

На правах рукописи



ЛИШНЯЯ ЕКАТЕРИНА НЕСТОРОВНА

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА
МАГНЕТИТОВОГО КОНЦЕНТРАТА НА ОСНОВЕ
ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЙ ДЕФЛОКУЛЯЦИИ ПУЛЬПЫ**

Специальность 25.00.13 – «Обогащение полезных ископаемых»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2010



004600137

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Московский государственный горный университет»

Научный руководитель

кандидат технических наук, доцент **Юшина Татьяна Ивановна**

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

Вигдергауз Владимир Евелевич

кандидат технических наук

Романчук Александр Ильич

Ведущая организация – ФГУП «ВИМС им. Н.М. Федоровского» (г. Москва)

Защита диссертации состоится «27» апреля 2010г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.128.08 при Московском государственном горном университете по адресу: 119991, Москва, Ленинский проспект, 6.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного горного университета.

Автореферат разослан «26» марта 2010г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук

Шек Валерий Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время Россия занимает одно из ведущих мест в мировом балансе железорудного сырья по запасам, производству, потреблению и экспорту продукции. Прогнозные ресурсы оцениваются в 150 млрд.т. Основное промышленное назначение имеют магнетитовые руды с содержанием 31-35 % железа, из которых методом многостадийной магнитной сепарации получают концентраты с содержанием 65-68 % железа и 5-8 % кремнезема. Магнитное обогащение является основным методом в железорудной промышленности.

Основные трудности магнитного обогащения связаны с постоянным уменьшением крупности материала, поступающего на магнитную сепарацию, что в свою очередь вызвано условиями раскрытия при обогащении весьма тонковкрапленных руд, доля которых в общей добыче непрерывно возрастает. Магнитная восприимчивость частиц крупностью менее 20 мкм, взвешенных в пульпе, и соответственно магнитная сила обычно в два-три раза ниже, чем у крупных.

Побочными эффектами, сопутствующими процессам магнитного разделения минералов, являются магнитная флокуляция сильномагнитных материалов, а также динамические, электродинамические, термодинамические и другие эффекты, существенно влияющие на процессы магнитного обогащения.

Важным фактором оптимизации процесса магнитной сепарации является изменение в заданном направлении магнитных характеристик зерен минералов с применением механических, физических, физико-химических, термических, термомеханических методов. Для направленного регулирования поверхностных свойств минералов и повышения их контрастности используют различные виды энергетических воздействий. Высокоэнергетические виды воздействий (энергия ускоренных электронов, плазменная обработка) позволяют модифицировать объемные свойства минералов и переводить их из одной модификации в другую, тем самым создают возможность переработки существующими методами обогащения, т.е. превращать минерал в такое химическое соединение, которое легко обогащается классическими методами. Однако из-за больших энергетических затрат (10-20 кВт*ч/т) данная технология не вышла за рамки лабораторных исследований.

Наибольшее применение находят электрохимические воздействия вследствие наиболее полной научной проработки основ процесса и сравнительно низких энергетических затратах при реализации в промышленности.

Истощение запасов богатого сырья и вовлечение в переработку магнетитовых кварцитов; отличающихся тонкой вкрапленностью рудных и нерудных минералов, сложностью структурно-текстурных особенностей и вещественного состава, вместе с повышением спроса на мировом рынке на высококачественные низкокремнеземистые концентраты вынуждают производителей железорудной продукции модернизировать свои технологические схемы, искать возможность их совершенствования или введения дополнительных способов обработки.

Основной научной задачей являлись расширение знаний о процессах, протекающих в системе тонкодисперсной магнетитовой суспензии, и выбор оптимальных условий электроимпульсной обработки железорудной пульпы с целью дезагрегирования магнетитовых флокул, обеспечивающего повышение качества магнетитового концентрата.

Поэтому исследования в направлении электроимпульсных воздействий являются весьма актуальными.

Целью работы является разработка метода повышения качества магнетитового концентрата на основе электроимпульсной дефлокуляции железорудной пульпы за счет удаления из нее породообразующих минералов.

Идея работы заключается в использовании эффекта заряджения частиц импульсным электрическим полем для интенсификации процесса дефлокуляции магнетитового концентрата.

Задачи исследований:

- Изучить механизм электростатического взаимодействия частиц рудной и нерудной фазы магнетитовой суспензии за счет формирования разноименных зарядов поверхности и причины их возникновения.

- Установить характер влияния величины напряженности импульсного электрического поля на силу электростатического взаимодействия частиц.

- Экспериментально исследовать влияние электроимпульсной обработки на состояние поверхности и дефектность частиц железосодержащего материала.

- Разработать и обосновать область технологических режимов процесса электроимпульсных воздействий на железорудную пульпу.

Методы исследований: использованы химический, минералогический методы исследований исходной руды и конечных продуктов обогащения. Математическое моделирование дезагрегирования частиц, исследование влагоемкости, лабораторные испытания процесса магнитной сепарации, математические методы планирования экспериментов и обработки результатов.

Научные положения, разработанные лично соискателем, и их новизна:

- Установлен механизм и предложена модель процесса дефлокуляции на основе электростатического взаимодействия частиц минералов железа и пустой породы в зависимости от суммарных зарядов каждой частицы, величина и знак которых обуславливаются степенью дефектности и поляризацией материала концентрата во внешнем электрическом поле.

- Установлена ранее неизвестная зависимость влияния величины амплитуды напряженности импульсного электрического поля на силу взаимодействия частиц, имеющая параболический характер и позволяющая определить условия для максимальной эффективности протекания процесса дефлокуляции.

- Установлены технологически обоснованные интервалы напряженности импульсного электрического поля ($(0,1-1,8) \cdot 10^7$ В/м), длительности импульса ($10^{-3}-10^{-6}$ с) и значения электрического потенциала поверхности частиц ($\varphi=0,027$ В для магнетита и $\varphi=0,27$ В для кварца), необходимые для их дефлокуляции и обеспечивающие оптимальный режим сепарации.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются:

- инженерной оценкой аналитических исследований;

- удовлетворительной сходимостью результатов теоретических исследований с экспериментальными результатами;

- положительными результатами лабораторных испытаний способа и технических средств для электроимпульсного кондиционирования железосодержащего концентрата на ОАО «Михайловский ГОК».

Научное значение работы состоит в разработке механизма электроимпульсной дефлокуляции частиц минералов железа и породы в магнетитовой суспензии, теоретическом и экспериментальном обосновании эффективности применения метода электроимпульсной дефлокуляции железорудной пульпы перед процессом магнитного обогащения.

Практическое значение работы состоит в разработке рекомендаций по определению режима электроимпульсной дефлокуляции железорудной пульпы перед процессом магнитной сепарации, обеспечивающего повышение технологических показателей обогащения.

Реализация работы заключается в использовании рекомендаций на ОАО «Михайловский ГОК» для внедрения процесса электроимпульсной дефлокуляции с целью повышения качества конечного концентрата.

Апробация работы. Основные результаты и положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных симпозиумах «Неделя горняка» (Москва, МГУ, 2008, 2009); на международной научной школе молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (Москва, УРАН ИПКОН РАН, 2008); на научных семинарах кафедры «Обогащение полезных ископаемых» МГУ (2007-2009 гг.).

Публикации. По результатам работы опубликовано 5 статей.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка используемой литературы из 103 наименований; содержит 29 рисунков и 9 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и идея работы, представлены задачи и методы исследований, научные положения, раскрыты научная и практическая значимость работы.

В первой главе диссертации представлен анализ современного состояния магнитного обогащения железных руд и пути интенсификации этого процесса. Показано, что одним из перспективных методов повышения технологических показателей мокрой магнитной сепарации является использование электрических воздействий для направленного изменения поверхности минеральных частиц, основанное на последних достижениях фундаментальных наук и в первую очередь физики твердого тела.

При минералогическом анализе магнетитовых концентратов установлено, что в пробах присутствуют зерна свободного кварца в количестве 6-7 % и кварца в сростках с магнетитом в пределах 9,2 %.

Расчеты показали, что полное удаление свободных нерудных зерен позволит повысить содержание железа общего в концентрате до 70 % без увеличения степени раскрытия минералов.

В процессе мокрой магнитной сепарации происходит формирование магнетитовых флокул с захватом немагнитной фракции, извлекаемых затем магнитной системой. Флокулы настолько прочны, что сохраняются и после сепарации, и таким образом, в последующую операцию магнитной сепарации поступает уже частично сфлокулированный материал с удерживаемыми немагнитными частицами.

В процессе измельчения железосодержащих руд нерудные минералы – кварц и силикаты – покрываются выделяющимися при этом ионами двух- и трех-

валентного железа, активируются и вследствие прямого пьезоэлектрического эффекта при деформации частиц данных минералов на их поверхности возникают электрические заряды. Активация кварца обуславливается также налипанием рудных минералов на его поверхность.

Методологической основой решения задачи повышения качества железорудных концентратов в процессе мокрой магнитной сепарации являются результаты исследований по совершенствованию мокрой магнитной сепарации, значительный вклад в развитие которых внесли В.А. Чантурия, В.В. Кармазин, П.И. Пилов, Э.А. Трофимова, Т.Н. Гзогян и др.

Проведен обзор причин возникновения заряда на поверхности частиц минералов, который может иметь различную природу, а именно: за счет трибоэлектрического эффекта; пьезоэлектрического эффекта, возникающего при деформировании кварца и других минералов-пьезоэлектриков; за счет наличия дислокаций, имеющих нескомпенсированный заряд; эффекта Степанова, характеризующего появление поверхностного заряда при деформации ионов кристаллов, и др.

Анализ процессов образования зарядов с позиции теории дислокации показывает, что у дислокации могут оседать с равной вероятностью как катионные, так и анионные вакансии, поскольку энергия их связи с ядром дислокации одинакова. Поэтому в чистых кристаллах на дислокациях должно быть одинаковое число положительно и отрицательно заряженных ступенек, и дислокации будут в целом электронейтральными. В реальном кристалле из-за присутствия примесей всегда имеются в избытке вакансии одного сорта. Оседание (захват при движении) этих вакансий на нейтральных ступеньках может быть наиболее вероятной причиной появления заряженной ступеньки на дислокации.

Связь заряда на поверхности с подошедшими к поверхности заряженными дислокациями подтверждается сопоставлением поверхностного заряда с движением дислокаций при деформации. Двухвалентные примеси оказывают влияние как на напряжение, отвечающее появлению заряда, так и на величину и знак заряда.

Кулоновское взаимодействие между частицами твердой фазы, имеющими поверхностный заряд, является причиной возникновения сил Ван-дер-Ваальса. Однако полного соприкосновения частиц за счет кулоновского взаимодействия не происходит по причине возникновения между частицами двойного электрического слоя (ДЭС).

Частицы, находящиеся в полярной жидкости, такой, как вода, обычно несут чистые (несвязанные) заряды на своей поверхности. Ионы дисперсионной среды, имеющие заряд, противоположный заряду частицы, притягиваются к поверхности частицы, а ионы одинакового заряда отталкиваются от нее. Наложение этого эффекта на эффект перемешивания от теплового движения приводит к образованию ДЭС.

Количественная оценка величины поверхностного заряда, как правило, производится экспериментально: путем измерения электрического потенциала, возникающего при деформировании минерала; путем изучения влияния содержания анионов и катионов в коллоидных системах на их устойчивость, а также путем измерения скорости движения дислокаций под действием электрического поля.

Теоретическая оценка величины поверхностного заряда в зависимости от размера частиц и химического состава параметров кристаллической решетки минерала впервые была сделана в работе проф. С.А. Гончарова. Указанная теория основывается на расчете заряда элементарной кристаллической решетки с учетом валентности элементов, входящих в состав данного минерала.

В работе сделан анализ возможных механизмов взаимодействия частиц магнетита и кварца за счет сил электростатического притяжения и отталкивания. Исследованиям заряда на поверхности минеральных частиц были посвящены работы А.В. Степанова, С.А. Гончарова, Н.А. Тяпуниной, Э.П. Белозеровой, А.А. Урусовской и др.

Известно, что в технологическом процессе магнитной сепарации имеет место захват частиц, представляющих собой сростки магнетита и кварца, а также захват свободных нерудных частиц, что ухудшает технологические показатели обогащения, поэтому процесс дефлокуляции магнетитового концентрата требует дополнительного исследования.

Во второй главе рассмотрены механизмы взаимодействия частиц магнетита и кварца в электрическом поле. Приведены оценочные расчеты сил электростатического притяжения двух частиц, обусловленных наличием собственных зарядов и необходимой величины напряженности электрического поля для создания условий отталкивания частиц за счет возникновения электрических диполей вследствие поляризации частиц.

При наложении на породу электрического поля в ней происходит смещение внутренних связанных зарядов. В результате на ее поверхности появляются неуравновешенные заряды, которые создают электрическое поле, направленное противоположно внешнему и ослабляющее последнее. Поляризация происходит только за счет смещения (или поворота) связанных зарядов, в качестве которых могут выступать как атомы, ионы кристаллической решетки с гомео- и гетерополярной связью, так и целые объемы породы, оказавшиеся в особых структурных условиях. Для получения исходных данных, необходимых для оценочных расчетов, были проведены постановочные эксперименты.



Рис.1. Концентрат мокрой магнитной сепарации $(-0,16+0,08)$, увеличение 25 (адгезия кварца (светлое зерно) на магнетите (темное зерно))

Микроскопический анализ магнетитового концентрата подтвердил наличие зерен кварца на поверхности магнетита в результате их адгезии (рис.1).

Для построения математической модели взаимодействия частиц магнетита и кварца была оценена величина критического расстояния между частицами, которое, по крайней мере, должно быть больше удвоенного размера двойного электрического слоя (ДЭС). С использованием экспериментальной методики, приведенной в главе 3, было установлено, что величина ДЭС составила 7-8 % от среднего размера частиц.

При разработке модели процесса силового взаимодействия минеральных частиц в электрическом поле были рассмотрены две частицы: магнетита (Fe_3O_4) и кварца (SiO_2) (рис.2) с размерами d_1 , и d_2 соответственно. Частицы находятся на расстоянии r_0 друг от друга и обладают поверхностным зарядом ($q_{поверх1}$ и $q_{поверх2}$), обусловленным увеличением дефектов на этапе рудоподготовки (эффект Степанова, рост плотности заряженных дислокаций).

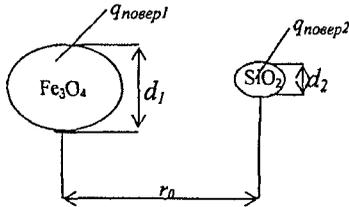


Рис. 2. Система двух частиц Fe_3O_4 и SiO_2 .

Условием взаимодействия двух частиц (флокуляция за счет сил электростатического притяжения) является $F_{эл} > F_{отталки}$. Условием дефлокуляции (разрушение флокул) является $F_{отталки} > F_{эл}$.

Выражение для определения поверхностного заряда, характеризующегося электрическим потенциалом φ_s , имеет вид:

$$\bar{q}_s = \frac{\varphi_s \epsilon \epsilon_0}{\lambda}, \quad (1)$$

где λ – толщина двойного электрического слоя, м.

В водной среде происходит частичная компенсация заряда поверхности (рис. 3):

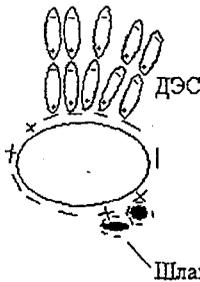


Рис.3. Частичная компенсация заряда поверхности в водной среде

$$\bar{q}_{комт} = \eta \cdot \bar{q}_s, \quad \eta \leq 1, \quad (2)$$

где η – коэффициент компенсации заряда.

В работе рассмотрено, как изменяются заряды на поверхности частиц при помещении их в электрическое поле с напряженностью, изменяющейся во времени как $E(t)$. Незаряженный диполь начинает поляризоваться и на поверхности частиц возникают наведенные заряды $q_{нае}$ (рис.4), где p – поляризация внутреннего поля.

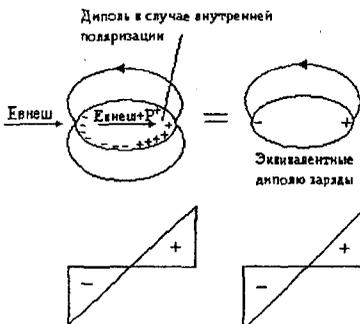


Рис.4. Поляризация материала частицы и возникновение полей рассеивания под действием внешнего поля

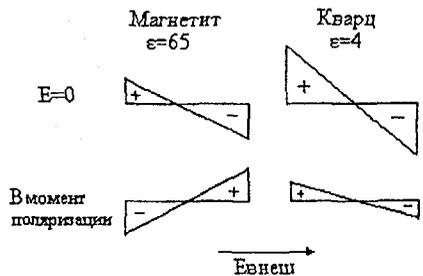


Рис.5 Суммарная этора заряженной поверхности частицы и заряда, возникшего после ее поляризации

Суммарная эпюра заряженной поверхности частицы и заряда, возникшего после ее поляризации, имеет вид (условие для отталкивания частиц) (рис. 5).

Для построения модели электростатического взаимодействия частиц принимаем допущение, что кривизной большой частицы можно пренебречь (рис.6), плоскость обладает зарядом, эквивалентным заряду поверхности частицы магнетита. Тогда уравнение движения частиц можно записать в следующем виде:

$$m_2 \ddot{x} = -F_{\text{вязк}} - F_{\text{повех}} + F_3, \quad (3)$$

$$m_2 = \rho_2 \frac{\pi d_2^3}{6}, \quad (4)$$

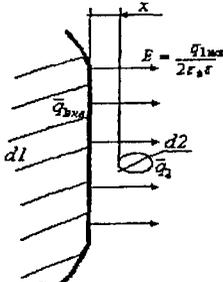


Рис.6. Схема взаимодействия частиц в электрическом поле

где m_2 – масса малой частицы (кварцевой), г;
 ρ_2 – плотность кварца, г/см³;
 d_2 – диаметр (размер) малой частицы (кварцевой), м;

\ddot{x} – ускорение малой частицы (кварцевой), м/с².

Используя второй принцип определения вязкости, основанный на измерении скорости падения шара в вязкой среде (формула Стокса), получим формулу для определения силы вязкого сопротивления жидкости для малой частицы:

$$F_{\text{вязк}} = 3\pi d_2 \mu V = 3\pi d_2 \mu \dot{x}, \quad (5)$$

где V – скорость движения частицы в жидкости, м/с;
 μ – вязкость среды, кг/с*м; x – текущая координата перемещения частицы, м.

При составлении уравнения движения частиц силой поверхностного натяжения воды ($F_{\text{повех}}$) можно пренебречь, так как на две частицы, взаимодействующие за счет электростатических сил в водной среде, оказывают влияние молекулы воды, которые стремятся занять положение на всей поверхности минеральных частиц – расклинивающий эффект (эффект Риббиндера) (рис.7).

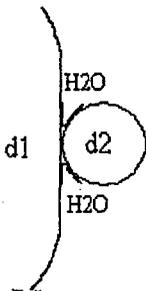


Рис.7. Действие расклинивающего эффекта

процессе поляризации:

$$F_{\text{за}} = \frac{q_{2\text{эко}} \bar{q}_{1\text{эко}}}{2\epsilon_0 \epsilon} = \frac{1}{2\epsilon \epsilon_0} [q_{\text{повех}2} + q_{\text{дин}2}] \cdot \left[\frac{q_{1\text{эко}}}{\pi d_1^2} \right]. \quad (6)$$

После преобразований и сокращений формула имеет следующий вид:

$$F_{\text{за}} = -\frac{d_2^2 \epsilon_0 \epsilon_1 \epsilon_2}{2\epsilon_{\text{cp}} \pi} E^2 + \frac{d_2^2}{2\epsilon_{\text{cp}}} (\bar{q}_{s2} \epsilon_1 + \bar{q}_{s1} \epsilon_2) E - \frac{d_2^2 \bar{q}_{s1} \bar{q}_{s2} \pi}{2\epsilon_{\text{cp}} \epsilon_0}. \quad (7)$$

Для оценки силы взаимодействия частиц выразим отношение силы электростатического взаимодействия частиц к весу малой (нерудной) частицы:

$$\bar{F} = \frac{F_{\text{эл}}}{m_2 g} = \frac{3}{\varepsilon_{\text{ср}} m_2 \rho_2 g} \left[-\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon_2}{\pi} E^2 + (\bar{q}_{S2} \varepsilon_1 + \bar{q}_{S1} \varepsilon_2) E - \frac{\bar{q}_{S1} \bar{q}_{S2} \pi}{\varepsilon_0} \right]. \quad (8)$$

Квадратное уравнение имеет решение, если его дискриминант больше нуля, отсюда необходимым условием дефлокуляции является неравенство:

$$(\varepsilon_1 \bar{q}_{S2} + \varepsilon_2 \bar{q}_{S1})^2 > \frac{4\pi \bar{q}_{S1} \bar{q}_{S2} \varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_0 \pi}, \quad (9)$$

$$(\varepsilon_1 \bar{q}_{S2} - \varepsilon_2 \bar{q}_{S1})^2 > 0. \quad (10)$$

Из полученного неравенства можно сделать вывод, что при любых значениях величин ε_1 , ε_2 , \bar{q}_{S1} , \bar{q}_{S2} выражение будет положительно, а значит найдется диапазон поля, необходимый для дефлокуляции частиц. Зависимость имеет параболический вид.

Решив квадратное уравнение (7) относительно E , нашли значения E_{max} и E_{min} :

$$E_{\text{max}} = 1,8 \cdot 10^7 \text{ В/м};$$

$$E_{\text{min}} = 0,1 \cdot 10^7 \text{ В/м}.$$

Отношение силы электростатического взаимодействия частиц к весу нерудной частицы было оценено для различных значений напряженности электрического поля, в результате чего получена зависимость параболического характера, определяющая диапазон значений напряженности электрического поля, необходимых для разрушения флоккул (рис. 8).

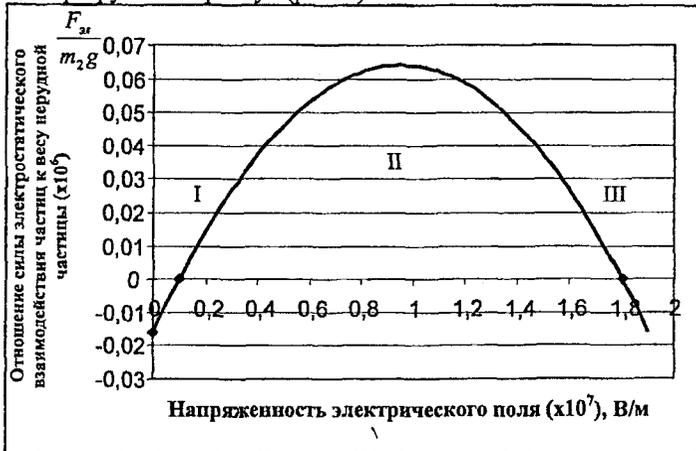


Рис.8. Диапазон напряженности электрического поля, необходимый для дефлокуляции частиц магнетита и кварца. (I, III – зона больших и маленьких полей, где процесс дефлокуляции не происходит; II – зона, где происходит процесс дефлокуляции), плотность дислокаций в магнетите $\alpha_m = 6,7 \cdot 10^{15} \text{ шт/м}^2$

Диапазон значений напряженности электрического поля получен при следующих исходных данных: плотность дислокаций в кварце $\alpha_k = 5,85 \cdot 10^{15} \text{ шт/м}^2$, удельный заряд поверхности $\bar{q}_{1,2} = 6,7 \cdot 10^{15} \text{ шт/м}^2 \cdot 3 \cdot 10^{-20} \text{ К} = 20,1 \cdot 10^{-5} \text{ К/м}^2$, время,

необходимое для воздействий – более $0,4 \cdot 10^6$ с; удельное усилие отталкивания частиц – $39 \cdot 10^3$ Н/м².

Подставив значения сил в уравнение движения частиц, получим динамическую модель, описывающую взаимодействие частиц в вязкой среде:

$$\ddot{x} + \frac{18\mu}{\rho_2 d_2^2} \dot{x} = -\frac{3\varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_{cp} \pi^2 \rho_2 d_2} E^2 + \frac{3}{\varepsilon_{cp} \rho_2 \pi d_2} (\bar{q}_{S2} \varepsilon_1 + \bar{q}_{S1} \varepsilon_2) E - \frac{3\bar{q}_{S1} \bar{q}_{S2}}{\varepsilon_{cp} \varepsilon_0 \rho_2 d_2}. \quad (11)$$

Решив дифференциальное уравнение, находим, что перемещение малой частицы относительно большой частицы магнетита описывается следующей зависимостью:

$$x = \frac{d_2 \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_0}{24 \mu \varepsilon_{cp} \lambda^2} (\varphi_{S2} - \varphi_{S1})^2 \cdot \left[t_{имп} - \frac{\rho_2 d_2^2}{18\mu} \left(1 - e^{-\frac{18\mu t_{имп}}{\rho_2 d_2^2}} \right) \right]. \quad (12)$$

Для оценки степени дезагрегированности частиц под действием электроимпульсной обработки предложен критерий дефлокуляции, позволяющий учесть величину и знак электрического потенциала поверхности, длительность импульса и тем самым регулировать состояние поверхности частиц и управление процессом дефлокуляции.

За критерий дефлокуляции частиц принимаем неравенство, показывающее, что величина перемещения частиц всегда должна быть больше толщины диффузного слоя ДЭС:

$$x > \lambda, \quad (13)$$

где x – перемещение частицы, м; λ – толщина двойного электрического слоя, м.

Максимальное перемещение частиц (x_{max}) должно достигаться под действием электрического поля (E) на систему частиц. На рис. 9 показана зависимость величины напряженности электрического поля от длительности электрического импульса.

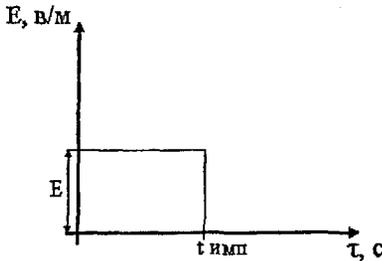


Рис.9. Зависимость величины напряженности электрического поля от длительности импульса, необходимых для дефлокуляции частиц

Подставляя выражения для перемещения частиц и для толщины ДЭС в критерий дефлокуляции частиц, имеем:

$$\frac{d_2 \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_0}{24 \mu \varepsilon_{cp} \lambda^2} (\varphi_{S2} - \varphi_{S1})^2 \cdot \left[t_{имп} - \frac{\rho_2 d_2^2}{18\mu} \left(1 - e^{-\frac{18\mu t_{имп}}{\rho_2 d_2^2}} \right) \right] > \lambda. \quad (14)$$

При следующих значениях параметров критерия: вязкость среды $\mu=0,01$ пуаз= $0,01$ кг/с*м, плотность частицы кварца $\rho_2=2,5 \cdot 10^3$ кг/м³, размер маленькой частицы (кварца) $d_2=3 \cdot 10^{-5}$ м, была проведена численная оценка критерия дефлоку-

ляции и получены зависимости напряженности электрического поля и времени импульса, необходимые для дефлокуляции частиц, от значений электрического потенциала их поверхности (рис. 10 и 12).



Рис.10. Зависимость напряженности электрического поля, необходимой для дефлокуляции частиц, от электрического потенциала поверхности: 1 – магнетит, 2 – кварц



Рис.11. Зависимость необходимого времени импульса для дефлокуляции частиц, от электрического потенциала поверхности: 1 – магнетит, 2 – кварц

В третьей главе приведены результаты исследований влияния электроимпульсной обработки на состояние поверхности и дефектность частиц железосодержащего материала подвергающегося магнитной сепарации.

Для проведения исследований был создан лабораторный стенд для обработки пульпы (рис. 12).

Электроимпульсное кондиционирование (ЭИК) железорудной суспензии проводится в электролизерах, предназначенных для обработки рудной пульпы. Был выбран электролизер коаксиального типа. К качеству источника первичного преобразования энергии используется установка типа «ГАН» (генератор асинхронных напряжений), а в качестве инструмента воздействия на среду – система рабочих электродов, связанных с источником посредством импульсного трансформатора, первичная обмотка которого подключена к установке ГАН.

Режим ЭИК – 3 импульса с энергоемкостью не более $0,05 \text{ кВт} \cdot \text{ч/м}^3$ каждый. Параметры ЭИК – импульсное напряжение между электродами $10\text{--}40 \text{ кВ}$, длительность импульса – 150 мкс . Концентрат после электрофизической обработки дообогатился на магнитном анализаторе.

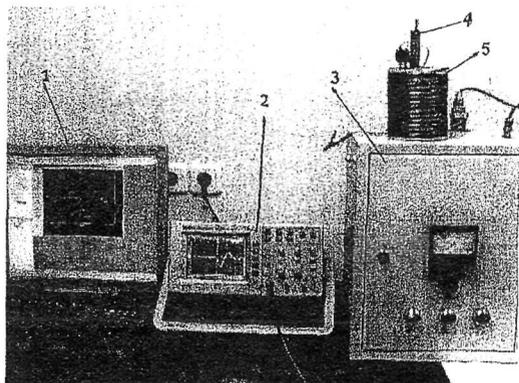


Рис.12. Лабораторный стенд для ЭИК пыли:
1 – персональный компьютер, 2 – цифровой осциллограф, 3 – установка ГАН-1, 4 – первичная обмотка (индуктор), 5 – электролизер коаксиального типа

Экспериментальная оценка влияния импульсных электрофизических воздействий на электрический потенциал поверхности частиц железосодержащего материала была проведена на основе определений изменения количества сорбированной воды на поверхности частиц в контрольных пробах и подвергнутых электрофизическим воздействиям. Определение количества сорбированной воды проводилось по двум методикам. Первая методика определения количества сорбированной воды по влагоемкости контрольной пробы материала и подвергнутой электрофизическим воздействиям.

Вторая методика основана на определении потери массы образца при его выпаривании. Частицы исследуемого образца материала, находящиеся в водной среде, имеют на своей поверхности адсорбированный слой воды (рис.13).

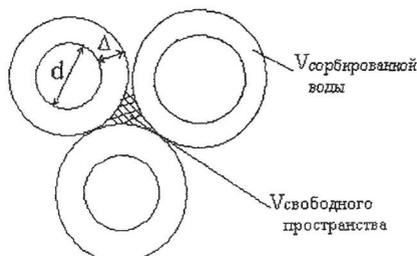


Рис.13. Схематическое изображение частиц в водной среде

Выражение для определения массы воды, сорбировавшейся на поверхности частиц и образующей ДЭС, имеет вид:

$$m_{\text{воды сорб.}} = m_{\text{воды}\Sigma} - \rho_{\text{в}} \cdot V_{\text{св.прост}} \quad (16)$$

где $m_{\text{воды}\Sigma}$ – суммарная масса воды в образце до момента его вязкости, г;

$\rho_{\text{в}} \cdot V_{\text{св.прост}}$ – масса свободной воды, г;

$m_{\text{воды сорб.}}$ – масса сорбированной воды, г.

Толщина слоя воды, сорбировавшейся на одной частице, определяется из соотношения:

$$m_{\text{воды сорб.}} = \rho_{\text{воды}} \cdot \pi d^2 \cdot \Delta \quad (18)$$

где $\rho_{\text{воды}}$ – плотность воды, г/см³;

Объем свободного пространства можно определить по формуле:

$$\frac{V_{\text{св.прост}}}{V_{\Sigma}} = \frac{\rho_{\text{нас}}}{\rho_0} \quad (15)$$

где V_{Σ} – объем суммарный образца, м³;

$V_{\text{св.прост}}$ – объем свободного пространства в образце, м³;

$\rho_{\text{нас}}$ – насыпная плотность материала, г/см³;

ρ_0 – пикнометрическая плотность материала, г/см³.

d – размер частицы, м;

πd^2 – площадь поверхности частицы, м²;

Δ – толщина двойного электрического слоя, м.

После преобразований выразим отношение толщины двойного электрического слоя относительно размера частицы:

$$\frac{\Delta}{d} = \frac{1}{6} \left[\frac{m_{\text{воды}\Sigma}}{\rho_{\text{воды}}} \cdot \frac{\rho_0}{m_{\text{те}}} - \frac{\rho_0}{\rho_{\text{нас}}} + 1 \right], \quad (19)$$

где $m_{\text{тв}}$ – масса частиц в образце, г.

Для проведения эксперимента по определению влагоемкости порошкового материала до и после электрофизических воздействий использовали слив гидrocиклона заключительной стадии классификации ОФ ОАО «Михайловский ГОК». В процессе проведения эксперимента контролировался расход воды, необходимый для смачивания материала (табл. 2, столбцы 5,6).

Анализ результатов определения влагоемкости материала до и после электрофизических воздействий (табл. 1) показал, что имеет место снижение массы сорбированной на поверхности частиц воды в пробах, подвергнутых обработке, относительно контрольных проб примерно в 2 раза. В процессе сушки контролировались потеря веса образцов при различной температуре и продолжительности пребывания материала в сушильном шкафу (табл. 2, столбцы 7-11).

Проанализировав полученные результаты экспериментальных исследований, нашли значения массы остаточной воды в исследуемых образцах до и после электрофизических воздействий. Среднее значение воды, оставшееся после сушки в образцах без обработки, практически в 2 раза превышает оставшуюся воду в образцах, подвергнутых электрофизическим воздействиям, что может быть обусловлено изменением поверхностных свойств минеральных частиц в процессе электрофизической обработки и изменением потенциала поверхности.

Четвертая глава посвящена определению оптимальных параметров дефлокуляция магнетитового концентрата перед мокрой магнитной сепарацией в процессе лабораторных испытаний.

Селективность флокуляции определяется изменением свойств поверхности взаимодействующих частиц за счет повышения энергетического барьера отталкивания железорудных минералов и кварца. Последнее при кондиционировании выявлено в работах акад. В.А. Чантурия как измерениями изменений электрокинетического потенциала, так и исследованиями изменения поверхности минералов на сканирующем микроскопе.

Для обеспечения дефлокуляции могут потребоваться большие значения параметров электрического поля, поэтому генерацию его целесообразно производить в импульсном режиме. Это приведет к снижению энергоемкости обработки пульпы. Предлагаемый метод электроимпульсного кондиционирования пульпы основан на использовании разрядно-импульсной технологии (РИТ). Сущность метода заключается в том, что вокруг зоны импульсного электрического разряда внутри объема жидкости, находящейся в открытом или закрытом сосуде, возникает ситуация электрического пробоя на ранней стадии, с образованием газоплазменного потока. Для обеспечения низкой энергоемкости процесса необходимо, чтобы используемое оборудование обеспечивало только раннюю стадию

электропробоя, что обеспечивается генерацией достаточно малых во времени ($10^{-3} - 10^{-6}$ с) электрических импульсов. Частота следования импульсов электромагнитного поля до 50 Гц.

С целью выбора режима дефлокуляции были проведены лабораторные испытания методики дефлокуляции на железорудном материале совместно с сотрудниками ОАО «Михайловский ГОК». В процессе лабораторных испытаний рассматривались различные режимы электроимпульсного кондиционирования суспензии (ЭИК).

Результаты минералогического анализа проб после обогащения на магнитном анализаторе без дополнительной обработки и при различных режимах обработки (рис.14 и 15) показали, что содержание свободных нерудных зерен в концентрате снижается, но при этом наблюдается некоторое снижение содержания рудной фазы. Это происходит за счет того, что, по-видимому, разрушаются и магнитные флокулы, что приводит к потерям $Fe_{общ}$ в хвостах, что возможно из-за вывода рудной фазы в процессе обогащения.

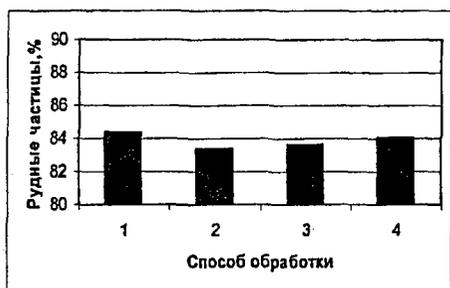


Рис. 14. Содержание раскрытых рудных частиц в концентрате магнитной сепарации в зависимости от способа воздействия:

1 – без обработки, 2 – ЭИК (напряженность эл. поля - $0,5 \cdot 10^6$ В/м), 3 – ЭИК (напряженность эл. поля - 10^6 В/м), 4 – ЭИК (напряженность эл. поля - $4 \cdot 10^6$ В/м)

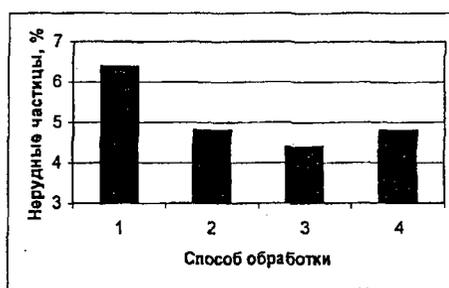


Рис. 15. Содержание раскрытых нерудных частиц в концентрате магнитной сепарации в зависимости от способа воздействия:

1 – без обработки, 2 – ЭИК (напряженность эл. поля - $0,5 \cdot 10^6$ В/м), 3 – ЭИК (напряженность эл. поля - 10^6 В/м), 4 – ЭИК (напряженность эл. поля - $4 \cdot 10^6$ В/м)

Как показали результаты лабораторных испытаний, воздействие импульсных электрических полей при напряженности электрического поля 10^6 В/м дает лучший результат с точки зрения устранения нерудных частиц из концентрата при сохранении содержания рудных. Было установлено повышение качества концентрата на 0,3 % без потери его выхода.

Таблица 1

Сравнительные данные по определению сорбированной воды в результате эксперимента по смачиваемости

№ пробы	Режим обработки	$\rho_{нас}$, г/см ³	ρ_0 , г/см ³	$\left(\frac{\rho_{воды}}{\rho_{нас}} - \frac{\rho_{воды}}{\rho_0}\right)$	$\frac{m_{воды}}{m_{матла}}$	$\frac{m_{сорб}}{m_{те}}$	$\frac{m_{сорб}}{m_{те}} \cdot 100\%$ сред., %	$\frac{\Delta}{d_{ср}}$
1.	Контроль	2,5	3,5	0,12	0,192	0,072	7,1±0,2	0,068
2.					0,188	0,068		
3.					0,192	0,072		
4.					0,192	0,072		
5.	МИО ГАН 1	2,65	4,3	0,144	0,184	0,040	4,1±0,2	0,087
6.					0,188	0,044		
7.					0,184	0,040		
8.					0,184	0,040		

Таблица 2

Результаты эксперимента по определению физически связанной воды по выпариванию

№ пробы	Режим обработки	Масса тары, г.	Масса мат-ла, г.	Масса воды для смачивания, г.	$\frac{m_{воды}}{m_{матла}}$	Масса образца в процессе сушки				Потери воды после сушки, г.	Масса воды в образце после сушки δ , г.	$\delta_{ср}$, г.	$\frac{\delta_{ср}}{m_{те}}$	$\frac{\delta_{ср}}{m_{те}} \cdot 100\%$ сред., %	
						Исх. масса образца, г.	20°C 12 ч.	60°C 60мин	60°C 120мин						240°C 180мин
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	Контроль пробы	56,94	25	4,8	0,192	86,01	82,24	82,06	82,03	82,02	3,99	0,81	0,605	0,032	2,4±0,4
2		66,5	25	4,7	0,188	95,54	88,46	91,52	91,51	91,49	4,05	0,65		0,026	
3		83,18	25	4,8	0,192	112,54	108,96	108,33	108,32	108,29	4,25	0,55		0,022	
4		68,03	25	4,8	0,192	97,51	94,33	93,26	93,15	93,14	4,37	0,43		0,017	
5	МИО ГАН 1	82,14	25	4,6	0,184	111,41	108,32	107,31	107,27	107,25	4,16	0,44	0,335	0,018	1,3±0,4
6		62,83	25	4,7	0,188	92,00	88,16	87,74	87,74	87,74	4,26	0,44		0,018	
7		66,96	25	4,6	0,184	96,43	92,40	92,07	92,06	92,07	4,36	0,24		0,010	
8		84,99	25	4,6	0,184	114,49	111,06	110,14	110,12	110,11	4,38	0,22		0,009	

Результаты лабораторных испытаний электроимпульсного кондиционирования магнетитового концентрата

Воздействие	Содержание в к-те раскрытых рудных частиц	Содержание в к-те раскрытых нерудных частиц
Без обработки	84,3±0,1 %	6,3±0,1 %
С обработкой	83,6±0,1 %	4,5±0,1 %

Статистическая обработка результатов проведенных экспериментов показала, что доверительный интервал при $\alpha = 0,95$ (где α - доверительная вероятность) равен $\Delta X=0,1$.

Таким образом, предлагаемый способ дефлокуляции магнетитового концентрата, апробированный в лабораторных условиях ЦГЛ ОАО «Михайловский ГОК», позволяет вывести из процесса часть раскрытых нерудных зерен. Однако применение предлагаемого способа в технологическом процессе может оказаться недостаточно эффективным и потребует дополнительной корректировки режимов работы другого оборудования. Из приведенных выше результатов видно некоторое снижение содержания рудных зерен в концентрате, чего, вероятно, можно избежать при отработке режима магнитной сепарации.

В пятой главе приведены оценочные расчеты технико-экономических показателей при внедрении полученных результатов.

По статистическим данным, предоставленным ОАО «Михайловский ГОК», были проанализированы изменения содержания $Fe_{общ}$ в концентрате, получаемом на третьей технологической линии ОАО «Михайловский ГОК», при изменении исходной нагрузки. Анализ данных позволяет сделать вывод, что среднее увеличение исходной нагрузки на технологическую линию на 15 т/ч приведет к снижению качества концентрата на 0,34 % (рис. 16).

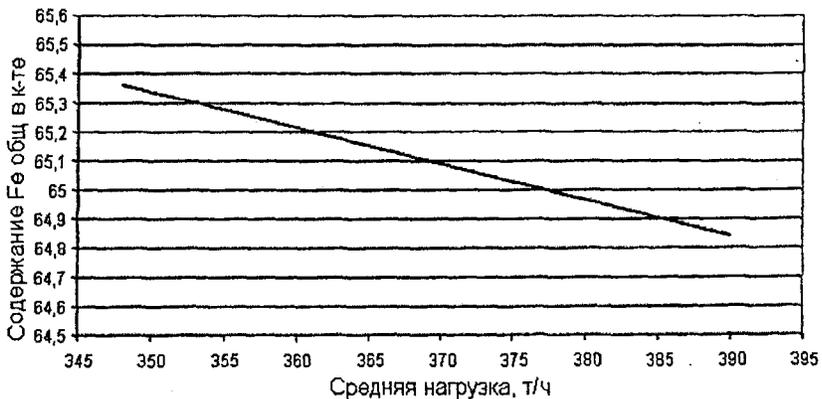


Рис.16. Зависимость содержания $Fe_{общ}$ в концентрате от нагрузки, подаваемой на третью технологическую линию ОФ МГОК

В результате проведенных испытаний подтверждается возможность повышения содержания $Fe_{общ}$ в рядовом концентрате на 0,3 % при неизменном выходе концен-

трата, что создает возможность увеличения объемов производства рядового концентрата на 2-3 % без ухудшения его качества.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано новое решение актуальной задачи повышения качества магнетитового концентрата на основе разработки метода электроимпульсной дефлокуляции железорудной пульпы, обеспечивающего удаление из него породообразующих минералов.

Основные выводы по работе, полученные лично автором:

1. Установлен механизм и предложена модель электростатического взаимодействия частиц рудной и нерудной фаз магнетитовой суспензии, позволяющие определить силу взаимодействия, обусловленную произведением суммарного заряда каждой частицы, величина и знак которого зависят от степени дефектности и поляризации материала концентрата во внешнем электрическом поле.

2. На основе модели электростатического взаимодействия частиц установлена зависимость параболического характера влияния величины амплитуды напряженности импульсного электрического поля на силу взаимодействия частиц, что позволило найти оптимальный диапазон напряженности электрического поля, при котором преобладают силы отталкивания.

3. Показано, что силы отталкивания, возникающие между частицами кварца и магнетита, зависят от плотности дислокаций (т.е. величины остаточных деформаций минералов), диэлектрических свойств, размера частиц, а также от величины напряженности импульсного электрического поля, при этом увеличение плотности дислокаций требует больших значений напряженности электрического поля для обработки материала. Установлен диапазон технологически обоснованных значений $(0,1 \div 1,8) \cdot 10^7$ В/м величины напряженности импульсного электрического поля, при котором обеспечивается процесс эффективной дефлокуляции частиц пульпы.

4. Построена динамическая модель взаимодействия рудных и нерудных частиц в пульпе, позволившая получить зависимости необходимых для дефлокуляции частиц напряженности электрического поля и длительности импульса от значения электрического потенциала поверхности частиц. Причем с увеличением электрического потенциала необходимая напряженность электрического поля увеличивается прямо пропорционально, а длительность импульса имеет максимальное значение при $\varphi=0,027$ В для магнетита и $\varphi=0,27$ В для кварца.

5. Экспериментальные исследования влияния электроимпульсной обработки на частицы магнетитового концентрата позволили установить, что среднее значение количества воды, оставшейся после сушки при 240°C (физически связанная вода) в образцах без обработки, в 2 раза превышает количество оставшейся воды в образцах после электроимпульсного воздействия, что подтверждает изменение электрического состояния частиц.

6. В процессе проведения испытаний установлено, что ЭИК способствует снижению содержания нерудной фазы в получаемом концентрате с 6,5 % до 4,5 %. Результаты проведенных лабораторных испытаний подтверждают возможность повышения содержания $\text{Fe}_{\text{общ}}$ в рядовом концентрате на 0,3 %, что создает возможность увеличения объемов производства рядового концентрата на 2-3 % без ухудшения его качества.

Основное содержание работы отражено в следующих публикациях:

1. Липная Е.Н., Ананьев П.П. Электростатическое взаимодействие частиц магнетитового концентрата в электрическом поле // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2009. - №5. - С.237-244.

2. Липная Е.Н. Анализ влияния электростатического взаимодействия частиц на процесс флокуляции магнетитового концентрата // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2009. - №7. - С.345-349.

3. Липная Е.Н., Наумов К.И., Ананьев П.П., Потапов С.А. Физико-технические основы проектирования оборудования для электроимпульсного кондиционирования магнетитовых концентратов // Горное оборудование и электромеханика, 2010. - №2, - С 36-38.

4. Липная Е.Н. Взаимодействие частиц магнетита и кварца в пульпе под воздействием электрического поля // Материалы 5 Международной научной школы молодых ученых и специалистов. 11-14 ноября 2008 г. - М.: УРАН ИПКОН РАН, 2008. - С.263-266.

5. Ананьев П.П., Гончаров С.А., Двойченкова Г.П., Иванов В.Ю., Лесков С.Ф., Липная Е.Н., Наумов К.И., Потапов С.А., Чантурия В.А., Чантурия Е.Л. Заявка на изобретение «Способ диспергирования материала кристаллической структуры и устройство для его осуществления» (№2008149606/03 от 17.04.2008г.).

Подписано в печать 23.03.2010г. Формат 90х60/16.

Объем 1 п.л.

Тираж 100 экз. Заказ № 451

Отдел печати МГТУ, Москва, Ленинский пр-т, 6