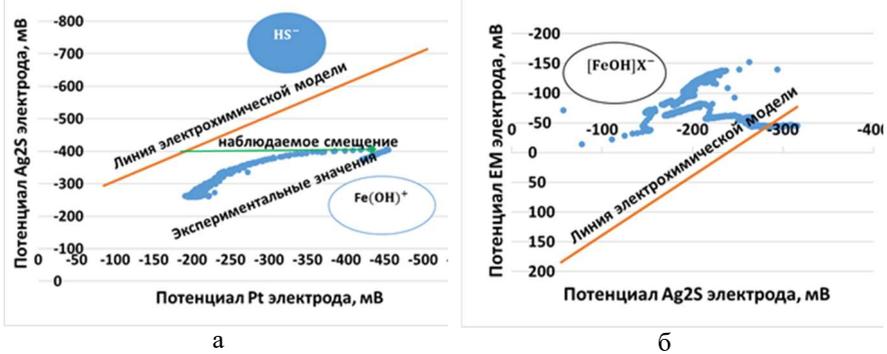
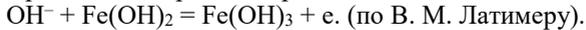


Рисунок 7 – Зависимости между значениями потенциалов : а – Ag_2S - и Pt-электродов; б – Ag_2S - и EM-электродов при наблюдении электрохимических трендов

Это является четким доказательством наличия в пульпе ионов железа в виде $\text{Fe}(\text{OH})^+$. При последующей подаче ксантогената наблюдается отклонение от линии электрохимической модели $E_h(\text{EM})=E_h(\text{Ag}_2\text{S})+239$ мВ в область более отрицательных значений электрохимических потенциалов (рисунок 7, б), что доказывает образование комплексов $\text{Fe}(\text{OH})\text{Kx}$, $\text{Fe}(\text{OH})\text{Kx}_2$ в пульпе. Образование комплексов является одной из причин перерасхода ксантогената.

В щелочной среде может протекать реакция вида



При этом $\text{Fe}(\text{OH})_3$ является малорастворимым соединением и неселективно закрепляется на поверхности минеральных частиц, что может приводить к потерям «замаскированных» гидроксидом железа медьсодержащих фаз с хвостами флотации. Таким образом, образование пленок и комплексов влечет за собой неселективное закрепление собирателя на частицах в виде ксантогената железа, что приводит к перерасходу ксантогената. Прочность связи аниона ксантогената с медью выше, чем с железом. На поверхности, экранированной гидроксидом железа, создается менее устойчивый слой собирателя, что влияет на флотированность частицы в целом.

Для уменьшения поверхностных пленок на основании анализа априорной информации используют фтористый силикат натрия. Для связывания избыточных ионов железа в пульпе использован сернистый натрий. При сравнении значений Ag_2S -электрода без предварительного кондиционирования пульпы с фторсиликатом натрия и после кондиционирования наблюдается приближение значений Ag_2S -электрода к линии электрохимической модели $E_h(\text{Ag}_2\text{S})=E_h(\text{Pt})-208$ мВ, что свидетельствует о снижении гидроксидных комплексов железа $[\text{Fe}(\text{OH})]^+$ в пульпе (рисунок 8, а).

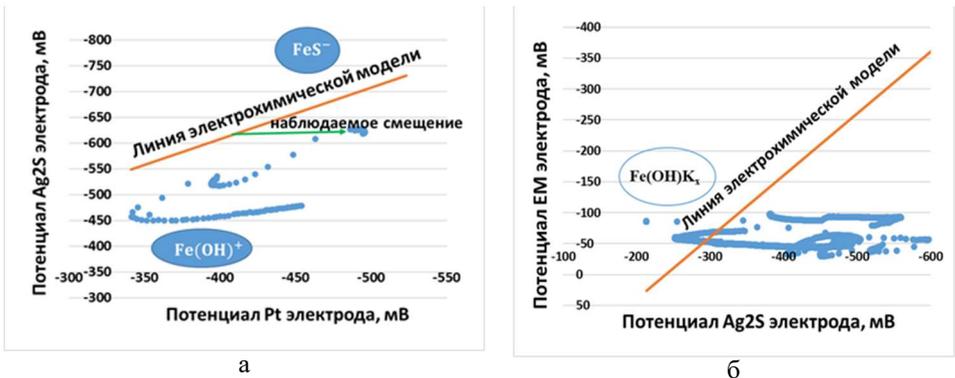
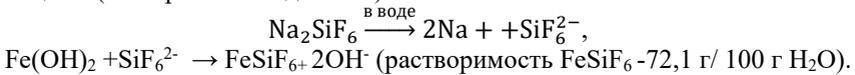


Рисунок 8 – Зависимости между значениями потенциалов: а – Ag₂S- и Pt-электродов; б – Ag₂S- и EM-электродов при наблюдении электрохимических трендов

Смещение значения потенциала EM-электрода в отрицательную область происходит не по линии электрохимической модели $Eh(EM) = Eh(Ag_2S) + 239$ мВ, а ниже, что доказывает прекращение процессов образования в пульпе комплексов типа $Fe(OH)Kx_2$ и говорит о нормализации поглощения ксантогената калия (рисунок 8, б). Следовательно, такая подготовка пульпы к подаче собирателя является целесообразной.

Анализ химических реакций кремнефтористого силиката натрия в щелочной пульпе, содержащей ионы железа и частицы железо- и медьсодержащих минералов, покрытых гидроксидными пленками, позволяет объяснить полученные результаты следующим. Подача в процесс флотации фторсиликата натрия приведет к растворению гидроксидов железа с поверхности частиц по реакциям (по справочным данным):



Произойдет очистка поверхности и ксантогенат сможет избирательно закрепляться в первую очередь на катионах меди поверхности частиц с образованием соединения $CuKx_2$. Произведение растворимости поверхностного соединения ксантогената меди меньше произведения растворимости объемного соединения.

Из трех альтернативных реагентных режимов сульфидной флотации, предложенных по результатам потенциометрической диагностики, наилучшим оказался реагентный режим с pH 8 (подкисление серной кислотой), подачей сернистого натрия в измельчение – 400 г/т, подачи фторсиликата натрия – 600 г/т во флотокамеру, расходом бутилового ксантогената калия – 300 г/т. При этих условиях наблюдается наиболее высокое извлечение меди в коллективный концентрат.

Однофакторные опыты с изменением расходов фторсиликата натрия и медного купороса позволили определить рациональные расходы (рисунок 9): медного купороса – 50 г/т, фторсиликата натрия – 600 г/т, pH 8, которые были приняты за нулевой уровень плана полного факторного эксперимента.

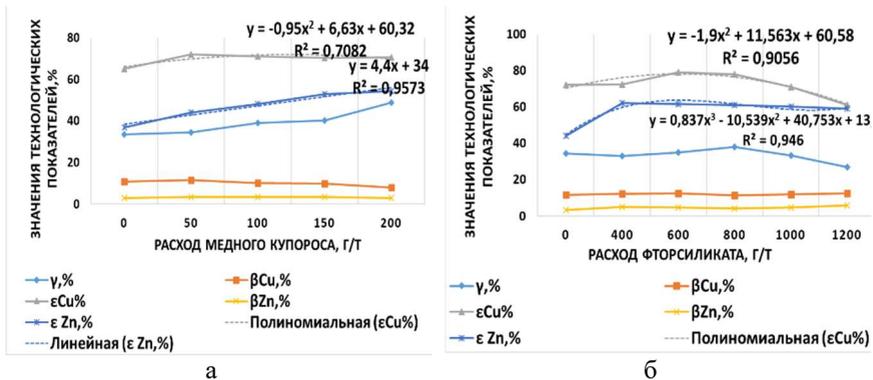


Рисунок 9 – Зависимости технологических показателей сульфидной флотации от расхода: а – медного купороса; б – фторсиликата натрия

Расходы фторсиликата натрия, медного купороса, pH являются значимыми факторами при флотации клинкера, их влияние на извлечение меди аппроксимируется математической моделью:

$$\epsilon = 55,01 + 0,11Q_{CuSO_4} + 0,02Q_{Na_2SiF_6} + 0,41pH - 0,00002Q_{CuSO_4}Q_{Na_2SiF_6},$$

где Q_{CuSO_4} – расход медного купороса, $Q_{Na_2SiF_6}$ – расход фторсиликата натрия, г/т.

Методом крутого восхождения оптимизирован реагентный режим для основной медной флотации: pH=10, $Na_2SiF_6=800$ г/т, $CuSO_4=62$ г/т, $\epsilon_{Cu}=80,94$.

Третье научное положение (доказано в 5-й главе): Комбинированная магнитно-гравитационно-флотационная технология переработки медистых клинкеров вельцевания цинковых кеков позволяет осуществить безотходное разделение клинкера на три продукта, пригодных для использования в смежных отраслях черной и цветной металлургии: медьсодержащий $\beta_{Cu}=14,52\%$, железосодержащий $\beta_{Fe}=50,17\%$, углеродсодержащий $\beta_{C}=40\%$.

Для совершенствования технологии комплексной переработки лежалого клинкера вельцевания цинковых кеков ЧЦЗ на основании проведенных исследований в схеме реализованы следующие технологические решения:

- комбинация мокрой магнитной сепарации и концентрации на столе для увеличения извлечения и концентрации медьсодержащих фаз в питании флотации;
- возврат немагнитного продукта второго приема магнитной сепарации на концентрационный стол для более полного разделения богатых сростков медьсодержащих и немагнитных фаз клинкера;
- получение углеродсодержащего продукта объединением легкой фракции концентрации на столе с пенным продуктом угольной флотации;
- изменение реагентного режима флотации путем введения: сернистого натрия для уменьшения отрицательных эффектов от перехода ионов железа в жидкую фазу пульпы и образования комплексных соединений с ксантогенатом $Fe(OH)Kx_2$, фторсиликата натрия для снятия экранирующей поверхность минералов гидроксидов железа, медного купороса для активации флотации медьсодержащих твердых растворов;
- получение в качестве хвостов флотации железосодержащего продукта.

Предложенная схема и реагентный режим реализованы в крупных лабораторных испытаниях. Полученные технологические показатели приведены на качественно-количественной технологической схеме (рисунок 10).

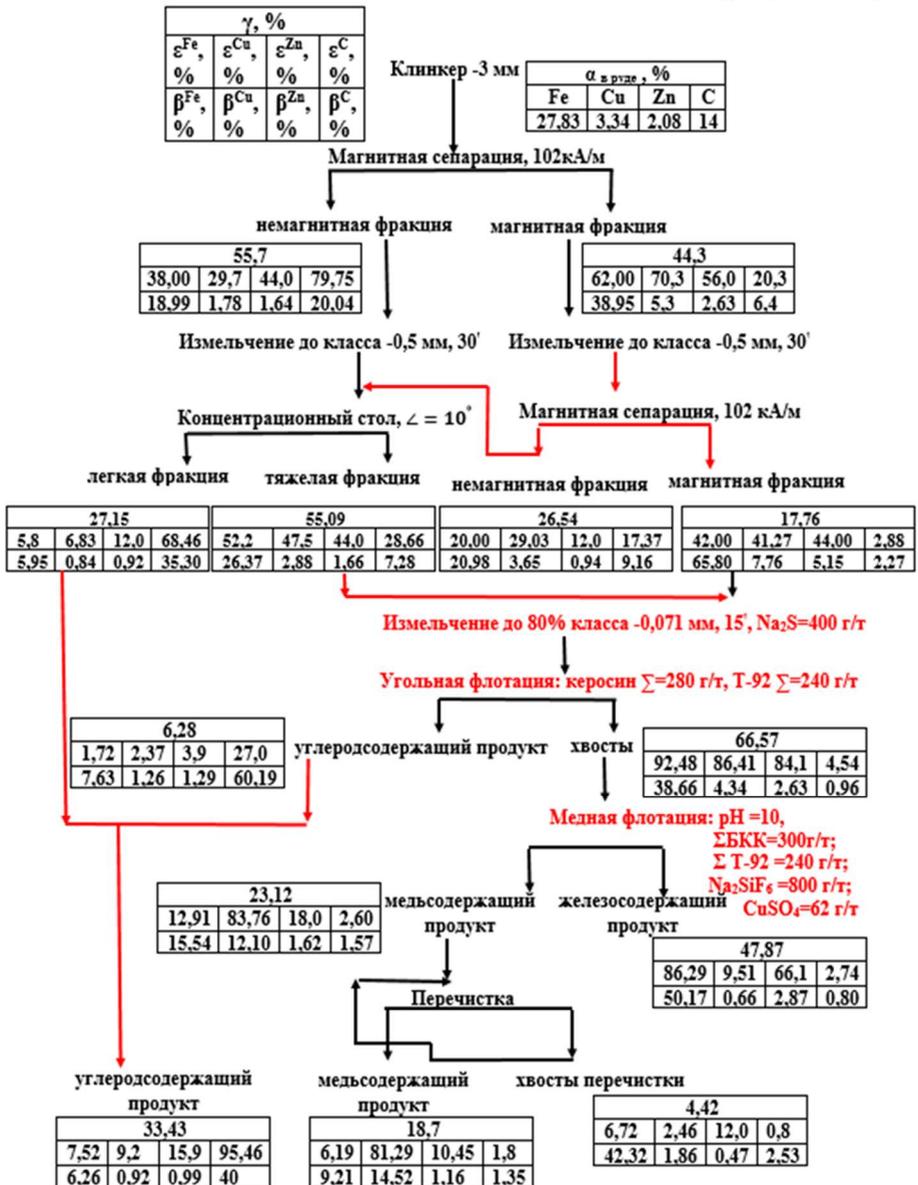


Рисунок 10 – Качественно-количественная схема обогащения клинкера ЧЦЗ

Она включает разделение клинкера крупностью -3 мм магнитной сепарацией (первый прием) при напряженности магнитного поля 102 кА/м; для повышения эффективности разделения богатых и бедных сростков медьсодержащих фаз с основными вмещающими фазами клинкера проводится отдельная дезинтеграция полученных магнитной и немагнитной фракций до крупности - 0,5 мм; магнитную сепарацию (второй прием) измельченного магнитного продукта с той же напряженностью 102 кА/м; объединение измельченного немагнитного продукта первого приема магнитной сепарации с немагнитным продуктом второго приема магнитной сепарации для классификации на столе; объединение магнитной фракция второго приема магнитной сепарации с тяжелой фракцией концентрационного стола, измельчение этого объединенного продукта до класса крупности -0,071 мм 80% с подачей в мельницу сернистого натрия (Na_2S) с расходом 400 г/т; последовательную угольную и сульфидную медную флотации. Реагентный режим угольной флотации, г/т: керосин=280; $\Sigma\text{T-92}$ =240. Реагентный режим сульфидной флотации, г/т: $\Sigma\text{БКК}$ =300; $\Sigma\text{T-92}$ =240, Na_2SiF_6 =800, CuSO_4 =62, pH =10. Полученный в результате угольной флотации пенный продукт после сушки объединяется с немагнитным продуктом концентрации на столе. Объединенный продукт является углеродсодержащим концентратом. Для повышения качества медного концентрата проводится пересчетная операция.

Заключение

В диссертации, являющейся законченной научно-квалификационной работой, изложены новые научно обоснованные технологические решения, позволяющие совершенствовать технологию переработки клинкера вельцевания до безотходной, повысить комплексность и получить три товарных продукта: углеродсодержащий, железосодержащий и медьсодержащий, имеющие существенное значение для развития страны.

Основные выводы и результаты диссертационного исследования:

1. Анализ теории и практики переработки клинкера вельцевания в России и за рубежом показал, что наиболее распространенным является обогатительное разделение по магнитно-флотационным схемам, но не установлены причинно-следственные связи между характеристиками сросткового состава и неудовлетворительными результатами обогащения клинкера.
2. Установлены текстурно-структурные особенности и технологические свойства клинкера вельцевания, определяющие трудную обогатимость, обусловленную наличием: ферритных медьсодержащих твердых растворов, склонных к переизмельчению; сульфидов железа, массовые доли которых в пробе составляют около 11% представленных минералами: магнитными (пирротином) и немагнитными (пиритом и троилитом); распределением медных техногенных минералов между сростками с магнитными фазами клинкера (пирротином, магнетитом) и более 25% с немагнитными фазами (мелилитом, пиритом, троилитом). Установлено, что клинкер в крупности 25-50 мм является низкоконтрастным по меди, коэффициент контрастности равен 0,67. Коэффициенты контрастности рассчитаны с использованием программы ЭВМ «RmS Calculator» (radiometric separation calculator – калькулятор радиометрической сепарации, свидетельство о регистрации № 2022619332 от 20 мая 2022 г.) на основе уравнения В.А. Мокроусова. Показано, что применение радиометрической сепарации в качестве предконцентрации не позволит сконцентрировать медьсодержащие фазы в крупнокусковом концентрате.

3. Впервые обоснована комбинация операций и параметров магнитного (крупность материала -3 мм в голове процесса, напряженность магнитного поля 102 кА/м) и гравитационного (крупность материала -0,5 мм, угол наклона концентрационного стола 10°) обогащения клинкера для концентрации меди в продукте перед флотацией. Установлено, что гравитационное разделение кокса и рядовых, богатых сростков халькозина и халькопирита с основными фазами клинкера: коксом, троилитом и мелилитом (окерманитом) будет эффективно для фракции клинкера -0,5 мм, содержание в которой класса крупности -0,15 мм составляет 60%. Возможность применения гравитационного разделения и крупность обосновывается соотношением плотностей рядовых и богатых сростков минералов меди с немагнитными фазами клинкера и плотности кокса, коэффициентом их гравитационного разделения более 1,75.

4. Потенциометрической диагностикой выявлены причины низкой флотации меди, заключающиеся в наличии в пульпе железа в виде ионов $\text{Fe}(\text{OH})^+$, которые способствуют образованию пленок гидроксида железа на поверхности частиц клинкера, что приводит к снижению контрастности разделяемых фаз. Также происходит образование комплекса $\text{Fe}(\text{OH})\text{Kx}_2$ в пульпе, что приводит к перерасходу собирателя бутилового ксантогената калия. Методом ПФЭ установлено, что закономерность влияния расходов реагентов на извлечение меди аппроксимируется математической моделью:

$$\varepsilon = 55,01 + 0,11 Q_{\text{CuSO}_4} + 0,02 Q_{\text{Na}_2\text{SiF}_6} + 0,41 \text{pH} - 0,00002 Q_{\text{CuSO}_4} Q_{\text{Na}_2\text{SiF}_6},$$

где Q_{CuSO_4} – расход медного купороса, г/т, $Q_{\text{Na}_2\text{SiF}_6}$ – расход фторсиликата натрия, г/т. Методом крутого восхождения оптимизирован реагентный режим для основной медной флотации: $\text{pH}=10$, $\text{Na}_2\text{SiF}_6=800$ г/т, $\text{CuSO}_4=62$ г/т. Предложенный реагентный режим предусматривает подачу: сульфида натрия в измельчение для предотвращения окисления металлического железа и, как следствие, снижение в пульпе ионов $\text{Fe}(\text{OH})^+$; фторсиликата натрия во флотацию для уменьшения действия ионов железа и его продуктов в пульпе и на поверхности минералов; медного купороса для активации флотации медь-, цинк-, железосодержащих твердых растворов.

5. Разработана усовершенствованная схема обогащения клинкера, включающая: комбинацию магнитного и гравитационного методов для концентрирования медьсодержащих фаз в питании флотации; возврат продукта на концентрационный стол после второй магнитной сепарации; получение углеродсодержащего продукта в результате объединения легкой фракции после концентрации на столе с пенным продуктом флотации; изменение реагентного режима флотации введением: сернистого натрия для уменьшения отрицательных эффектов от перехода ионов железа в жидкую фазу пульпы и образования комплексных соединений с ксантогенатом $\text{Fe}(\text{OH})\text{Kx}_2$; фторсиликата натрия для снятия экранирующих поверхность минералов гидроксидов железа; медного купороса для активации флотации медьсодержащих твердых растворов; получение в качестве хвостов флотации железосодержащего продукта; позволяет получить: углеродсодержащий продукт с массовой долей Cu в нем 0,92%, Fe – 6,26%, C – 40%, при извлечении в него Cu – 9,2%, Fe – 7,52%, C – 95,46%; железный концентрат с массовой долей Cu в нем 0,66%, Fe – 50,17%, C – 0,8%, при извлечении в него Cu – 9,51%, Fe – 86,29%, C – 2,74%; грубый медный концентрат с массовой долей Cu в нем 14,52%, Fe – 9,21%, C – 1,35%, при извлечении в него Cu – 81,29%, Fe – 6,19%, C – 1,8%. Угольный концентрат направляется обратно на ЧЦЗ для загрузки в вельц-печь, железный концентрат

используется в качестве сырья для участков переработки металлургических шламов и медный концентрат марки КМ-7 – в производстве меди.

6. Удельный экономический эффект при переработке клинкера по разработанной технологии составляет 6,6 млн руб. на 1000 т, что обеспечивает окупаемость в первый год с учетом дисконтированного дохода.

Основные научные и практические результаты диссертации изложены в следующих работах:

Издания, рекомендуемые ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ

1. Орехова, Н.Н. Совершенствование технологии переработки лежалого медистого клинкера / Н.Н. Орехова, **И.В. Глаголева** // Успехи современного естествознания. – 2023. – № 6. – С. 104-112.
2. Минералогические и текстурно-структурные особенности лежалого вельц-клинкера / Н.Н. Орехова, **И.В. Глаголева**, Ю.Ю. Ефимова, О.Е. Горлова // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2022. – Т. 28, № 4. – С. 35-49.
3. Влияние реагентов на основе диалкилдитиофосфатов на флотацию меди из пиритсодержащих шлаков / М.Н. Сабанова, Н.Н. Орехова, О.Е. Горлова, **И.В. Глаголева** // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 2018. – № 4. – С. 4-14.

Научные издания, входящие в международные реферативные базы данных и системы цитирования

4. Determination of criterion for selectivity of disintegration of technogenic raw materials for environmentally oriented processing / E.V. Kolodezhnaya, O.E. Gorlova, N.N. Orehova, M.S. Kolkova, **I.V. Glagoleva** // IOP conference series: earth and environmental science: International Russian Conference on Ecology and Environmental Engineering (RusEcoCon 2022), Sochi, 16–20 мая 2022 г. Vol. 1061. – Sochi: IOP Publishing, 2022. – P. 012040.
5. Orehkova, N.N. Study of the separation of mineral phases of Waelz clinker for its disposal / N.N. Orehkova, O.E. Gorlova, **I.V. Glagoleva** // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety, ICCATS 2020, Sochi, 06–12 сентября 2020 г. Vol. 962, 4. – Sochi: IOP Publishing Ltd, 2020. – P. 042030.

Патенты РФ и охранные документы

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022619332 Российская Федерация. RmS Calculator: № 2022618560: заявл. 13.05.2022; опубл. 20.05.2022 / **И. В. Глаголева**, О. Е. Горлова, Н. Н. Орехова, А. Е. Сабанов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Прочие издания

7. **Глаголева, И.В.** Комбинации разделительных процессов при переработке вельц-клинкера / И. В. Глаголева, Н. Н. Орехова // Проблемы комплексной и экологически безопасной переработки природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения - 2021), Владикавказ, 04–08 ноября 2021 г. – Владикавказ: Северо-Кавказский горно-металлургический

- институт (Государственный технологический университет), 2021. – С. 514-516.
8. Орехова, Н.Н. Микроскопическое изучение особенностей концентрации металлов в фазах вельц-клинкеров / Н.Н. Орехова, **И.В. Глаголева** // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: Тезисы докладов 79-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 19–23 апреля 2021 г. Том 1. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2021. – С. 33.
 9. **Глаголева, И.В.** Изучение структурно-фазовых особенностей лежалого медистого клинкера / И. В. Глаголева // Актуальные проблемы горного дела. – 2021. – № 2. – С. 21-27.
 10. Орехова, Н.Н. Изучение вещественного состава медистых вельцклинкеров / Н.Н. Орехова, **И.В. Глаголева** // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 78-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 20–24 апреля 2020 г. Том 1. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2020. – С. 43.
 11. Изучение обогатимости клинкеров вельцевания / Н.Н. Орехова, М.Н. Сабанова, И.В. Шадрюнова, **И.В. Глаголева** // XII Конгресс обогатителей стран СНГ, Москва, 25–27 февраля 2019 г. – Москва: ООО ИТЕП, 2019. – С. 275-280.
 12. Орехова, Н.Н. Сравнение обогатимости клинкеров цинковых заводов / Н.Н. Орехова, **И.В. Глаголева** // Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых: Материалы 14 Международной научной школы молодых ученых и специалистов, Москва, 28 октября – 01 2019 г. – Москва: Институт проблем комплексного освоения недр РАН, 2019. – С. 287-290.
 13. Исследование возможности гравитационного обогащения медистого клинкера / Н.Н. Орехова, **И.В. Глаголева**, А.А. Покотило, И.А. Искужина // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: Тезисы докладов 77-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 22–26 апреля 2019 г. Том 1. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2019. – С. 67.
 14. Орехова, Н.Н. Обзор практики извлечения ценных компонентов из клинкера вельцевания / Н.Н. Орехова, **И.В. Глаголева** // Комбинированная геотехнология: ресурсосбережение и энергоэффективность: IX Международная конференция, Магнитогорск, 22–26 мая 2017 г. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2017. – С. 140-142.
 15. Сабанова, М.Н. Исследования и практика переработки вельц – клинкера / М.Н. Сабанова, **И.В. Глаголева**, Н.Н. Орехова // Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья (Плаксинские чтения - 2017): Материалы Международной научной конференции, Красноярск, 12–15 сентября 2017 г. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2017. – С. 379-381.
 16. Орехова, Н.Н. Анализ практики извлечения ценных компонентов из вельц-клинкера / Н.Н. Орехова, **И.В. Глаголева** // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2017. – Т. 1. – С. 41-44.