

На правах рукописи

СЫСА Павел Анатольевич

**ПОВЫШЕНИЕ СЕЛЕКТИВНОСТИ ОБОГАЩЕНИЯ
МАГNETИТОВЫХ КВАРЦИТОВ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ
ВЫСОКОГРАДИЕНТНОГО СЕПАРАТОРА С
НИЗКОИНТЕНСИВНЫМ ПЕРЕМЕННЫМ МАГНИТНЫМ
ПОЛЕМ**

Специальность 25.00.13. «Обогащение полезных ископаемых»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2016

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО НИТУ МИСиС, кафедра ОПИ ФГБОУ ВПО «Московский государственный горный университет».

Научный руководитель

Кармазин Виктор Витальевич, доктор технических наук, профессор кафедры ОПИ ФГБОУ ВПО «Московский государственный горный университет».

Официальные оппоненты:

Солоденко Александр Борисович, доктор технических наук, профессор кафедры обогащения полезных ископаемых Северо-кавказского горно-металлургического института (Государственного Технологического Университета).

Андреев Виталий Геннадиевич, кандидат технических наук, инженер-технолог ООО «ПРО Евразия».

Ведущая организация - ФГУП Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья, г. Москва.

Защита диссертации состоится 21 февраля 2017 г. в 12 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.074.01 при Институте проблем комплексного освоения недр РАН по адресу: 119991, Москва, Крюков тупик, 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института проблем комплексного освоения недр РАН и на сайте www.ipkonran.ru

Автореферат разослан «_____» декабря 2016 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

доктор технических наук



Матвеева Т.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Применение технологий производства железа прямого восстановления считается одним из самых перспективных направлений развития мировой металлургии. В настоящее время технологии бездоменной металлургии во всех регионах мира развиваются быстрыми темпами - за последние 10 лет производство железа прямого восстановления возросло более чем на 60%.

Эта тенденция стимулируется следующими причинами:

- растут требования к качеству стали;
- кокс и коксующиеся угли все более труднодоступны, при этом есть огромные запасы природного газа и относительно дешевая электроэнергия;
- основное количество серы и фосфора попадает в чугуны при доменном переделе и ухудшает качество стали.

Главным сдерживающим фактором для развития бездоменной металлургии является ограниченность ее сырьевой базы вследствие жестких требований к содержанию кремнезема в концентрате, которое должно быть не более 3-3,5%. В РФ этим требованиям соответствуют только железорудные суперконцентраты Лебединского и Оленегорского ГОКов.

В связи с этим представляется актуальной задача создания новых процессов и аппаратов, обеспечивающих повышение качества магнетитовых концентратов, получаемых по схемам магнитного обогащения.

Диссертационная работа посвящена решению задачи повышения селективности магнитной сепарации сильномагнитных руд на основе предложенного автором нового процесса высокоградиентной магнитной сепарации в переменном магнитном поле с низкой напряженностью при производстве суперконцентратов для бездоменной металлургии.

Целью работы является исследование предложенного автором нового процесса высокоградиентной магнитной сепарации в переменном магнитном поле с низкой напряженностью при производстве суперконцентратов для бездоменной металлургии и разработка аппаратов и технологии для производства суперконцентратов с содержанием общего железа ($Fe_{\text{общ.}}$) 69% и выше.

Идея работы. Повышение селективности обогащения магнетитовых кварцитов на основе применения высокоградиентного сепаратора с низкоинтенсивным переменным магнитным полем для получения высококачественных концентратов по схемам магнитного обогащения

железорудных ГОКов.

Задачи исследований:

- анализ работающих технологических схем обогащения железорудных ГОКов и применяемых на них современных обогатительных процессов и аппаратов;

- теоретический анализ основных закономерностей высокоградиентной сепарации в низкоинтенсивном переменном магнитном поле (ВГСНПМП) с целью выявления параметров, оказывающих влияние на селективность разделения сильномагнитных концентратов;

- разработка математической модели нового процесса ВГСНПМП, объективно отражающей закономерности разделения магнитных частиц при его использовании, позволяющей определить основные конструктивные и технологические параметры сепаратора ВГСНПМП;

- разработка устройств для стендовых и лабораторных испытаний метода высокоградиентной магнитной сепарации в переменном магнитном поле при разделении сильномагнитных минералов;

- определение основных конструктивно-технологических параметров сепаратора ВГСНПМП непрерывного действия и выдача предложений и рекомендаций по его использованию в технологических схемах для получения высококачественных магнетитовых концентратов, соответствующих требованиям к сырью для бездоменной металлургии.

Методы исследований:

- магнитные, химические, гравитационные методы анализа исходных материалов и продуктов разделения;

- моделирование процесса сепарации в лабораторных условиях;

- теоретический анализ конструктивно-технологических параметров процесса ВГСНПМП на основе его математической модели;

- анализ результатов, полученных в ходе лабораторных испытаний с использованием компьютерной обработки в современных программах Statistica, Ansys и др.

В экспериментах использовались специальные и стандартные измерительные устройства и приборы.

Научная новизна работы.

1. Установлен механизм повышения селективности магнитной сепарации, возникающий в высокоградиентной среде в результате воздействия переменного магнитного поля низкой интенсивности, заключающийся во вращательном и поступательном движении магнитных частиц разделяемой смеси в местах

высокого градиента магнитного поля. Этот эффект обусловлен тем, что в результате наличия гистерезиса перемагничивания у частиц магнетита, в момент изменения полярности поля извлекающая магнитная сила кратковременно принимает противоположное направление. Впервые для предотвращения флокуляции с целью повышения качества магнетитового концентрата применено переменное магнитное поле частотой 50 Гц и напряженностью не выше 20 кА/м в сочетании с высокоградиентной извлекающей матрицей.

2. Разработана математическая модель, описывающая новый процесс высокоградиентной сепарации в низкоинтенсивном переменном магнитном поле (ВГСНПП), включающая системы уравнений, отображающих зависимости технологических параметров процесса ВГСНПП, его граничные условия и учитывающая функции распределения частиц по величине удельной магнитной восприимчивости (содержания $Fe_{общ}$) в исходном питании. Получены сепарационные характеристики и зависимости основных показателей обогащения от влияния параметров поля.

3. Впервые изучено теоретически и практически проверено воздействие переменного магнитного поля на работу матриц различной конфигурации (шаровых и цилиндрических), в результате чего установлено, что лучшее качество магнетитового концентрата достигается при применении шаровой матрицы, что позволяет достичь содержания $69\% Fe_{общ}$ и выше при помощи магнитного метода сепарации. Выявлено, что оптимальным значением напряженности переменного поля является 9-15 кА/м.

Основные защищаемые положения:

1. Разработан новый процесс высокоградиентной сепарации в низкоинтенсивном переменном магнитном поле (ВГСНПП), отличающийся применением высокоградиентных осадительных матриц, находящихся в переменном магнитном поле (частота 50 Гц) малой напряженности (до 20 кА/м); установлен рабочий диапазон его основных технологических параметров; выявлен механизм удаления богатых сростков из слоя магнетитового концентрата, заключающийся в повышении подвижности осажденного слоя концентрата вследствие переориентации вектора извлекающей магнитной силы в момент смены полярности поля, также в результате использования гистерезиса перемагничивания магнетита, обеспечивающих высокоселективное разделение сильномагнитных материалов.

2. Создана математическая модель, описывающая новый процесс высокоградиентной магнитной сепарации в слабом переменном магнитном поле (ВГСНПП), включающая систему уравнений, описывающих зависимости

технологических параметров процесса ВГСНПМП и его граничные условия, на основе которой получены зависимости показателей обогащения от параметров поля, подтвержденные экспериментальными данными. Модель позволяет рассчитать напряженность магнитного поля, его градиент, скорость подачи пульпы и установить эффективные параметры обогащения для процесса ВГСНПМП;

3. Создан непрерывно действующий экспериментальный сепаратор ВГСНПМП, включающий электромагнитную систему, кольцевую высокоградиентную осадительную матрицу с большой осадительной поверхностью и небольшой глубиной зоны захвата, необходимой для удерживания частиц с наиболее высокой магнитной проницаемостью, а также привод и устройства загрузки и выгрузки продуктов обогащения; который позволяет при доводке рядового магнетитового концентрата получить суперконцентрат, содержащий более 69% $Fe_{общ}$ при производительности по исходному питанию не менее 10 кг/ч.

Практическая значимость работы заключается в определении технологических параметров сепаратора ВГСНПМП, разработке технологического процесса, основанного на применении сепаратора ВГСНПМП, позволяющего доводить магнетитовые концентраты до содержания $Fe_{общ}$ 69% и выше по магнитной схеме без использования флотационной доводки, который может быть рекомендован для внедрения на Михайловском ГОКе. Получено положительное решение Федеральной службы по интеллектуальной собственности о выдаче патента по заявке №2014114166/03(022119) на авторские права по процессу ВГСНПМП.

Личный вклад автора состоит в постановке проблемы, анализе современного состояния производства высококачественных магнетитовых концентратов, формулировании задач исследования, установлении механизма гистерезисного взаимодействия материала с переменным полем, создании математической модели процесса ВГСНПМП и конструкции сепаратора ВГСНПМП, планировании и проведении экспериментов, обработке полученных результатов, формулировании выводов, рекомендаций, защищаемых положений и их доказательстве.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на симпозиуме «Неделя Горняка», Москва, МГГУ, 2013г.; на десятой всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Энергосбережение. Экология. Новые технологии», Старый Оскол, 2013г.; на симпозиуме «Неделя Горняка» Москва,

МГГУ, 2014г.; на симпозиуме «Неделя Горняка», Москва, МИСиС, 2015г.; на Конгрессе обогатителей стран СНГ, Москва, 2015г.

По теме диссертационной работы опубликовано 8 статей, в том числе 4 в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Объём и структура работы: Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, списка использованных источников из 120 наименований, 38 рисунков и 7 таблиц.

Автор выражает глубокую признательность доктору технических наук, профессору В.В. Кармазину за научное руководство при выполнении работы.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и идея работы, представлены объект, предмет, задачи и методы исследований, научные положения, раскрыта научная и практическая значимость полученных результатов исследований.

В первой главе проведен анализ современных методов, процессов и аппаратов обогащения магнетитовых кварцитов в России и за рубежом с целью выявления актуальных технологий, направленных на повышение качества железорудных концентратов до соответствия требованиям бездоменной металлургии.

Во второй главе рассмотрены исследования, направленные на снижение отрицательного влияния магнитной флокуляции на селективность процесса обогащения магнетитовых кварцитов за счет разрушения магнетитовых флокул или управления их образованием: обогащение во вращающихся магнитных полях, магнито-гравитационные методы. На основании проведенного анализа предложен новый процесс ВГСНПМП, который снижает отрицательное влияние магнитной флокуляции на качество магнитного концентрата.

В третьей главе представлен теоретический анализ нового процесса ВГСНПМП, рассмотрены закономерности разделения магнитных частиц в переменном поле низкой интенсивности, раскрыт механизм, подавления магнитной флокуляции в результате комплексного воздействия переменного магнитного поля на обогащаемый материал, обеспечивающий повышение качества концентрата. Разработана математическая модель процесса ВГСНПМП, учитывающая механизм удаления сrostков из концентрата.

Четвертая глава посвящена разработке непрерывно действующего экспериментального сепаратора ВГСНПМП, включающий выбор конструкции и

расчет основных параметров на основе алгоритма математической модели. Приведены результаты лабораторных исследований, подтверждающие теоретическую модель процесса высокоградиентной сепарации в слабом переменном магнитном поле. Предложена конструкция промышленного ВГСНПП-сепаратора.

В пятой главе предложена технологическая схема, включающая процесс ВГСНПП, позволяющая получить на действующих предприятиях концентраты, содержащие не менее 69% $Fe_{\text{общ}}$. Рассчитан экономический эффект.

В заключении изложены выводы и рекомендации по применению нового процесса ВГСНПП, полученные на основании представленных в настоящей работе теоретических и лабораторных исследований.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Разработан новый процесс высокоградиентной сепарации в низкоинтенсивном переменном магнитном поле (ВГСНПП), отличающийся применением высокоградиентных осадительных матриц, находящихся в переменном магнитном поле (частота 50 Гц) малой напряженности (до 20 кА/м); установлен рабочий диапазон его основных технологических параметров; выявлен механизм удаления богатых сростков из слоя магнетитового концентрата, заключающийся в повышении подвижности осажденного слоя концентрата вследствие переориентации вектора извлекающей магнитной силы в момент смены полярности поля, также в результате использования гистерезиса перемагничивания магнетита, обеспечивающих высокоселективное разделение сильномагнитных материалов.

Впервые в процессе сепарации сильномагнитных материалов применено переменное магнитное поле низкой интенсивности, которое оказывает разноплановое воздействие на все составляющие этого процесса.

В известных на сегодняшний день процессах обогащения магнетитовых кварцитов частицы притягиваются из объема пульпы к полюсу магнита и образуют неподвижный слой, остающийся таким до снятия магнитного поля и смыва. Случайно захваченные немагнитные частицы удерживаются в магнитном слое и попадают в концентрат, снижая его качество.

В магнитных сепараторах типа ПБМ напряженность магнитного поля, обеспечивающая необходимую величину магнитной силы, достигает 120 кА/м, а градиент напряженности 20-30 кА/м.

Зависимость степени флокуляции суспензии ψ от напряженности намагничивающего поля H показана на рисунке 1.

Из рисунка следует, что при напряженности магнитного поля свыше 5 кА/м частицы тонкозернистого магнетита начинают объединяться во флокулы, а при напряженности свыше 20 кА/м вся масса магнетита приобретает структуру, состоящую из прижатых друг к другу флокул. Внутри этих флокул защемляются частицы кварца и бедных сростков, что снижает качество магнитного продукта.

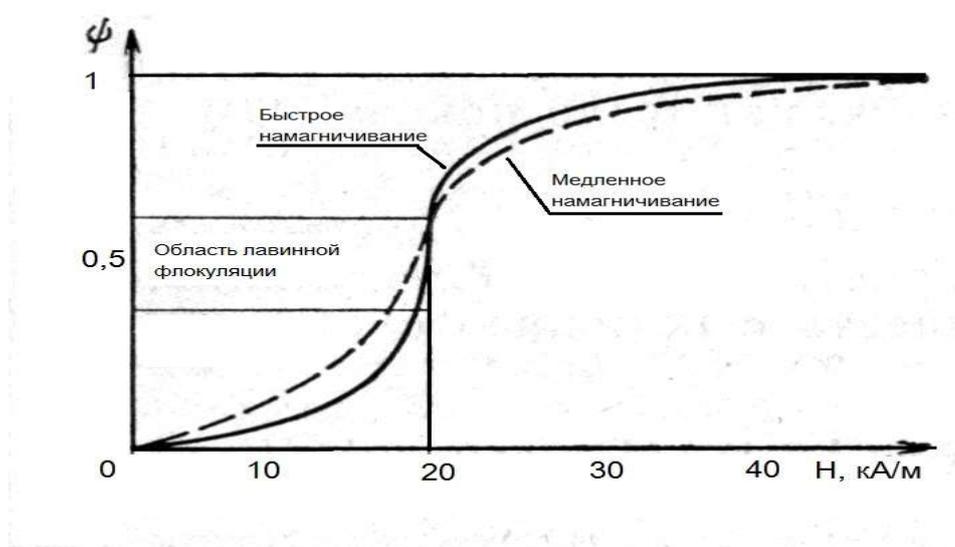


Рисунок 1 - Зависимость степени флокуляции частиц магнетита от напряженности магнитного поля

Притяжение частиц магнетита к извлекающей поверхности происходит под действием пондеромоторной магнитной силы, которая описывается уравнением

$$F = \mu_0 \chi_c m H \text{grad} H, \quad (1)$$

где: χ_c – магнитная восприимчивость частицы, кг⁻¹;

μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, Гн/м;

H – напряженность магнитного поля, А/м;

m – масса частицы;

$\text{grad} H$ – градиент напряженности магнитного поля, А/м².

Следовательно, необходимая магнитная сила может быть получена и в слабом магнитном поле, если градиент напряженности магнитного поля достаточно высок.

В процессе ВГСНПП необходимый уровень извлекающей магнитной силы достигается за счет высоких градиентов в узлах полиградиентной матрицы, уровень которой достигает значения $4 \cdot 10^8$ кА/м, что позволяет при напряженности 10-20 кА/м достигать необходимой величины магнитной силы для осаждения сильномагнитных частиц. Колебания переменного магнитного поля, вследствие наличия гистерезиса перемангничивания, приводят к вибрации осадительных поверхностей и осевшего на них концентрата, в результате чего увеличивается подвижность составляющих его частиц.

Например, сростки, находящиеся на поверхности слоя концентрата и контактирующие с ним магнетитовой частью, удерживаемые большими силами потокосцепления, переворачиваются при изменении направления поля (вследствие наличия гистерезиса перемангничивания) и, контактируя кварцевой стороной, удерживаются только пондеромоторной силой дальнего действия, которая значительно меньше, что ведет к их отрыву в хвосты и повышению качества концентрата. Происходит это следующим образом. Допустим, сросток был притянут к полюсу осадительной матрицы в течение положительного полупериода внешнего магнитного поля (рисунок 2, линия 0- $B_{нас}$). В начале следующего за ним отрицательного полупериода сросток из-за наличия

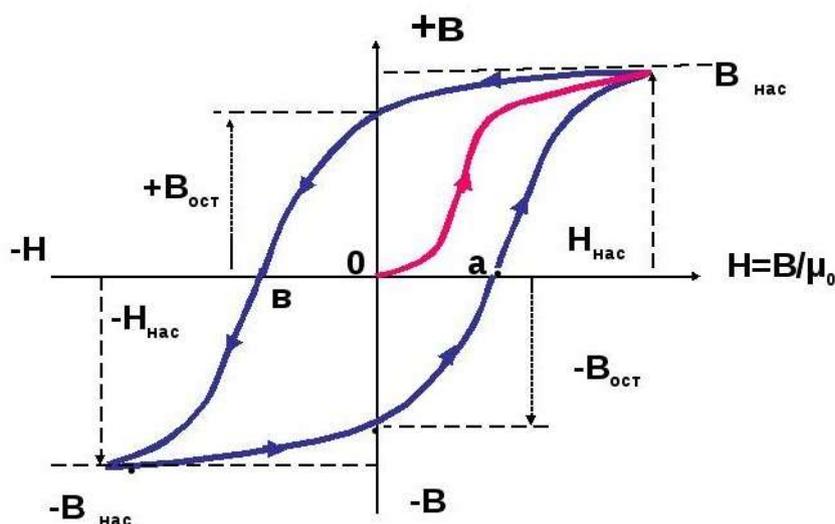


Рисунок 2 - График намагничивания ферромагнетика.

B – намагниченность, H – напряженность внешнего поля.

магнитной жесткости будет сохранять прежнее направление намагниченности $+B_{ост}$ и векторы намагниченности и внешнего магнитного

поля будут противопоставлены, а магнитная сила примет отрицательное значение (рисунок 3).

Вследствие воздействия магнитной силы и, не будучи удерживаемым какой – либо другой силой, например, силой трения, сросток повернется таким образом, чтобы скомпенсировать изменение внешнего поля. Далее его намагниченность усиливается той же отрицательной полуволной и процесс повторяется.

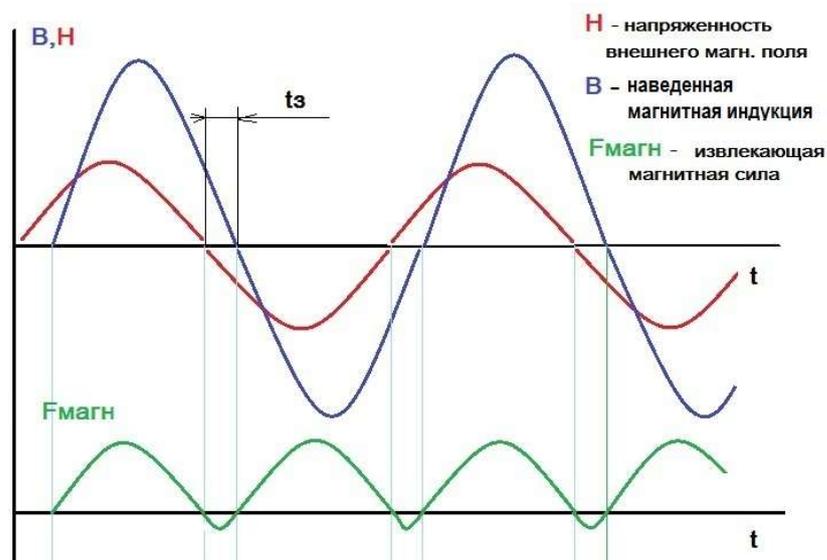
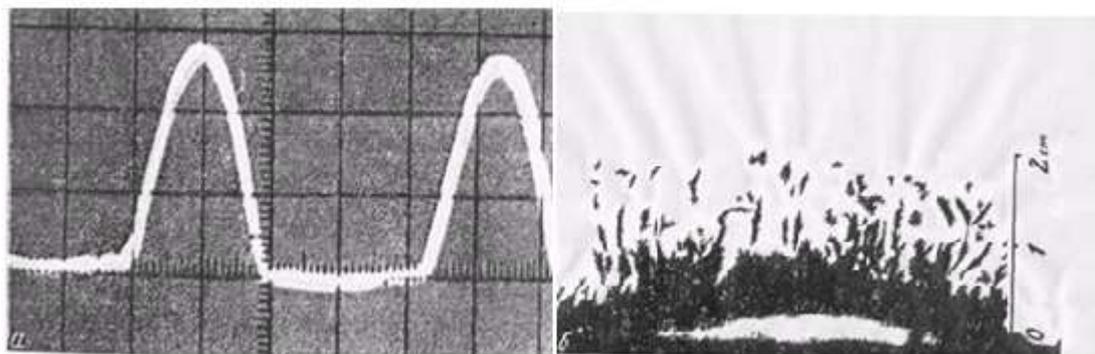


Рисунок 3 - Изменение извлекающей магнитной силы $F_{\text{магн}}$ и наведенной в частице магнетита магнитной индукции B в зависимости от фазы приложенного переменного поля.

Накопившийся на полюсе магнита слой концентрата, при изменении полярности магнитной системы кратковременно отталкивается и затем



притягивается вновь (рисунок 4).

Рисунок 4 - Выталкивание магнитных флокул переменным магнитным полем: а – осциллограмма поля; б – момент перемагничивания флокул.

Это объясняется тем, что частицы, составляющие слой концентрата, связаны между собой силами трения и потокосцепления, поэтому, вследствие гистерезиса перемагничивания, не могут совершить разворот в короткий промежуток времени. В итоге весь слой выступает как единое целое и получает импульс в начале отрицательной полуволны, отталкивающий его от полюса магнитной системы (рисунок 4). Частицы, составляющие накопленный слой, частично поворачиваются, частично перемагничиваются по кривой $B_{нас} - B$ (рисунок 2), и слой притягивается обратно. Далее процесс повторяется. Такое «дрожание» накопленного слоя способствует вытеснению из него частиц с меньшей магнитной восприимчивостью вследствие проявления магнитной Архимедовой силы и способствует повышению качества концентрата:

$$F_{ма} = \pm \mu_0 (\chi_ч - \chi_{ср}) m H \text{grad} H, \quad (2)$$

где: $\chi_ч$ - удельная магнитная восприимчивость частицы, кг^{-1} ;

$\chi_{ср}$ - удельная магнитная восприимчивость среды, кг^{-1} ;

Извлекающая магнитная сила будет равна разности её положительной и отрицательной полуволн. Из этого следует, что с увеличением частоты внешнего магнитного поля извлекающая магнитная сила будет уменьшаться, т.к. время перемагничивания магнетита в конкретных условиях величина постоянная и соотношение полупериодов с увеличением частоты будет выравниваться.

Поэтому расчет сил для дальнейшего анализа разрабатываемого процесса можно вести аналогично расчету сил в постоянном поле, учитывая, что

$$F_M = z F_{max}, \quad (3)$$

где F_M – магнитная сила в переменном магнитном поле, Н;

z – коэффициент, учитывающий снижение магнитной силы из-за взаимодействия с переменным магнитным полем, д.е.;

$F_{ма}$ – амплитудное значение магнитной силы, Н.

2. Создана математическая модель, описывающая новый процесс высокоградиентной магнитной сепарации в слабом переменном магнитном поле (ВГСНМП), включающая систему уравнений, описывающих зависимости технологических параметров процесса ВГСНМП и его граничные условия, на основе которой получены зависимости показателей обогащения от параметров поля, подтвержденные экспериментальными данными. Модель позволяет рассчитать напряженность магнитного поля, его градиент, скорость подачи пульпы и установить эффективные параметры обогащения для процесса ВГСНМП.

Движение материала в силовом поле описывает уравнение Эйнштейна-Фоккера-Планка:

$$dC_m / dt = \frac{K_m}{\alpha_1 + \alpha_2} \frac{\partial^2 C_m}{\partial t} - \frac{R_{mex}}{\alpha_1 + \alpha_2} \frac{\partial C_m}{\partial t} \quad (4)$$

где: α_1 - коэффициент сопротивления столкновений частиц, кг/с,
 α_2 - коэффициент сопротивления среды, зависящий от размеров частиц и вязкости среды, кг/с.

C_m - концентрация частиц, кг/м³;

t - время, с;

R_{mex} - сумма механических сил, Н;

K_m - K_m - коэффициент подвижности частиц, пропорциональный средней кинетической энергии их хаотического движения.

Если выразить R_{mex} через другие величины:

$$R_{mex} = (\chi_{ч} - \chi_{сп}) H \frac{\partial H}{\partial x} \sin(\omega t) - (\alpha_1 - \alpha_2) v, \quad (5)$$

где: $\chi_{ч}$ - магнитная проницаемость частиц, кг⁻¹;

$\chi_{сп}$ - магнитная проницаемость среды, кг⁻¹;

ω - частота магнитного поля, с⁻¹.

Тогда уравнение (4) примет вид:

$$dC_m / dt = \frac{K_m}{\alpha_1 + \alpha_2} \frac{\partial^2 C_m}{\partial t} - \left[\frac{\chi_m - \chi_{сп}}{\alpha_1 - \alpha_2} H \frac{\partial H}{\partial x} \sin(\omega t) - v \right] \frac{\partial C_m}{\partial t}, \quad (6)$$

α_1 существенно преобладает в зоне наибольших градиентов, а α_2 - в свободной части канала, причем в переменном поле α_1 больше зависит от вибраций, чем α_2 .

В сочетании с краевыми (начальными и граничными) условиями:

$$C_m(0, r) = \delta(r - 0), \quad (7)$$

$$\int_0^r C(t, x) dx = 1 \quad (8)$$

$$C_m(t, x)|_{x \rightarrow +\infty} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{dC(t, x)}{dx} |_{x \rightarrow +\infty} = 0 \quad (10)$$

уравнение Эйнштейна-Фоккера-Планка (6) является математической моделью процесса высокоградиентной сепарации.

При выводе уравнения Эйнштейна-Фоккера-Планка использовалась линейная зависимость силы сопротивления среды от скорости движения частиц (закон Стокса), что справедливо при ламинарном режиме движения, но не

корректно для описания турбулентного массопереноса. Для компенсации этого противоречия было использовано общее решение этого уравнения через интеграл вероятности, предложенное О. Н. Тихоновым. В случае разделения частиц с удельной магнитной восприимчивостью χ в магнитном поле это решение имеет вид:

$$\varepsilon_m(\chi) = 0,5 + 0,5\Phi\left[\sqrt{A\gamma_{исх}}(\chi - \bar{\chi}_c)\right], \quad (11)$$

где ε_m – извлечение магнитной фракции, д.е;

Φ - интеграл вероятности;

$$A = (\alpha D)^{-1}ha,$$

где α – коэффициент сопротивления среды,

D - коэффициент диффузии зерен,

h – толщина (глубина) постели, м;

$$\alpha = HgradH, \text{ А}^2/\text{м}^3;$$

χ и $\bar{\chi}_c$ - удельные магнитные восприимчивости

соответственно частиц и среды в зоне разделения, кг^{-1} ;

$\gamma_{исх}(\chi)$ - функция распределения частиц по величине удельной магнитной восприимчивости в исходном продукте, д.е

Формула (11) является сепарационной характеристикой, отражающей вероятность извлечения сепаратором магнитных фракций исходного продукта в концентрат.

Следовательно, прогнозирование технологических показателей обогащения можно производить по формулам:

$$\begin{cases} \bar{\gamma}_{кон} = \int_0^{\infty} \varepsilon_m(\chi)\gamma_{исх}(\chi)d\chi; \\ \bar{\gamma}_{хв} = 1 - \bar{\gamma}_{кон}. \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \bar{\beta}_{кон} = \frac{1}{\gamma_{кон}} \int_0^{\infty} \beta_{исх}(\chi)\varepsilon_m(\chi)\gamma_{исх}(\chi)d\chi; \\ \bar{\beta}_{хв} = \frac{1}{\gamma_{хв}} \int_0^{\infty} \beta_{исх}(\chi)[1 - \varepsilon_m(\chi)]\gamma_{исх}(\chi)d\chi. \end{cases} \quad (13)$$

При разработке конкретной технологии обогащения удобнее пользоваться сепарационными характеристиками $\varepsilon(\beta)$, отражающими содержание полезного компонента в продуктах обогащения.

Для определения сепарационной характеристики $\varepsilon(\beta)$ сепаратора ВГСНПМП на руде известного состава ($\gamma_{исх}(\beta)$) автором предложена формула:

$$\varepsilon(\beta) = 0,5 + 1/(k(2\pi)^{0,5}) \int_0^{\beta} \exp(-(\beta - \beta_p)^2/2k^2) \quad (14)$$

где $\beta_p = f(H, \omega)$ – содержание Feобщ в точке разделения, ед.;

ω – частота магнитного поля, c^{-1} ;

$k = f(A, H)$ – коэффициент, зависящий от характера среды конкретного сепаратора и напряженности магнитного поля в рабочем зазоре, ед.

При помощи данной модели были построены сепарационные характеристики сепаратора ВГСНПМП (рисунок 5).

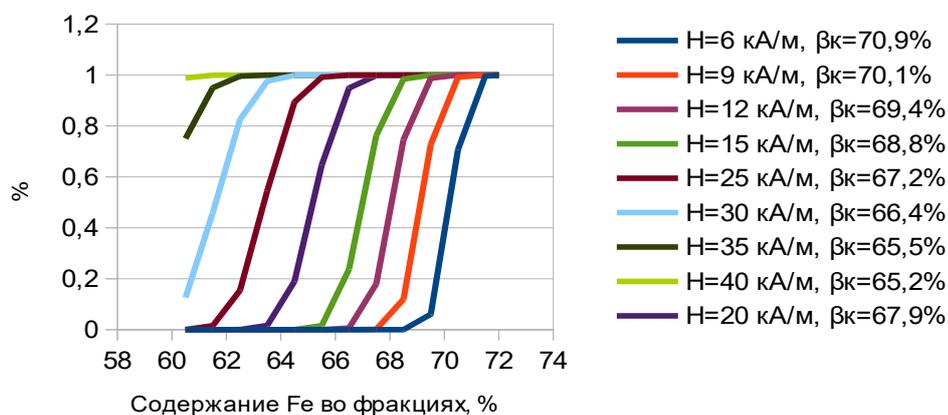


Рисунок 5 - Сепарационные характеристики процесса ВГСНПМП.

Математическая модель позволяет выбрать оптимальные технологические показатели обогащения и оптимальный технологический режим процесса (рисунок 6).

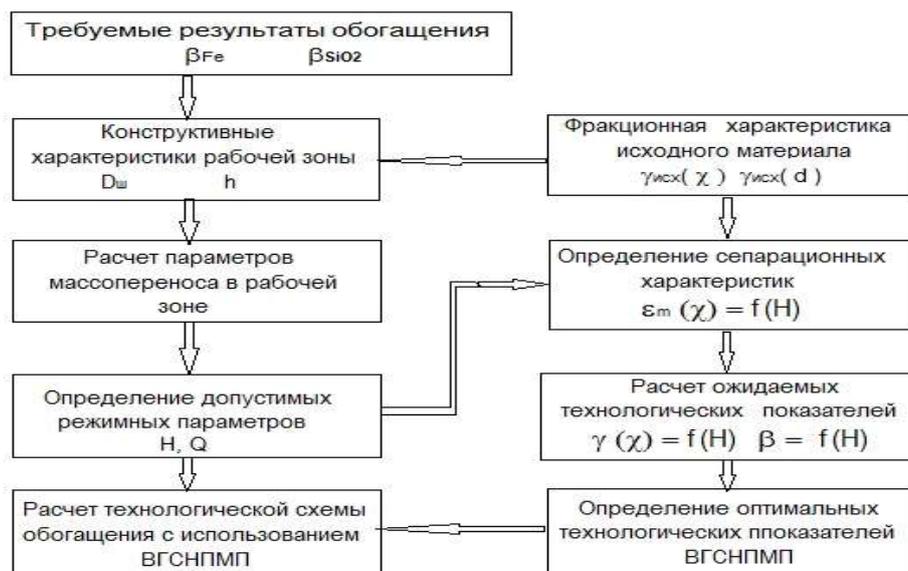


Рисунок 6 - Алгоритм моделирования конструктивных и технологических параметров процесса разделения магнитных минералов в сепараторе ВГСНППМ

Расчеты, проведенные на основании математической модели процесса ВГСНППМ, позволили создать конструкцию непрерывно действующего ВГСНППМ-сепаратора.

3. Создан непрерывно действующий экспериментальный сепаратор ВГСНППМ, включающий электромагнитную систему, кольцевую высокоградиентную осадительную матрицу с большой осадительной поверхностью и небольшой глубиной зоны захвата, необходимой для удерживания частиц с наиболее высокой магнитной проницаемостью, а также привод и устройства загрузки и выгрузки продуктов обогащения; который позволяет при доводке рядового магнетитового концентрата получить суперконцентрат, содержащий более 69% Fe_{общ} при производительности по исходному питанию не менее 10 кг/ч.

В ходе исследований было разработано три конструкции сепаратора ВГСНППМ: стендовый периодического действия, экспериментальный непрерывного действия и промышленный сепаратор барабанного типа.

Стендовый сепаратор имеет простейшую кассетную конструкцию и предназначен для первичной проверки теоретических исследований сепарации ВГСНППМ. На основе полученных опытных данных для проведения укрупненных экспериментов был спроектирован экспериментальный сепаратор непрерывного действия карусельного типа с электромагнитной системой,

питающейся через автотрансформатор от сети 220В 50Гц. Сердечники электромагнитов были изготовлены из пластин трансформаторной стали для предотвращения появления токов Фуко. Физические размеры сердечника определяются рабочей зоной сепаратора, имеющей размеры 60×52×96 мм. Количество витков и сила тока в обмотках электромагнитов рассчитывались по стандартной методике.

В качестве полиградиентной среды применены шарики из стали ШХ15 диаметром 8мм. Вертикально расположенный барабан сепаратора имеет двойные стенки, между которыми располагается полиградиентная среда. Внутри барабана неподвижно закреплен один из электромагнитов. В движение барабан приводится электродвигателем, снабженным редуктором, частота оборотов регулируется в пределах от 1 до 10 об/мин.

Производительность сепаратора по твердому 10 кг/час. Кроме шаров в качестве полиградиентной среды могут быть использованы стальная вата, металлические стержни и др.

Внешний вид лабораторного сепаратора представлен на рисунке 7:

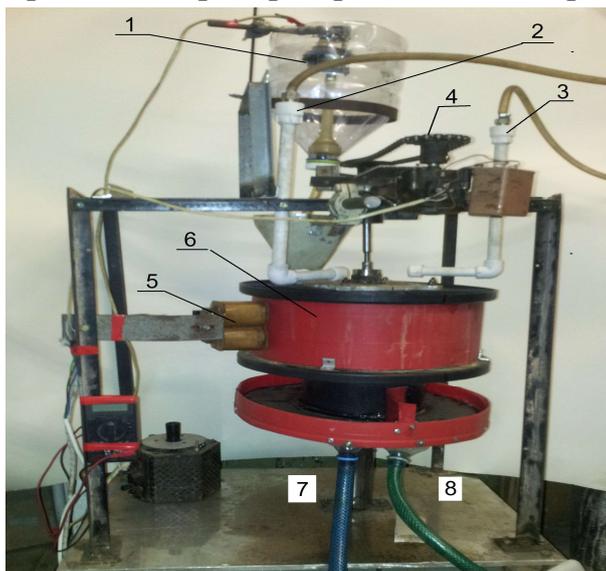


Рисунок 7 – Экспериментальный сепаратор ВГСНПМП. Обозначения: 1- устройство для подачи питания, 2,3 – устройство для подачи воды, 4 – электропривод барабана, 5 – магнитная система, 6 – барабан со стальными шарами, 7 –приемный бункер концентрата, 8 – приемный бункер промпродукта.

Опыты на экспериментальном ВГСНПМП-сепараторе позволили сравнить эффективность сепарации в переменном и постоянном магнитных полях.

В качестве исходного материала был использован концентрат Михайловского ГОКа (содержание $Fe_{\text{общ}}$ 65,13%, содержание кл. -0,074 мм 97%).

Среднее содержание $Fe_{\text{общ}}$ в концентрате, полученном при сепарации в переменном магнитном поле при напряженности поля $H=12\text{кА/м}$, составило $\beta_1 = 68,92\%$, а в постоянном поле - $\beta_2 = 67,34\%$. Т.е. прирост содержания железа в концентрате, полученном в переменном поле, составил 1,32 %.

Сравнение выборочных средних с применением F-критерия Фишера и t-критерия Стьюдента подтвердили полученное различие средних на 95% уровне значимости, что позволяет утверждать, что применение переменного магнитного поля улучшает процесс полиградиентной магнитной сепарации.

Для определения наиболее подходящей полиградиентной среды на экспериментальном сепараторе были опробованы металлические шары, тонкая стальная лента и металлическая вата. К каждой среде был подобран оптимальный скоростной режим протекания пульпы. Соотношение т/ж составляло 1/10.

Опробование металлической ваты, состоящей из проволочек диаметром 0,015мм выявило её непригодность для промышленного применения по двум причинам: сильное механическое удержание концентрата, требующее промывки под давлением и интенсивная коррозия, приводящая к разрушению самой ваты и попаданию скрапа в продукты обогащения.

Этих недостатков практически лишена набивка из металлической ленты сечением 1x0,1мм. Вследствие гораздо более пористой структуры механическое удержание концентрата меньше на порядок, чем у металлической ваты. Результаты сепарации представлены на рисунке 8.

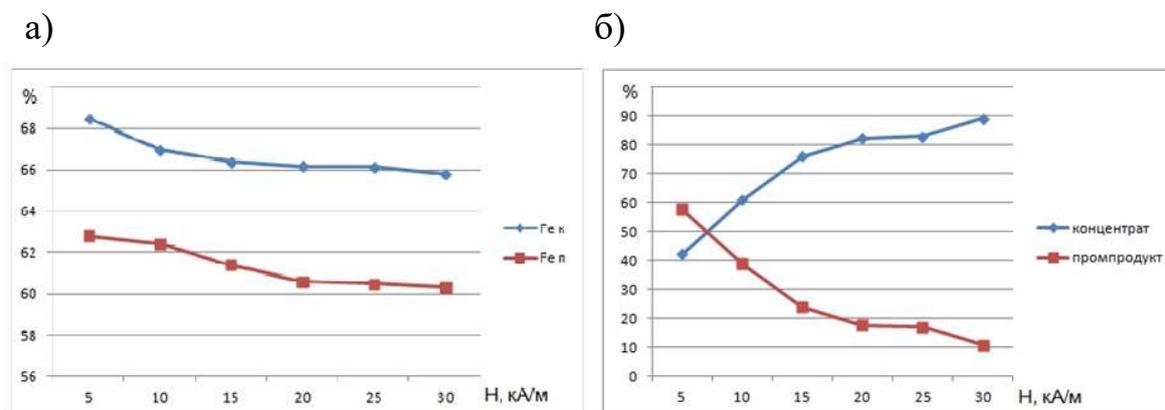


Рисунок 8 - Зависимости содержания $Fe_{\text{общ}}$ в концентрате и промпродукте (а) и выхода продуктов обогащения (б) от напряженности поля, полученные на металлической ленте.

Были проведены опыты с использованием шаров диаметром от 4 до 8мм, изготовленных из магнитомягкой стали. Наилучшие результаты по качеству концентрата были достигнуты при применении шаров диаметром 8мм (рисунок 9).

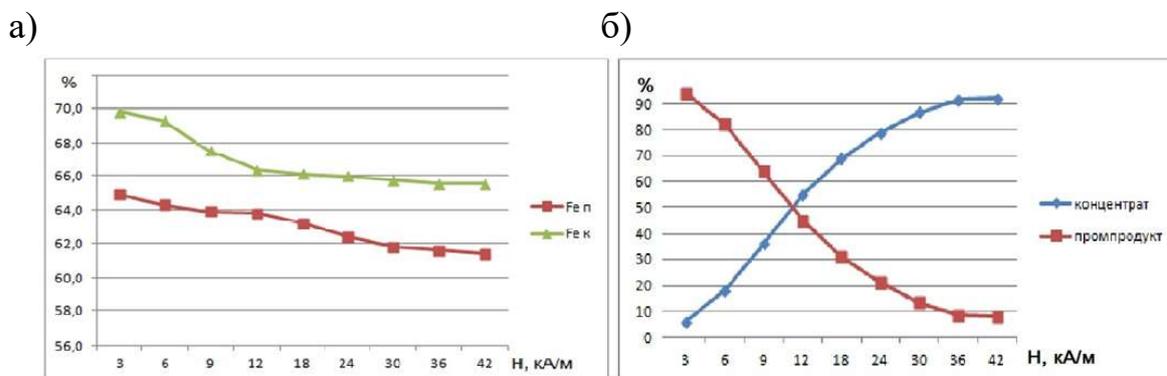


Рисунок 9 - Зависимости содержания $Fe_{\text{общ}}$ в концентрате и промпродукте (а) и выхода продуктов обогащения (б) от напряженности поля, полученные на металлических шарах диаметром 8мм.

Представленные зависимости показывают, что требуемые результаты могут быть достигнуты при напряженности от 10 до 15 кА/м, хотя извлечение остается неполным. Такие результаты связаны как с относительно низким раскрытием в исходном материале, так и с не 100% удалением сростков в результате одного цикла сепарации.

На рисунке 10 представлены результаты обогащения концентрата МГОКа на экспериментальном сепараторе ВГСНПМП.

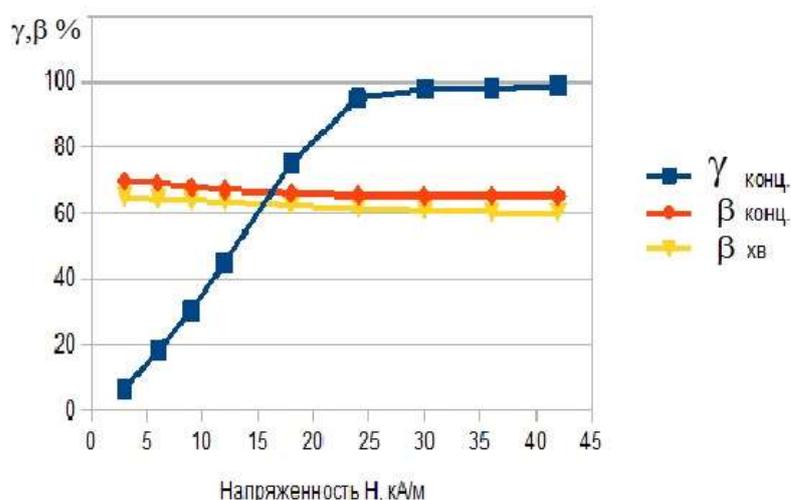


Рисунок 10 – Зависимости показателей обогащения от напряженности поля экспериментального сепаратора ВГСНПМП

Металлические шары наименее склонны к механическому удержанию сепарируемого материала, к тому же они могут быть легко дезинтегрированы после снятия внешнего магнитного поля для их полной очистки, поэтому выбор был остановлен на них как на наиболее подходящей среде для конструкции промышленного сепаратора барабанного типа. Его чертеж приведен на рисунке 11.

Пульпа подаётся в верхнюю часть сепаратора. Обедненный промпродукт разгружается в ванну сепаратора. Шары с накопленным концентратом попадают из верхней части сепаратора в зону действия съёмника, который сбрасывает их на шпальтовый грохот, несущий функцию отделения концентрата и регенерации шаров. Концентрат собирается в ванну под грохотом. Очищенные шары под действием силы тяжести возвращаются к барабану для повторения цикла.

Применение переменного магнитного поля приводит к полному размагничиванию осадительных поверхностей и концентрата, что способствует его лучшему смыву.

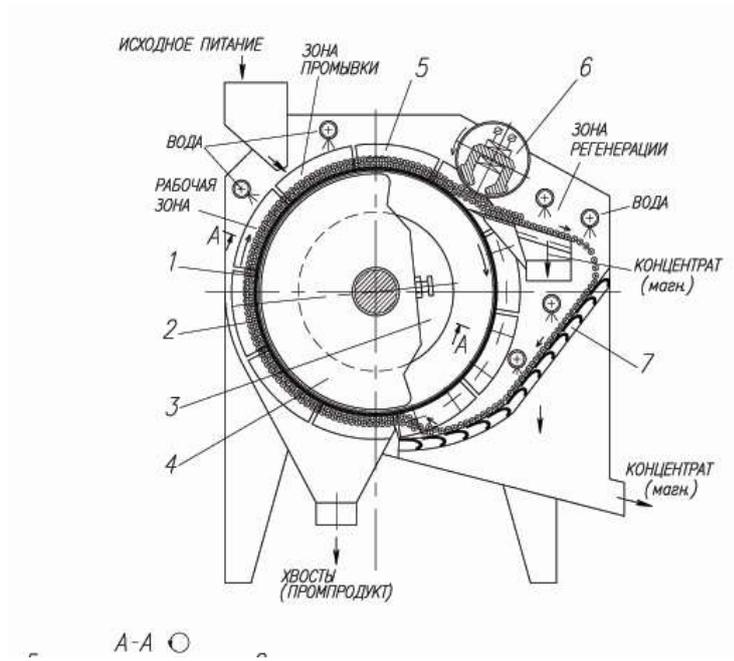


Рисунок 11. Барабанный сепаратор ВГСНПМП. 1- барабан сепаратора, 2 – слой шариков; 3- катушки возбуждения; 4 – магнитная система; 5 –реборды; 6- электромагнитный съёмник; 7 – шпальтовый грохот.

Краткая техническая характеристика барабанного сепаратора ВГСНПМП:

1. Тип противоточный. Назначение – сепарация сильномагнитных материалов крупностью 1,0 – 0мм.
2. Размеры барабана 1350х600мм.
3. Магнитная система осевая, электромагнитная, питающаяся переменным током. Потребление магнитной системы от сети 220В составляет 3,8А.
4. Размеры регенерационного шпальтового грохота 1000х1400мм, ширина щели 3мм.
5. Число оборотов барабана – 3-5 об/мин.
6. Шаровая загрузка 400 кг шаров d=8мм.
7. Мощность привода 4,5кВт
8. Производительность по исходному питанию 10 т/ч.
9. Габариты: 2200х1700х2100мм.

Разработанная конструкция барабанного сепаратора ВГСНПМП позволяет предложить более совершенную технологию обогащения магнетитовых руд Михайловского ГОКа, включающую операцию ВГСНПМП конечного концентрата с целью дообогащения до кондиций ГБЖ (69,0% Fe_{общ}) и получения товарного концентрата (65,2% Fe_{общ}) без снижения нагрузки на секцию.

Внедрение предлагаемой технологии позволит получить 30% конечных продуктов по выходу (10% от исходного) с качеством, пригодным для ГБЖ. Стоимость суперконцентрата в полтора раза выше стоимости доменного концентрата, что позволит существенно повысить прибыльность предприятия в целом. Ожидаемый экономический эффект от внедрения предлагаемой технологии равен 13501,08 млн.р.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе представлено решение актуальной научной и практической задачи повышения селективности магнитной сепарации в технологии обогащения сильномагнитных руд, включающей операцию разделения на сепараторе ВГСНПМП, разработанном на основе математической модели предложенного автором нового процесса высокоградиентной сепарации в низкоинтенсивном переменном магнитном поле (ВГСНПМП).

Основные результаты, выводы и рекомендации диссертации заключаются в следующем:

1. Выполненный анализ мировых достижений науки и техники в области получения высококачественных магнетитовых концентратов, соответствующих требованиям бездоменной металлургии стали, позволил обосновать перспективность нового метода магнитного обогащения ВГСНПМП для тонкоизмельченных сильномагнитных руд при получении суперконцентратов для бездоменной металлургии стали.

2. Получено положительное решение Федеральной службы по интеллектуальной собственности о выдаче патента по заявке №2014114166/03(022119) на авторские права по процессу ВГСНПМП.

3. Установлен механизм процесса удаления богатых сростков из слоя магнетитового концентрата, образующегося на осадительных матрицах сепаратора ВГСНПМП. Сущность процесса заключается в том, что в результате наличия гистерезиса перемагничивания у частиц магнетита, циклические изменения полярности переменного поля приводят к диаметрально противоположному изменению направления извлекающей магнитной силы, которая сообщает им вращательное и поступательное движение в области высокого градиента магнитного поля.

Рекомендовано при реализации процесса ВГСНПМП для ослабления флокуляции с целью повышения качества магнетитового концентрата применять переменное магнитное поле частотой 50 Гц и напряженностью не выше 20 кА/м. Оптимальная напряженность 9 – 15 кА/м.

4. Разработана математическая модель нового процесса ВГСНПМП, объективно отражающая закономерности разделения магнитных частиц при его использовании, которая использовалась для разработки конструкции непрерывно действующего экспериментального сепаратора ВГСНПМП и технологической схемы получения высококачественных магнетитовых концентратов основанной на его применении.

5. Создана конструкция экспериментального сепаратора ВГСНПМП с электромагнитной системой, создающей высокоградиентное переменное магнитное поле с низкой напряженностью в ферромагнитных матрицах с большой поверхностью зоны захвата для улавливания частиц с наиболее высокой магнитной восприимчивостью. Установлены рабочие диапазоны основных конструктивно-технологических параметров сепаратора ВГСНПМП.

6. Предложена конструкция промышленного противоточного сепаратора ВГСНПМП с электромагнитной системой переменного тока и автономной системой регенерации высокоградиентной среды в бесконтактном режиме производительностью по исходному питанию 10 т/ч.

7. Обоснована технология дообогащения магнетитовых концентратов, основанная на применении процесса ВГСНППМ, позволяющая повышать качество магнетитовых концентратов до содержания $Fe_{\text{общ}} = 69\%$ и выше без использования флотации.

8. Предложена технологическая схема получения высококачественных магнетитовых концентратов, соответствующих требованиям к сырью для бездоменной металлургии, включающая операцию ВГСНППМ-сепарации, которая может быть рекомендована для внедрения на Михайловском ГОКе.

Ожидаемый экономический эффект от внедрения предлагаемой технологии равен 13501,08 млн.р.

Научные статьи из перечня ВАК РФ:

1. Сыса, П.А. Сепарация в высокоградиентных переменных магнитных полях с низкой напряженностью / В.В. Кармазин, П.А. Сыса // ГИАБ. - 2014. - №2. - С. 63-66.

2. Сыса, П.А. Повышение качества магнетитовых концентратов за счет высокоградиентной сепарации в переменных магнитных полях с низкой напряженностью / В.В. Кармазин, П.А. Сыса // ГИАБ. - 2014. - №2. - С. 123-128.

3. Сыса, П.А. Получение магнетитовых концентратов для бездоменной металлургии путем высокоградиентной сепарации / В.В. Кармазин, П.А. Сыса // ГИАБ. - 2013. - №12. - С. 14-20.

4. Сыса, П.А. Повышение качества магнетитовых концентратов / В.В. Кармазин, П.А. Сыса // ГИАБ. - 2013. - №12. - С. 136-146.

Научные статьи в прочих изданиях:

1. Сыса, П.А. Получение сырья для бездоменного производства стали на основе повышения эффективности магнитного обогащения / П.А. Сыса, В.В. Кармазин // Сборник материалов "Конгресс обогатителей стран СНГ 2015". Москва 17-19 февраля 2015. - М: Изд. ООО «ИНТЕП». - 2015. - С. 43.

2. Сыса, П.А. Сепарация в высокоградиентных магнитных полях с низкой напряженностью / П.А. Сыса, В.В. Кармазин // Материалы десятой всероссийской научно-практической конференции с международным участием "Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Энергосбережение. Экология. Новые технологии". - Старый Оскол 25-27 ноября 2013. - Белгород: Изд. НИУ «БелГУ», 2013. - С. 200.

3. Сыса, П.А. Получение сырья для бездоменного производства стали на основе повышения эффективности магнитного обогащения / П.А. Сыса, В.В. Кармазин // Тезисы докладов научного симпозиума "Неделя Горняка 2015". Москва 25-29 января 2015. - М: Изд. МГГУ. 2015. - С. 181.

4. Сыса, П.А. Применение высокоградиентной сепарации для повышения качества железорудных концентратов / В.В. Кармазин, П.А. Сыса. - Сборник

материалов "Неделя горняка 2014". – Москва. - 27-31 января 2014. – М.: Изд. ООО «Роликс», 2014. - С. 151.

Получено положительное решение Федеральной службы по интеллектуальной собственности о выдаче патента по заявке №2014114166/03(022119) на авторские права по процессу ВГСНПП.