

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ
ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ**

На правах рукописи

МЛАДЕЦКИЙ Игорь Константинович

УДК (622.778 : 622.341.1) : 519.673

**ОСНОВЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЫХОДНЫХ
ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАЗДЕЛЕНИЯ ФЛОКУЛИРУЮЩИХ
МАТЕРИАЛОВ ПРИ МОКРОЙ МАГНИТНОЙ
СЕПАРАЦИИ**

05.15.08 — Обогащение полезных ископаемых

**А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук**

Работа выполнена в Днепропетровском горном институте

Научный консультант

доктор технических наук, профессор А.Н.МАРЮТА

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор А.М.ТУРКЕНИЧ

доктор технических наук, профессор Л.П.ШУПОВ

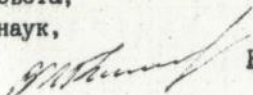
доктор технических наук, профессор Н.В.ФЕДОРОВСКИЙ

Ведущее предприятие - Научно-исследовательский и
проектный институт Механобрчермет

"Защита состоится " _____ " _____ 1992 г. в _____
час. на заседании специализированного совета Д 068.08.03 при
Днепропетровском горном институте.

Адрес: 320014, г.Днепропетровск, 14, пр.К.Маркса, 19, ДГИ.
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.
Автореферат разослан " _____ " _____ 1992 г.

Ученый секретарь
специализированного совета,
доктор технических наук,
профессор



В.И.БОНДАРЕНКО

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00816427 (S)

Актуальность проблемы. Непрерывное совершенствование методов добычи минерального сырья и его глубокого обогащения - одно из важнейших направлений повышения эффективности горного и металлургического производства. Для преодоления дефицита металла необходимо полнее использовать то, что добывается. Путь к этому - комплексная, глубокая переработка полезных ископаемых, применение высокоэффективных схем и экономичных методов обогащения. Магнитные методы обогащения удовлетворяют самым высоким требованиям и поэтому широко распространены при переработке многих полезных ископаемых, в том числе руд редких и цветных металлов.

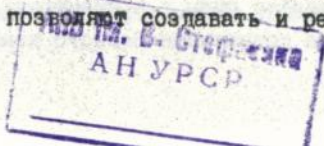
Совершенствование технологии обогащения руд черных металлов, а также создание систем управления качеством концентрата на магнитообогатительных фабриках обуславливают необходимость модернизации основного обогатительного аппарата - магнитного сепаратора.

В настоящее время разработано множество конструкций магнитных сепараторов и ни одна из них не может быть признана удовлетворительной, поэтому поиск более совершенных конструкций продолжается. Этот поиск во многом является случайным, связанным со способом решения изобретательных задач. Один из этапов этого способа - оценка перспективности конструкции - выполняется, как правило, путем физического моделирования и занимает основное время и средства всего процесса поиска. Более дешевым и, что важно, быстрым способом оценки потенциальных возможностей синтезированных конструкций является математическое моделирование с помощью ЭВМ.

Для реализации такого моделирования необходимо иметь комплекс взаимосвязанных моделей отдельных процессов, происходящих в магнитных сепараторах.

История обогатительной науки накопила весьма большой эмпирический материал, на основании которого были получены математические соотношения, позволяющие прогнозировать поведение отдельных процессов или некоторого множества процессов, как системы, с помощью одной формулы.

В настоящее время вычислительные машины становятся основным средством познания и позволяют создавать и реализовывать



весьма сложные алгоритмы. Таким образом, создание комплекса взаимосвязанных машинных алгоритмов, дающих возможность прогнозировать выходные показатели обогажительного процесса является своевременной и актуальной проблемой.

Для решения этой проблемы нами был выбран барабанный магнитный сепаратор со слабым магнитным полем, как получивший наиболее широкое распространение в обогажительной практике. Кроме того, большинство модернизаций этого аппарата не приводили к существенным положительным результатам и возникла необходимость в проверке потенциальных возможностей этого типа сепараторов.

Цель работы является построение последовательности взаимосвязанных математических моделей, позволяющих проследить преобразование проблемной магнетитовой руды в магнитный и немагнитный продукты мокрого магнитного обогащения и прогнозировать их качественные показатели.

Идея работы заключается в математическом моделировании процесса подготовки и разделения в магнитном поле флокулирующих материалов.

Методы исследования. Методической основой исследований составлял комплексный подход, включающий применение анализа и обобщения литературных данных по математическому описанию процессов разделения и экспериментальным исследованиям этих процессов; аналитическое изучение процессов раскрытия рудного компонента при измельчении и движения пульпы как сплошной среды, а также движения отдельных частиц в среде; стохастическое моделирование процессов флокулообразования.

Основные научные положения, защищаемые в диссертации:

- прогнозирование выходных качественных показателей обогажительных процессов осуществляется по некоторому множеству показателей раскрытия рудного минерала, главными из которых является функция распределения частиц по содержанию в них ценного компонента, достаточным приближением которой являются массовые доли открытых рудных и нерудных зерен, богатых и бедных сростков, вычисляемые как интегральные функции от произведения функций распределения частиц по крупности и по содержанию в них ценного компонента. Это положение принято для моделирования всего технологического перелета руды в концентрат;

- возможное содержание ценного компонента в частицах имеет

максимальное и минимальное значения для каждого узкого класса крупности; причем эти пределы изменяются периодически с периодом равным сумме размеров вкрапленности и среднего расстояния между вкрапленностями. Амплитуда периодов уменьшается, экспоненциально приближаясь к содержанию ценного минерала в руде. Данное положение дало возможность получать функции распределения частиц по содержанию в них ценного минерала для вычисления качественных показателей разделения;

- сила взаимодействия магнитных частиц, как случайной совокупности оценивается как средняя по множеству реализаций мгновенных значений параметров, составляющих эту силу. При этом основной исходной информацией являются функции распределения частиц по крупности и по содержанию в них магнетита, причем функция распределения частиц по крупности при изменении среднего размера частиц от 15 мм до 5...6 мкм является неустойчивой и претерпевает изменение от нормального к свернутому нормальному, затем показательному и далее - полимодальному. Данное положение позволило оценивать размеры флокул и количество захватываемого нерудного компонента при разделении;

- количество захваченных нерудных частиц при разделении флокулирующих материалов пропорционально содержанию нерудной фазы, содержанию твердого и рудной фазы в пульпе. Преобладающее влияние на процесс захвата нерудной фазы в пульпах высокой консистенции оказывает содержание твердого; в пульпах средней консистенции - соотношение размеров флокул и частиц; в пульпах низкой консистенции - соотношение размеров частиц и расстояние между ними. Это положение дало возможность оценивать качество магнитного продукта в каждом сечении потока извлеченной магнитной массы, находящейся на поверхности барабана сепаратора и, как следствие, выбирать конструктивные элементы сепаратора.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректностью поставленных задач, применением апробированных фундаментальных соотношений механики твердого тела и сплошных сред; методов статистического моделирования, адекватностью и точностью используемых моделей, подтвержденными длительным применением их при создании новых конструкций обогащательных аппаратов; достаточной схожимостью полученных теоретических и экспериментальных результатов; положительной провер-

кой результатов моделирования при проектных работах и прогнозировании результатов обогащения на действующих обогатительных предприятиях.

Научная новизна работы заключается:

- разработан алгоритм вычисления максимально- и минимально-возможных пределов содержания ценного компонента в измельченных частицах заданного размера в зависимости от текстурных признаков руды и содержания ценного минерала в руде, определены функции изменения этих предельных значений. Алгоритм позволяет находить количество частиц с заданным содержанием ценного минерала в определенной совокупности частиц и, далее - функцию распределения частиц по содержанию в них ценного минерала, которая является главной информационной характеристикой при моделировании обогащения руд;

- установлены функциональные зависимости выхода открытых рудных и нерудных зерен, богатых и бедных сростков с заданным содержанием в них ценного минерала от вкрапленности, содержания ценного минерала в измельченном продукте и параметров функции распределения частиц по крупности для любых стадий измельчения, которые позволяют разработать методику моделирования технологии обогащения магнетитовых руд любой сложности;

- установлена функция распределения силы взаимодействия магнитных частиц в постоянном магнитном поле в зависимости от крупности помола частиц и показателей раскрытия рудного компонента и функции распределения расстояний между частицами, которая дает возможность наметить пути управления процессом флокулообразования и захвата нерудной фазы;

- получен алгоритм, позволяющий оценивать максимальный размер флокул в переменном магнитном поле в зависимости от частоты и магнитных параметров флокул, а также изменение содержания магнетита во флокуле в зависимости от продолжительности воздействия переменного поля на флокулу. С помощью этого алгоритма возможно определить параметры магнитного сепаратора с бегущим магнитным полем, который позволит получить магнитный продукт заданного качества;

- получены соотношения, количественно оценивающие захват нерудных частиц при флокуляции и извлечении флокул и частиц в пульпах различной консистенции в зависимости от размеров частиц

и флокул; эти соотношения позволяют оценить качество извлеченной магнитной массы и определить пути повышения эффективности сепарационного процесса.

Практическое значение работы заключается:

- в разработке методики моделирования мокрого магнитного обогащения флокулирующих материалов с целью прогнозирования потенциально возможных выходных показателей;

- в разработке методики моделирования технологического процесса обогащения магнетитовых руд, которая позволяет выбирать требуемые режимные параметры для получения заданного качества концентрата;

- в разработке методики определения обогатительных свойств руды для заданных обогатительных технологий, а также синтеза технологического процесса для получения концентрата заданного качества при ограничениях на потери магнетита в отходах.

Все разработки являются исходной базой для работ по синтезу структуры магнитных сепараторов, подбора режимных и конструктивных параметров его, синтеза структуры технологического процесса обогащения магнетитовых руд и подбора режимных параметров этого процесса с целью получения концентрата заданного качества. Работа может быть использована при геологических изысканиях с целью определения стоимости обогатительного передела для разведываемого месторождения полезного ископаемого.

Реализация результатов исследования. Результаты работы оформлены в виде прикладных программ для имитационного моделирования мокрой магнитной сепарации и всего технологического процесса, а также практических рекомендаций по использованию этих программ.

Они нашли внедрение:

- в разработках Днепропетровского филиала института Гипромашобогатение при проектировании магнитных сепараторов с переменным магнитным полем при выборе их параметров, что позволило вести целенаправленный поиск конструкций магнитных сепараторов;

- в разработках института Уралмеханобр при разработке барабанных магнитных сепараторов с регулируемым магнитным полем ПЭМ-ПП-90/250 Р;

- в разработках института Днепрочерметавтоматика при обосновании алгоритма управления технологической линии обогащения железных руд Криворожского ГОКа окисленных руд и выборе крите-

рия управления ею;

- в курсе: "Системы автоматизированного проектирования" читаемого в ДГИ для специальности обогащения полезных ископаемых;

- при выборе режимных параметров обогащения магнетитовых руд на обогатительной фабрике Высокогорского рудоуправления.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Республиканской научно-технической конференции "Пути повышения качества продукции горно-рудных предприятий" (Кривой Рог, 1977), Международной конференции "Автоматическое управление подземными шахтами" (Острава, 1977), Международной конференции "Третья конференция по автоматизации горнодобывающей промышленности" (Варна, 1976), Плаксиновские чтения (Орджоникидзе Сев.Осет., 1984), Совещании "Метрологическое обеспечение и автоматизация технологических процессов основа повышения качества продукции горнорудных предприятий" (г.Губкин, 1987).

Публикации. Основные положения диссертации изложены в 35 печатных работах, в том числе в монографии, 4-х изобретениях, 30 научно-технических статьях.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 132 наименований и приложений. Она содержит 285 страниц машинописного текста, 90 рисунков и 10 таблиц.

Автор выражает признательность работникам институтов Гипромашобогатение и Днепрочерметавтоматика, сотрудникам отдела АСУ Высокогорского рудоуправления, кафедры обогащения полезных ископаемых ДГИ за помощь в проведении экспериментальных исследований, оформлении работы и внедрению результатов и благодарит проф. Марию А.Н. за методическую помощь и поддержку при выполнении диссертации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Истощение природных запасов полезных ископаемых заставляет искать новые способы добычи традиционных материалов. Эти способы становятся все более дорогие. Ставится вопрос о возобновлении запасов сырья, которое заключается в использовании бывших отходов обогатительного и металлургического производства, а также

бедных, ранее считавшимися некондиционными, месторождений и бортовых руд. Решение этой задачи связано с разработкой способов и аппаратов обогащения таких руд. Для полного использования металла требуется глубокая переработка полезных ископаемых, внедрение высокоэффективных схем и экономичных методов обогащения, что в конечном счете сводится к созданию безотходных и ресурсосберегающих технологий. Магнитные методы обогащения удовлетворяют самым высоким требованиям и поэтому широко распространены при переработке многих полезных ископаемых, в том числе руд редких и цветных металлов.

Совершенствование технологии обогащения руд черных металлов, а также создание систем управления качеством концентрата на магнитообогатительных фабриках обуславливает необходимость модернизации основного обогатительного аппарата — магнитного сепаратора. Решение этой задачи ведется уже не одно десятилетие и основным способом поиска остается экспериментальный, который частично корректируется теоретическими проработками, охватывающими отдельные фрагменты процесса разделения. Эти разработки помогают осуществить прогноз качественных показателей обогащения. Однако, инструментом прогноза в технологии обогащения по-прежнему остается физическое моделирование. Математическое моделирование неизмеримо быстрее и дешевле физического, однако для получения математических моделей требуется значительно больше временных и интеллектуальных затрат. Обоганительные аппараты являются сложными объектами с детерминированно-стохастическими процессами, поэтому ни регрессионный анализ, ни чисто детерминистский подход не обеспечат успеха в математическом моделировании. Совместное использование обоих подходов точнее описывает разделительный процесс, причем изменение аргументов в широких пределах не приводит к противоречивым результатам.

Необходимость использования математических моделей в теории и практике обогащения полезных ископаемых особенно остро встает в настоящее время, когда создание безотходных технологий — основной критерий развитости отрасли, а численное экспериментирование с математическими моделями позволяет сократить время на разработку экспериментального образца. Для решения таких задач требуется предварительно решить некоторое множество мелких задач. Одна из которых создание базы знаний. Нами приня-

то направление на решение этой задачи, поскольку она является основной при прогнозировании качественно-количественных показателей обогащения.

Разделение в магнитном поле совершается со значительным захватом открытой нерудной фазы, что значительно снижает эффективность сепарации, повышение которой в настоящее время осуществляется путем увеличения количества приемов разделения (перечисток). Совершенствуются также конструкции магнитных сепараторов. Этим вопросам посвящены работы советских и зарубежных ученых Азбеля Ю.И., Бикбова А.А., Гонтаренко П.А., Деркача В.Г., Егорова Н.Ф., Кармазина В.И., Кармазина В.В., Ломовцева Л.А., Марюты А.Н., Остапенко П.Е., Пилинского Г.И., Соцнева А.Я., Тихонова О.Н., Туркенича А.М., Фанштейна Э.Г., Шуберта Г., Мигалки П., Пильха В., Сивица А., Лауриллы Е., Бринга К. и многих других. С каждым годом увеличивается количество, включаемых в рассмотрение параметров, влияющих на обогатительный процесс. Вместе с тем селективность разделения все еще остается низкой, что влечет за собой дальнейшее измельчение уже раскрытых нерудных зерен и, как следствие, увеличение расхода энергоресурсов. Поэтому решение вопроса о создании ресурсосберегающих и безотходных технологий лежит через создание совершенных обогатительных аппаратов, анализ работы которых включает характеристики раскрытия в питании и ряд частных моделей, полно описывающих процесс формирования обогащенного и обедненного продуктов, которые могут легко согласовываться в алгоритмы, образуя базу знаний при создании САПР, способной давать достоверные результаты в широком диапазоне изменения аргументов и параметров. В соответствии с этим необходимо решить такие задачи:

1. Исследовать закономерности раскрытия рудного минерала при измельчении и вывести на их основе аналитические зависимости, позволяющие по минимальному количеству усредненных текстурно-структурных характеристик исходной руды и по предполагаемым характеристикам крупности помола руды судить о возможных показателях раскрытия руды.

2. Установить соотношения, позволяющие вычислять направление и модуль скорости элемента потока пульпы во всех сечениях этого потока.

3. Изучить закономерности кинетики флокулообразования в

постоянном и переменном магнитных полях и закономерности захвата нерудной фазы во флокулу, затем на этой основе вывести зависимости, позволяющие вычислять параметры флокул и захвата нерудного компонента.

4. Изучить кинетику формирования магнитного продукта на всем пути движения пульпы в ваннах магнитных сепараторов и разработать методику вычисления показателей потерь ценного минерала в отходах.

5. Изучить закономерности поведения магнитного продукта на поверхности барабана магнитного сепаратора и разработать методику вычисления показателей качества обогащенного продукта.

В соответствии с перечнем вопросов вначале было проведено исследование существующих моделей, позволяющих проводить количественную аналитическую оценку показателей раскрытия рудного минерала. Одна часть существующих моделей использует результаты обогащения и по ним производится уже оценка раскрытия. Другая часть моделей требует большого объема информации о текстурно-структурных признаках руды. Задача анализа предполагает использование второй группы моделей, однако потребность в большом количестве первичной информации делает их малоприменимыми для использования в оперативном управлении. Поэтому нами были проанализированы экспериментальные исследования по микроскопическому исследованию раскрытия. В результате анализа стало возможным выдвинуть гипотезы о вероятностях появления богатых (РБ) и бедных (НБ) сростков и открытых рудных (РЗ) и нерудных (НЗ) зерен, а затем получены функции, по которым вычисляются упомянутые характеристики.

$$P_{PЗ} = \alpha_{и} \int_0^{d_{BK}} (1 - d/d_{BK}) f(d) dd;$$

$$P_{НЗ} = (1 - \alpha_{и}) \int_0^{r_{BK}} (1 - d/r_{BK}) f(d) dd;$$

$$P_{PБ} = \alpha_{и} \left(\int_0^{d_{BK}} d/d_{BK} f(d) dd + \int_{nL_{BK}}^{\infty} f(d) dd \right) + \int_{nL_{BK}}^{\infty} f(d) dd;$$

$$P_{НБ} = (1 - \alpha_{и}) \left(\int_0^{r_{BK}} d/r_{BK} f(d) dd + \int_{nL_{BK}}^{\infty} f(d) dd \right);$$

где $\alpha_{и}$ - содержание ценного компонента в руде; d_{BK} - вкрап-

ленность; $L_{BK} = d_{BK} + r_{BK}$; r_{BK} - расстояние между вкраплениями; $f(d)$ - функция распределения частиц по крупности; d - текущее значение крупности; $n = 10$.

Использование установленных качественных связей и гипотезы о матричном строении руды дало возможность развить идеи раскрытия рудного минерала вначале в обосновании существования предельных значений содержания ценного минерала в частицах фиксированного размера, а затем в доказательстве периодичности этих прелелов для сростков с содержанием ценного минерала $\alpha > \alpha_{и}$

$$\alpha'_M = ((nd_{BK} + \Delta d) / (nL_{BK} + \Delta d))^3, 0 \leq \Delta d < d_{BK};$$

$$\alpha''_M = ((n+1)d_{BK} / (nL_{BK} + d_{BK} + \Delta d))^3, d_{BK} \leq \Delta d < L_{BK}$$

и для сростков с $\alpha < \alpha_{и}$

$$\alpha'_H = (nd_{BK} / (nL_{BK} + \Delta d))^3, 0 \leq \Delta d < r_{BK}; n = \overline{1, \infty};$$

$$\alpha''_H = ((nd_{BK} + \Delta d) / (nL_{BK} + r_{BK} + \Delta d))^3, r_{BK} \leq \Delta d < L_{BK}.$$

Период изменения зависит от размера вкрапления d_{BK} и расстояния между этими зернами $r_{BK} = L_{BK} - d_{BK}$; n - целая часть отношения d/L_{BK} .

Установление однозначной зависимости между размером частиц d и прелельным содержанием в ней ценного минерала $\alpha_{max} = f_1(d)$ и $\alpha_{min} = f_2(d)$ и введение уровней заданного содержания ценного минерала в частицах дает возможность получить функции содержания в измельченном продукте узкого класса сростков с заданным содержанием в них ценного минерала α_{PC}, α_{HC}

$$P_{PC\alpha} = \sum_{n=0}^{n'_K} \int_{d''_{iM}}^{d'_{iM}} P_{PC}(d) \partial d;$$

$$P_{HC\alpha} = \sum_{n=0}^{n''_K} \int_{d'_{iH}}^{d''_{iH}} P_{HC}(d) \partial d,$$

$n'_K, n''_K, d'_{iH}, d''_{iH}, d'_{iM}, d''_{iM}$ получают при решении соотношений для α_M и α_H введением уровня, а среднее содержание ценного минерала в сростках

$$\alpha_{PC} = \sum_{i=1}^m (P_{PC\alpha i} - P_{PC\alpha i-1}) / P_{PC}, m = (1 - \alpha_H) / \Delta \alpha;$$

$$\alpha_{HC} = \sum_{i=1}^{m'} (P_{HC\alpha i} - P_{HC\alpha i-1}) / P_{HC}, m' = \alpha_H / \Delta \alpha.$$

Расчетные соотношения для вычисления показателей раскрытия изменяются в случае существенного отклонения $\alpha_{и}$ от уровня $\alpha_{и} = 0,25 \dots 0,35$. Когда $\alpha_{и} > 0,35$, тогда вводится уровень $\alpha = 0,3$ и все частицы с $\alpha > 0,3$ относят к богатым сросткам. Когда $\alpha_{и} < 0,25$, тогда тот же уровень $\alpha = 0,3$ разграничивает богатые и бедные сростки. Вычисление их количества ведется с помощью соотношений $P_{рсд}$ и $P_{нсд}$.

Гуды, имеющие широкий диапазон изменения вкрапленности, оценивать на раскрытие следует с помощью функции распределения крупности вкрапленности. Принципиальных трудностей это не вызывает, а дает только количественное усложнение, связанное с увеличением порядка интегрирования.

Вывод функций раскрытия осуществлялся в предположении равновероятного разрушения гуды как по зерну, так и по границе раздела рудного и нерудного минералов, что справедливо при внезапном приложении разрушающей нагрузки. Такая гипотеза подтверждается при шаровом помоле. Самоизмельчение характерно медленным приложением нагрузки и разлом происходит по естественным трещинам и слабым контактам между рудной и нерудной фазами. Равновесие нарушается и вероятности появления сростков и открытых зерен изменяются. Учет способа измельчения на показатели раскрытия учитывался эмпирическим коэффициентом в показателе степени вероятности.

Гуды сложной текстуры со значительными нерудными прослоями требуют для описания раскрытия дополнительную информацию о содержании ценного минерала в рудных и нерудных прослоях и функцию распределения расстояний между прослоями. Методика расчета остается неизменной.

Потом гуды после, хотя бы одного приема измельчения уже характеризуется некоторым существенным раскрытием. При этом структура гуды нарушена и сростки могут быть получены только из сростков с различным содержанием ценного минерала. В сростке рудная фаза может быть в виде нескольких отдельных включений или в виде одного включения. Если считать, что рудный минерал в сростке сосредоточен в виде одного включения, тогда размер этого включения $d_{вк}$ зависит от содержания ценного минерала в сростке $\alpha_{рс} : d_{вк} = d_{ч} \sqrt{\alpha_{рс}}$, ($d_{ч}$ - размер частицы). При доизмельчении каждая частица, в зависимости от способа измельчения разрушается по определенному закону распределения частиц. Из нее не

могут быть получены частицы размером $d > d_4$. Поэтому закон распределения ограничен справа. Минимальная крупность $d = 0$. После измельчения, известными полагаем параметры распределения крупности частиц: среднюю крупность \bar{d} и среднее квадратическое отклонение σ_d . Параметры функции распределения разрушения отдельных частиц подбираются численно исходя из параметров общего закона распределения крупности частиц до и после измельчения. Из каждого вида сростков получаются все виды классов раскрытия, а общие показатели раскрытия минерала формируются суммированием соответствующих классов, получаемых из отдельных узких классов крупности:

$$P_{PCi} = P_{PC} \sum_{i=1}^3 \int_0^{d_{4\max}} \int_0^{d_4 \sqrt[3]{1-d_{PC}}} M_i \partial d \partial d_4;$$

$$i = 1, 2, 3;$$

$$P_{PC1} = P_{НЗPC}; P_{PC2} = P_{НСPC}; P_{PC3} = P_{PCPC};$$

$$M_1 = (1 - d / (d_4 \sqrt[3]{1 - d_{PC}})) f_1(d_4) f_2(d);$$

$$M_2 = d / (d_4 \sqrt[3]{1 - d_{PC}}) f_1(d_4) f_2(d);$$

$$M_3 = d / (d_4 \sqrt[3]{d_{PC}}) f_1(d_4) f_2(d),$$

$f_1(d_4)$ - функция распределения осколков при разрушении частицы размером d_4 ; $f_2(d)$ - функция распределения частиц до измельчения.

Аналогично выглядят выражения для параметров раскрытия из бедных сростков. Общее количество продуктов раскрытия составит

$$P_{P31} = P_{P3} + P_{P3PC} + P_{P3HC};$$

$$P_{PC1} = P_{PCPC} + P_{PCHC};$$

$$P_{HC1} = P_{HPC} + P_{HHC};$$

$$P_{H31} = P_{H3} + P_{H3PC} + P_{H3HC}.$$

Здесь две первые буквы индекса указывают вид сростков, а вторые две буквы - из какого вида сростков они получены.

Полученные функции практически полностью описывают входной поток магнитного сепаратора. Проверка этих моделей показала точность не ниже 10%, что дает возможность решать дальше задачу анализа процесса обогащения магнетитовых руд, которая заключается в исследовании процесса магнитной флокуляции.

Под действием магнитного поля в пульпе происходит расслоение магнитных и немагнитных частиц и объединение магнитных частиц в агрегаты и флоккулы. Флоккуляция сопровождается захватом немагнитных частиц в флоккулу.

Флоккуляция измельченных частиц играет положительную роль надежного извлечения тонких частиц. Отрицательная сторона данного явления - интенсивный захват открытой нерудной фазы. Протекает флоккуляция лавинообразно и практически мгновенно при большом количестве случайных явлений. Комплексное исследование флоккулообразования и моделирование на микроуровне связано с определением механизма и сил взаимодействия частиц, прочности образующихся агрегатов, управления данным процессом. Первым этапом является качественная оценка формирования флоккул с целью определения ориентировочных значений времени элементарного акта флоккуляции и кинетики образования флоккул. Инструментом исследования может быть детерминированное моделирование в такой последовательности.

1. Рассматривается движение во внешнем магнитном поле в пульпе крупных магнитных частиц друг к другу под действием вторичного магнитного поля, образуемого самой частицей. Предполагают, что до момента встречи этих крупных частиц их магнитная восприимчивость не изменяется, а они за это время пройдут путь ΔL совместно с потоком пульпы, идущим со скоростью U_{Π} . В процессе движения на поверхности каждой крупной частицы оседает некоторое количество мелких частиц с различной магнитной восприимчивостью. Тонкие частицы притягиваются к крупной также за счет взаимодействия их вторичных магнитных полей. На этом заканчивается элементарный акт флоккуляции.

2. Осевшие частицы совместно с центром флоккуляции образуют устойчивый агрегат частиц, который имеет больший размер и более низкую магнитную восприимчивость. Вычисляются эти две величины.

3. Сравнивают размер флоккулы a с максимальным его значением a_{\max} для заданных гидродинамических характеристик потока или же сравнивают величину ΔL с длиной воздействия внешнего магнитного поля $L_{\text{вн}}$ и если $L_{\text{вн}} < \Delta L$ или $a_{\max} < a$, то процесс флоккулообразования считается законченным. В противном случае расчет повторяют. Такое моделирование дало данные о размерах флоккул, сравнимые с экспериментальными,

приведенными в литературных источниках; время элементарных актов флокуляции значительно меньше времени воздействия турбулентных пульсаций, что не дает возможности рассчитывать на управление процессом флокуляции путем механического воздействия.

Характеристика вторичного магнитного поля зависит от магнитной восприимчивости, формы и размера частицы. Все три параметра имеют большой диапазон изменения и являются случайными величинами, поэтому сам процесс флокулообразования подчиняется закону случайного. Сила магнитного взаимодействия частиц является основным фактором флокуляции, а для моделирования флокулообразования необходимо рассмотреть:

- взаимодействие магнитных полей частиц;
- функцию распределения силы взаимодействия частиц;
- исследовать процесс флокулообразования;
- изучить закономерности изменения размеров флокул в зависимости от гидродинамических характеристик несущего потока.

Частицы пульпы можно рассматривать как случайную совокупность, которая характеризуется средним расстоянием \bar{r} между ними. При развитом турбулентном течении функция распределения расстояний между частицами в пульпе устойчива. Элементарной объемной фигурой, которую можно выделить из пульпы для анализа магнитных связей, является тетраэдр, в узлах которого находятся частицы со случайными значениями содержания ценного минерала. При этом вероятность попадания частиц в узел тождественна их количеству в пульпе.

Для моделирования силы взаимодействия частиц воспользуемся классической формулой, описывающей характеристику вторичного поля

$$H_e = H_a \left[1 + \frac{k \alpha d^3}{(\alpha + 2r)^3} \right],$$

где H_a - напряженность внешнего магнитного поля; α , d - объемная магнитная восприимчивость и размер частицы; r - внешняя координата пространства (координаты полярные); k - коэффициент формы частицы.

Сила взаимодействия частиц может быть оценена по формуле

$$F = \mu_0 \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

где m_1 , m_2 - "магнитные массы" взаимодействующих частиц;
 r - расстояние между ними.

Раскрыв последнее выражение, получаем формулу для моделирования силы взаимодействия частиц

$$F = \frac{M_0 (\pi d_i d_j H_a)^2 \alpha_i \alpha_j}{36 r_{ij}^2} \left[1 + \frac{2 \alpha_i d_i^3}{3 (d_i + 2 r_{ij})^3} \right] \left[1 + \frac{2 \alpha_j d_j^3}{3 (d_j + 2 r_{ij})^3} \right].$$

Методика моделирования следующая. Для однозначного задания тетраэдра достаточно иметь 14 величин: 4 - для крупности частиц; 4 - для магнитной восприимчивости; 2 - для расстояний между частицами; 4 - для углов между направлениями на центры частиц. Остальные величины вычисляются и получаем 6 расстояний между частицами, а затем 6 реализаций силы взаимодействия между частицами. После этого цикл моделирования повторяется до тех пор, пока не будет получено достаточное число реализаций для получения функции распределения силы взаимодействия частиц.

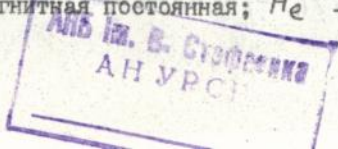
Результаты моделирования позволили сделать вывод, что эта функция является логарифмической нормальной с десятичной сеткой вдоль координаты F_M , поэтому характеризовать силу взаимодействия частиц только одним значением средней силы некорректно.

В магнитном поле равномерность распределения частиц нарушается и они движутся друг к другу, увеличивая силу взаимодействия. Моделирование изменения силы F_M при различном раскрытии магнетитовой руды показало, резкое возрастание F_M когда r_{ij} стремится к нулю. Причем, если вести вычисление F_M через средние значения аргументов, то такого явления не наблюдается: с уменьшением r_{ij} величина F_M медленно возрастает. Экспериментальные данные, приведенные в литературе, близки моделируемым. Следовательно, сила взаимодействия частиц должна вычисляться как средняя по моделированию величина, а не через средние значения аргументов.

С увеличением размеров флюкул устойчивость их нарушается и наблюдается динамическое равновесие в образовании и разрушении флюкул, поэтому существует некоторый максимально возможный размер флюкул, который в значительной степени определяется силой магнитного извлечения $M_0 \chi H_e \text{ grad } H_e$:

$$a = \frac{0,96 M_0 (\alpha_{\phi} H_e (1 + 0,125 \alpha_{\phi}))^2 - 3 \delta_{\phi} c_{\lambda} \sigma_{\phi}^2}{\delta_{\phi} M_0 \chi_{\phi} H_e \text{ grad } H_e},$$

Здесь M_0 - абсолютная магнитная постоянная; H_e - напряжен-



ность внешнего магнитного поля; δ_Φ - плотность флоккулы; α_Φ - объемная магнитная восприимчивость флоккулы; δ_D - плотность воды; C_A - коэффициент лобового сопротивления флоккулы; β_n - турбулентность пульпы; χ_Φ - удельная магнитная восприимчивость флоккулы.

Переменное магнитное поле коренным образом изменяет процесс флокулообразования, поскольку при движении частиц друг к другу они еще и переориентируются. Поэтому, будучи извлеченной, магнитная масса, подвергаясь действию переменного магнитного поля, переформируется или перемещается по поверхности извлечения. Это создает предпосылки для освобождения захваченных немагнитных частиц. Рассмотрение поведения сгущенной массы при воздействии переменного магнитного поля показало, что транспортировка магнитного продукта возможна переменным магнитным полем только при соизмеримых соотношения размера флоккул a и шага полюсов $S_{пол}$ магнитной системы сепаратора:

$$a = S_{пол} \arccos \sqrt{(1 + k_T^2/4)^{-1}} / \pi,$$

где k_T - коэффициент трения поверхности барабана.

Рассмотрение поведения отдельной частицы в перемешанном магнитном поле показало, что при малых частотах частицы переориентируются в соответствии с изменением вектора магнитного поля, а при частотах свыше 400 Гц наблюдается переманчивание, частицы уже не успевают следовать за изменением вектора напряженности в силу своей инерции.

Флоккулы в переменном магнитном поле испытывают большие механические усилия и поэтому становятся меньших размеров, кроме того частицы, составляющие флоккулу также испытывают момент вращения и смещаются друг относительно друга, в результате флоккула несколько разрыхляется, т.е. переменное магнитное поле разрушает флоккулы изнутри в отличие от внешних механических воздействий, при этом размер флоккул находят путем решения квадратного уравнения

$$ka^2 + k_1 a + k_2 + k_3 + k_4 = 0,$$

где

$$k = (\pi \mu_n / S_{пол})^2; k_1 = 2 \mu_0 C \chi_\Phi H^2; k_2 = 36 \pi \mu \mu_n / (\delta_\Phi S_{пол});$$

$$k_3 = 6 \delta_D C_A \beta_n^2 / (4 \delta_T); k_4 = 8,5 \mu_0 (\chi H (\alpha / (1 + \alpha N)))^2 / \delta_\Phi;$$

U_n - скорость движения пульпы; C - коэффициент неравномерности внешнего магнитного поля H ; M - коэффициент динамической вязкости; ψ - коэффициент заполнения флокулы; N - размагничивающий фактор флокулы.

С увеличением частоты магнитного поля флокулы разрушаются вплоть до отдельных частиц, что происходит при $f \geq 500$ Гц. Интенсивность очистки извлеченной массы переменным полем зависит от отношения размера частиц d и размера флокул a и тем выше чем больше d/a

$$P_n = P_{n0} \exp(-i 3d/(2a)),$$

где P_{n0} - количество захваченных немагнитных частиц при флокуляции; i - количество циклов переформирования флокулы.

Таким образом, применение переменных магнитных полей один из эффективных путей получения чистых концентратов.

Рассмотрение возможности избирательного извлечения частиц показало, что от флокуляции можно избавиться весьма значительным разбавлением пульпы: 1:50 или снижением напряженности поля до 2 Эрстед. Первое не отвечает ресурсосбережению, а во втором случае не будет извлечения частиц. Потребуется соблюдение режима движения пульпы близком к ламинарному при весьма протяженных размерах магнитного шлюза, что приведет к осаждению частиц. В результате приходим к выводу, что селективное магнитное извлечение в постоянном магнитном поле проблематично. Целесообразно воздействовать переменным магнитным полем на уже извлеченный продукт с целью получения магнитной массы заданного качества.

Рассматривая движение частиц друг к другу и оценивая вероятность появления немагнитных частиц на пути движения магнитных частиц, а также силовое воздействие в этот момент магнитных частиц на немагнитные было найдено соотношение, позволяющее оценить количество захватываемого немагнитного материала во флокулы. При значительных плотностях пульпы расстояние между частицами меньше среднего размера самих частиц и при наложении магнитного поля не имеет смысла оценивать скорость флокуляции, поскольку она значительно выше всех остальных процессов, происходящих в магнитном сепараторе. В этом случае, в предположении, что концентрация немагнитных частиц одинакова как в свободной

пульпе, так и в сгущенной массе, получаем количество захватываемого немагнитного материала пропорционально произведению количества магнитного, немагнитного и твердого материалов. А при флокуляции в переменных магнитных полях высокой частоты, когда размеры флокул соизмеримы с размером частиц, необходимо учитывать отношение \bar{d}/a (средняя крупность / размер флокул):

$$P_{\text{зах}} = P_M P_N \rho_T (1 - \bar{d}/a)^3,$$

где P_M , P_N - содержание магнитной и немагнитной фракций в пульпе; ρ_T - процент твердого в пульпе.

Основной составляющей сил, ограничивающих размеры флокул является относительная скорость движения самой флокулы и потока пульпы. Уравнения линий тока пульпы получены в предположении, что поток пульпы не имеет крупномасштабной турбулентности, соизмеримой с размерами его сечения, поэтому оказывается верной гипотеза о слоистом характере течения пульпы. На участке движения с некоторым радиусом закругления R на элемент потока пульпы действуют усилия от вязкого трения (τ), давления (q) и центробежные силы (ρ_c). Поскольку потоки в сепараторе имеют значительную ширину и малую длину, то правомерной оказывается гипотеза об отсутствии поперечных циркуляций и задача сводится к плоской. В зависимости от расположения потока в сепараторе имеем крайними условиями подвижные или неподвижные стенки. Обычно их движение направлено навстречу или согласно с потоком. В конечном итоге задача сводится к системе нелинейных уравнений, корни которой являются постоянными величинами частного решения дифференциальных уравнений, описывающих линии тока элементарных струек потока пульпы:

$$U_{1y} = C_5 C_8 E_1 S_1 + C_6 C_8 E_2 S_1;$$

$$U_{1x} = C_5 C_8 E_3 + C_6 C_8 E_3;$$

$$0 = C_5 C_8 E_3 A_1 + C_6 C_8 E_3 A_2;$$

$$U_{2y} = C_1 C_4 E_4 + C_2 C_4 E_4;$$

$$U_{2x} = C_1 C_4 E_4 B_1 + C_2 C_4 E_4 B_2;$$

$$0 = C_4 C_1 E_5 S_2 + C_2 C_4 E_6 S_2,$$

где $C_1 \dots C_8$ - постоянные интегрирования, подлежащие определению; $E_1 \dots E_6$, B_1 , B_2 , S_1 , S_2 - величины, получаемые из граничных условий.

Решение системы уравнений осуществляется численно, например, методом Ньютона. Решение довольно быстро сходится. В более простых случаях (при неподвижных стенках) решение получается аналитически и коэффициенты находят из граничных функций распределения скоростей. Поскольку поток пульпы имеет развитое турбулентное течение, то эти функции описываются полиномами, степень которых подбирается экспериментально, а в первом приближении это будут параболы.

При поворотах потока пульпы возникают центробежные силы, соизмеримые с силой тяжести и турбулентных пульсаций, поэтому в потоке возникает расслоение твердой фазы. Так как это явление происходит на значительном расстоянии от магнитной системы, то влияние напряженности поля мало и флокуляция выражена в слабой форме, поэтому расслоение можно рассматривать анализируя узкие классы крупности частиц.

Уравнение траектории движения частиц в явном виде не выражается и расчет производится по методике, согласно которой: поток пульпы разбивается на слои фиксированной высоты. В каждом слое рассматривается движение каждого вида частиц с фиксированным значением магнитной восприимчивости α и крупности d . В общем случае из i -го слоя в j -й перейдет твердого в количестве

$$p_{ij} = \sum_{\alpha=0}^{\alpha_n} \sum_{i=1}^j \int_{d_{i\alpha}}^{d_{j\alpha}} p_{\alpha}(d) \delta d,$$

где $d_{ij\alpha}$ - размер частиц α -й магнитной восприимчивости, перешедших из i -го в j -й слой. $p_{\alpha}(d)$ - функция распределения частиц по крупности, фиксированного класса магнитной восприимчивости.

Расслоенный поток пульпы подвергается интенсивному разделению и извлечению на поверхность барабана.

На основании установленных закономерностей флокуляции и движения потока пульпы осуществлено исследование закономерностей извлечения сильномагнитной фракции в зоне сепарации и доизвлечения ее в концентричной зоне сепаратора, т.е. процесс

непосредственного формирования обеленного и обгащенного продуктов.

В зоне сепарации поток пульпы, как правило, имеет резкий поворот, а магнитное поле имеет градиент, направленный поперек вектору скорости потока пульпы, поэтому траектория извлекаемой флоккулы имеет сложный вид и в зависимости от соотношения магнитной и силы напора флоккулы либо попадает на поверхность барабана, либо в концентричную зону (зону доизвлечения магнитного продукта и удаления немагнитного). Извлечение сильномагнитной фракции происходит по всей ширине зоны сепарации, поэтому извлеченная масса располагается в ней слоем переменной толщины. Кроме того, средняя скорость потока пульпы в ней увеличивается по направлению ко входу в концентричную зону, достигая больших значений. Флоккулы же формируются в потоке с относительно малыми скоростями, поэтому в области входа в концентричную зону происходит частичное разрушение флоккул и вынос магнитной фракции в нее. Таким образом, в концентричной зоне магнитный продукт представлен малыми флоккулами и отдельными частицами в результате чего анализировать извлечение в ней можно путем анализа сил на отдельные частицы.

Многополюсная магнитная система с полюсами чередующейся полярности создает условия для переориентации прядей сгущенной магнитной массы, что способствует захвату немагнитных частиц в уже извлеченный продукт. Количество захваченного таким образом продукта зависит от размера прядей, соотношения скоростей потока пульпы и поверхности барабана, количества немагнитного материала, шага полюсов магнитной системы.

При значительных производительностях или при малых оборотах барабана образуется слой сгущенной извлеченной массы значительной толщины и гидростатическое давление пульпы разрушает его у входа в концентричную зону, вынося магнитный продукт в последнюю. Следовательно, доизвлечению подвергается продукт, смытый с поверхности барабана и флоккул. Недоизвлеченные частицы из этого продукта формируют качество обеленного продукта:

$$\bar{d} = \frac{\sum_{\alpha=0}^{\alpha_M} W_{\alpha} d_{\alpha}}{\sum_{\alpha=0}^{\alpha_M} W_{\alpha}} ;$$

$$W_{\alpha} = \Delta h / h \bar{W}'_{k3} \sum_{x=h}^0 \int_0^{\alpha} d_{k3\alpha} P_{\alpha}(d) \partial d$$

где h - высота концентричной зоны; W'_{K3} - количество занесенного продукта из зоны сепарации; $d_{гk3\alpha}$ - граничное значение крупности частиц α -й магнитной восприимчивости, извлекаемой в концентричной зоне.

Рассматривая траекторию движения частицы узкого класса крупности и сравнивая расстояние, проходимое ею до встречи с поверхностью барабана L_i с длиной концентричной зоны L_{K3} , оцениваем будет ли частица извлечена или нет, если $L_i < L_{K3}$, то частицы извлекаются; в противном случае - нет.

Суммируя количественные характеристики неизвлекаемых частиц с заданными качественными показателями, получим значение качества обедненного продукта. Извлеченные частицы внесут свою долю в качество обогащенного продукта.

Выход обогащенного продукта будет складываться из частиц доизвлеченных в концентричной зоне и сфлуккулированных при движении в ванне сепаратора. Разубоживать обогащенный продукт будут нерудные зерна, захваченные при флокуляции, извлечении частиц и при вращении прядей на поверхности барабана. Оценив численно все упомянутые явления, получим значение качества обогащенного продукта

$$\beta = \frac{\alpha_{\phi} \gamma_{\phi} + \alpha_{K3} \gamma_{K3}}{\gamma_{\phi} + \gamma_{K3} + \gamma_{нцр} + \rho_{нзк}} ;$$

$$\rho_{нзк} = L_{зс} L_{\delta} u_{\delta} a \rho_T \rho_{нз} / (3 S_{пол} W_{и});$$

$$\gamma_{нцр} = L_{\delta} L_{цр} u_{\delta} a / S_{пол} (\rho_{ни} + \rho_{н}(r_0)) (\delta_{п}(r_0) + \delta_{пцр}) / 4 Q_{и};$$

$$\gamma_{K3} = 1 - W_{\alpha} / W_{K3}; \quad \gamma_{\phi} = 1 - W_{K3} / W_M;$$

$L_{зс}, L_{\delta}, L_{цр}$ - длина зон сепарации, барабана и циркулирующего потока в области выхода сгущенного продукта из контакте с пульпой; a - размер флокулы; u_{δ} - скорость поверхности барабана; $\rho_T, \rho_{нз}$ - содержание твердой фазы и нерудных зерен; $W_{и}$ - объемная производительность сепаратора; $\rho_{нц}, \rho_{ни}$ - содержание немагнитных частиц в исходном потоке и в циркулирующем потоке; $\delta_{п}(r_0), \delta_{пцр}$ - плотности пульпы в этих потоках; W_{α}, W_{K3}, W_M - объемный расход продукта α -го класса магнитной восприимчивости, твердого в концентричной зоне, маг-

ния ценного компонента в сростках, который разделяет те из них, которые переходят в обогащенный и обедненный продукт; по результатам теоретического определения раскрытия рудного минерала находятся значения максимально возможного качества обогащенного продукта β_{max} , при ограничениях на потери в хвостах. Сравнивая качество обогащенного продукта, полученное на реальном сепараторе β и β_{max} , можно судить о совершенстве конструкции магнитного сепаратора.

Для определения закономерностей изменения качества концентрата от изменения параметров сепараторов требуется моделирование замкнутых циклов измельчения (ЗЦИ), Расчет которых осуществляется итеративным способом. Первоначально предполагается, что существует поток руды, а песков нет. На выходе мельницы после моделирования получают функцию распределения частиц по крупности. Моделируя классификацию, получают некоторое количество песков $Q_{п}$ и слива $Q_{с}$. Теперь на вход мельницы поступают пески и руда, изменяется функция распределения крупности на входе мельницы. Снова моделируется измельчение и классификация и определяются характеристики продукта, поступающего со слива мельницы. Циклы моделирования повторяются до тех пор пока $Q_{с}$ станет равным $Q_{п}$. Решение сходится за 7-11 циклов.

Моделирование всей ТЛО производится последовательным применением моделей ЗЦИ до тех пор, пока качество обогащенного продукта не станет равным заданному качеству концентрата. По результатам моделирования установлено: отклонение качества исходного сырья на 0,5 % является существенным; допустимое изменение производительности на выходе первого блока - в 2 раза; барабанные сепараторы дают возможность изменять производительность по твердому в 5-6 раз без существенного изменения качества обогащенного продукта; ограниченные возможности технологических аппаратов ограничивают максимально возможное качество обогащенного продукта при известных характеристиках качества исходного сырья; для каждой технологической цепи аппаратов пространство изменения показателя качества исходного сырья (ПКИС) разделяется на три подобласти, где: невозможно выйти на уровень $\beta_{кз}$ и выше; путем подстройки режимных параметров возможен выход на уровень $\beta_{кз}$; выход на уровень $\beta_{кз}$ возможен за меньшее

Таблица 2

	I	2	3	4	5	6	7	8
Соотношение типов руд, М/Е	<u>65</u>	<u>72</u>	<u>42</u>	<u>82</u>	<u>82</u>	<u>74</u>	<u>79</u>	<u>63</u>
	35	28	58	18	18	26	21	37
Содержание железа, %	34,3	36	31,6	35	36,4	34,6	33,8	36,1
Производитель- ность, т/ч	146	162	136	157	165	158	160	158
Содержание кл. - 0,063 в сл. кл-ра, %	37,8	35,6	42,6	47,6	46	32,1	45	45,4
% твердого, %	56	58	48	49	50	63	49	44
Содержание кл. - 0,063 в сл. г/ц, %	84	79	86	91	89,7	67,2	80	88,7
% твердого, %	14	13	11	14,5	14	18	18	10
Содержание железа 1-й ст, э/р	<u>50,1</u>	<u>48,6</u>	<u>50,3</u>	<u>55,6</u>	<u>52,1</u>	<u>51,7</u>	<u>52,8</u>	<u>47,3</u>
	52,5	47	48,8	53	51,6	50,6	52,6	49,4
Содержание э/р железа в концентрате, %	<u>64,6</u>	<u>64,8</u>	<u>65,3</u>	<u>64</u>	<u>64,6</u>	<u>64,2</u>	<u>65</u>	<u>64,5</u>
	64,7	62,8	65,6	66,5	62,5	63,6	63,9	64,0

М-шахта магнетитовая, Е- шахта Естониинская, э- эксперимент, р- расчет.

количество стадий измельчения.

Проверка теоретических построений, приведенных в данной работе проводилась по результатам эксплуатации всей совокупности моделей для прогноза выходных показателей технологической линии обогащения магнетитовых руд. Результаты прогноза оказались удовлетворительными (табл.2) с точностью не ниже 5 % отн.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-исследовательской работой, в которой осуществлено теоретическое обобщение и решение научной проблемы, имеющей важное народнохозяйственное значение и заключающееся в разработке алгоритмов математического моделирования процесса мокрого магнитного обогащения с целью прогнозирования выходных показателей работы магнитных сепараторов и выбора их конструктивных и режимных параметров. В результате выполненных исследований разработана система математических моделей отдельных процессов, происходящих в магнитном сепараторе при разделении ценного компонента и нерудной фазы; выполнена их унификация для возможности согласования при синтезе общей модели магнитного сепаратора произвольной конструкции. При этом получены следующие результаты:

1. Созданы теоретические основы прогнозирования количественных оценок показателей раскрытия рудного минерала при дроблении руд с нерудными прослоями или пятнистой макротекстурой и при измельчении руд с вкрапленной микротекстурой. Установленные закономерности позволяют также оценивать показатели раскрытия во вторых и последующих стадиях измельчения. Все вместе дает возможность только по результатам раскрытия оценивать предельно возможные показатели обогащения и эффективность обогатительных аппаратов. Эти задачи решены методом конечных элементов в виде двух подпрограмм: для первого измельчения и для последующих стадий с вычислением выхода богатых и бедных сростков, открытых рудных и нерудных зерен, содержания магнетита в обоих видах сростков.

2. Предложена модель флокулообразования в постоянном магнитном поле, позволяющая проследить весь процесс от зарож-

дения агрегатов до сформировавшейся флюкулы. С помощью этой модели можно вычислять размеры флюкул в любой части ванны магнитного сепаратора. Поскольку размер флюкулы является основной характеристикой, определяющей показатели захвата нерудной фазы в магнитный продукт, то решение данной задачи служит основой для выбора режимных параметров процесса обогащения и конструктивных параметров магнитного сепаратора при разработке новых типов и модернизации их.

3. Методом статистического моделирования найдена функция распределения силы взаимодействия магнитных частиц как случайной совокупности и зависимость среднего значения этой силы от расстояния между частицами. Установлено, что эта сила имеет логарифмическое нормальное распределение. Установленные соотношения позволяют оценить силы зацепления нерудных частиц на поверхности флюкулы для определения требуемых значений механических сил, способствующих вымыванию нерудной фазы из магнитного продукта для повышения качества обогащенного продукта.

4. Найдены математические соотношения, которые позволяют определить максимальные размеры флюкул в переменном и постоянном магнитных полях. С помощью этих соотношений проведено исследование по определению возможности нефлюкулирующего разделения сильномагнитных материалов и получен вывод о необходимости высокой турбулентности, что заставляет отказаться от перспективы использования постоянных магнитных полей для получения эффективных сепараторов.

5. Установлены зависимости, позволяющие оценить количество захватываемого нерудного компонента при флюкуляции в пульпах различной консистенции, из которых следует, что при флюкуляции всегда есть отличная от нуля вероятность захвата и она тем выше, чем больше размер флюкул. Эти зависимости позволили промоделировать изменение качества магнитной массы в переменном магнитном поле совместно с противоточным водным режимом и сделать вывод о перспективном использовании переменных магнитных полей для получения чистых концентратов.

6. Обоснованы пять конструкций магнитных сепараторов и анализаторов.

7. Приняты к использованию методики вычисления прогнози-

руемых показателей разделения в сепараторах со слабым магнитным полем институтом Гипромашобогатение и Уралмеханобр. Институтом Днепрочерметавтоматика использованы методики вычисления раскрытия рудного минерала для обоснования систем управления технологической линией обогащения железных руд. Принята к эксплуатации методика вычисления качества концентрата и других показателей обогащения Высокогорским рудоуправлением. Экономический эффект от применения разработанных моделей и методик может быть получен за счет снижения объема экспериментальных исследований при проектировании, снижения времени на конструкторскую проработку магнитных сепараторов, снижения объема экспериментов при подборе технологических режимов на действующих обогатительных фабриках и при оперативном управлении обогатительным процессом. Экономический эффект от снижения количества экспериментов центральной заводской лабораторией Высокогорского РУ составил 45 тыс. руб. на 1990 г.

Основные положения диссертации опубликованы
в работах

1. Марюта А.Н., Младецкий И.К., Новицкий П.А. Магнитный сепаратор, а.с. 496047 (СССР). - Оpubл. 25.12.75. Бюл. № 47 // Открытия, изобретения. 1976.

2. Марюта А.Н., Младецкий И.К., Новицкий П.А. Исследование возможных путей заноса магнитного продукта в концентричную зону полупротивоточных и противоточных сепараторов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 1975. - № 4. - С. 109-114.

3. Марюта А.Н., Младецкий И.К., Новицкий П.А. Определение порога флокуляции магнитного материала твердой фазы пульпы // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 1974. - № 3. - С. 93-98.

4. Марюта А.Н., Младецкий И.К., Новицкий П.А. Усреднение исходной руды с позиций эффективности ее измельчения // Изв. вузов. Цветная металлургия. - 1974. - № 4. - С. 3-7.

5. Марюта А.Н., Младецкий И.К., Новицкий П.А. Исследование магнитных сепараторов как объектов автоматического управления // Изв. вузов. Горный журнал. - 1972. - № 7. - С. 151-157.

6. Марюта А.Н., Младецкий И.К., Новицкий П.А. Определение статической характеристики магнитного сепаратора по потерям магнетита в хвостах // Изв.вузов. Горный журнал. - 1973. - № 5. - С. 154-158.

7. Младецкий И.К. Исследование раскрытия вкрапленного рудного минерала для управления сепарацией // Докл. 3-й междунар. конф.: Автоматизация горнодобывающей промышленности. - Варна, Болгария. - 1976. - С. 79-80.

8. Младецкий И.К. Оценка раскрытия вкрапленного рудного минерала // Изв.вузов. Горный журнал. - 1977. - № 8. - С. 134-139.

9. Младецкий И.К. Математические модели раскрытия рудного минерала шаровым измельчением // Докл. респ. научн.-техн. конф.: Пути повышения качества продукции горнорудных предприятий. - Кривой Рог. - 1977. - С. 69-70.

10. Младецкий И.К. Структура пульпы при движении ее в ваннах магнитных сепараторов // Изв.вузов. Горный журнал. - 1980. - № 3. - С. 102-106.

11. Младецкий И.К. Оценка необходимой крупности помола руды // Изв.вузов. Горный журнал. - 1980. - № 2. - С. 102-106.

12. Младецкий И.К. Оценка флокуляции сильномагнитного минерала в полях магнитных сепараторов // Физико-технические пробл. разраб. полезн. ископаемых. - 1979. - № 6. - С. 101-106.

13. Младецкий И.К. Оценка распределения скоростей пульпы в ваннах магнитных сепараторов // Обогащение полезных ископаемых. - Киев. - 1980. - Вып. 26. - С. 45-50.

14. Младецкий И.К. Изменение среднего размера частиц руды внутри шаровой мельницы // Обогащение полезных ископаемых. - Киев. - 1981. - Вып. 28. - С. 16-19.

15. Младецкий И.К., Остров Ю.М., Красуля А.Ю. Управление распределением нагрузок между стадиями измельчения при обогащении магнетитовых руд // Обогащение полезных ископаемых. - Киев. - 1981. - Вып. 28. - С. 92-94.

16. Младецкий И.К., Султанович Е.А., Кармазин В.И., Молчанова А.И. Оценка разрушения флокул в водной среде // Обогащение полезных ископаемых. - Киев. - 1980. - Вып. 27. - С. 49-54.

17. Марюта А.Н., Младецкий И.К., Новицкий П.А. Магнитные сепараторы как объекты управления // Автоматическая оптимизация процесса обогащения руд на магнитообогатительных фабриках. - М. - Недра. - 1976. - С. 126-160.

18. Младецкий И.К. Выбор начальных условий при проектировании магнитных сепараторов // Обогащение полезных ископаемых. - Киев. - 1982. - Вып. 30. - С. 65-71.

19. Младецкий И.К., Марюта А.Н. Выбор и обоснование критерия управления магнитными сепараторами в АСУТП линии обогащения железных руд // Обогащение полезных ископаемых. - Киев. - 1982. - Вып. 30. - С. 100-106.

20. Младецкий И.К. Распределение ценного минерала по сроткам измельченного продукта различных классов крупности // Изв. вузов. Горный журнал. - 1982. - № 4. - С. 107-111.

21. Младецкий И.К., Султанович Е.А. Выбор напряженности магнитного поля для предварительной флокуляции магнетита перед сепарацией // Обогащение полезных ископаемых. - Киев. - 1982. - Вып. 31. - С. 58-62.

22. Благодатный В.М., Глизбург В.К., Гапоненко В.И., Дьяков Г.И., Вахмут Н.С., Султанович Е.А., Младецкий И.К. Магнитный сепаратор. А.с. 952339 (СССР). - Оpubл. 23.08.82. Бюл. № 31 // Открытия, Изобретения. - 1982.

23. Младецкий И.К. Оценка начальной силы взаимодействия магнитных частиц пульпы в магнитном поле // Обогащение полезных ископаемых. - Киев. - 1983. - Вып. 33.

24. Младецкий И.К. Определение вероятности захвата немагнитного пролукта при флокуляции магнетита // Обогащение полезных ископаемых. - Киев. - Вып. 33.

25. Младецкий И.К., Султанович Е.А. Влияние магнитных свойств магнетита на показатели обогащения руд в магнитных сепараторах // Обогащение полезных ископаемых. - Киев. - 1983. - Вып. 32. -

26. Младецкий И.К. Максимальный размер флокул при мокрой магнитной сепарации // Обогащение полезных ископаемых. - Киев. - 1984. - Вып. 34. - С. 63-66.

27. Младецкий И.К., Марюта А.Н. Моделирование процесса магнитной сепарации руд // Киев - Донецк. - Вища школа. - 1984. - 136 с.

28. Младенский И.К., Новицкий П.А. Обоснование текстурно-структурных ограничений технологической линии обогащения железных руд. // Изв. вузов. Горный журнал. - 1986. - № 2. - С. 113-116.

29. Младенский И.К., Благодатный В.М. Обоснование максимально возможного качества обогащенного продукта // Изв. вузов. Горный журнал. - 1986. - № 5. - С. 100-103.

30. Младенский И.К., Новицкий П.А., Особенности и выбор стратегий управления технологической линией обогащения железных руд. // Деп. рук. ЦНИИТЭИЧМ. - 1986. - № 3459-УМ. - 58 с.

31. Бикбов А.А., Кинжитаев Б.З., Лагутин А.Е., Жильцов А.В., Щевцов В.А., Младенский И.К. Барабанный магнитный сепаратор. А.с. 1424869. - 1986.

32. Благодатный В.М., Бабенко В.И., Дьяков Г.Н., Бахмут Н.С., Старосветский Л.Л. Магнитный сепаратор. А.с. 952339. - 1987.

33. Бикбов А.А., Кинжитаев Б.З., Воробьев В.Д., Младенский И.К., Лагутин А.Е. Магнитный сепаратор. А.с. 1479107. - 1988.

34. Кинжитаев Б.З., Бикбов А.А., Младенский И.К., Лагутин А.Е. Оценка захвата немагнитной фазы при сепарации сильно-магнитного продукта // Деп. рук. в ЦНИИТЭИЧМ. - 1987. - 12 с.

35. Младенский И.К., Бикбов А.А. О закономерностях поведения сгущенной магнитной массы рудных частиц в переменном магнитном поле // Обогащение полезных ископаемых. - Киев. - 1987. - Вып. 37. - С. 82-88.

Личный вклад соискателя в работы, опубликованные в соавторстве: / 1 / - разработан один признак изобретения; / 2,3,4, 5,6 / - обоснование алгоритмов расчета; / 15 / - предложена методика исследования; / 16 / - предложена методика расчета; / 17 / - участие в подготовке раздела 4; / 19 / - предложено обоснование критерия; / 21,25 / - предложена методика выбора; / 22 / - обоснован один признак изобретения; / 27 / - подготовка глав 2, 3, 4, 5, 6; / 28,30 / - моделирование работы технологии обогащения руд; / 29 / - обоснование критерия максимального качества; / 31;32,33 / - обоснован один признак изобретения; / 34,35 / - обоснование алгоритма расчета.

Младенский

Автореферат

Основы прогнозирования выходных показателей...

Ответственны й за выпуск: Бондаренко В.И.
Подписано к печати 12.II.92. Формат 60x84/16. Бумага офсетная.
Офсетная печать. Усл.печ.л. 1,86. Усл.кр.отт. 1,86. Тираж 100.
Заказ 104.

Издательско-полиграфическое арендное предприятие "Днипро".
ИИП "Днипро" г.Днепропетровск, ул.Серова, 7.

468904

Ab 26.252

AB 26.252