

На правах рукописи



**ФОМИН АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ**

**НАУЧНОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ  
ТЕХНОЛОГИИ ГРАВИТАЦИОННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ  
ГЕМАТИТСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ В ПОТОКАХ МАЛОЙ  
ТОЛЩИНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧИСЛЕННОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность 2.8.9 – «Обогащение полезных ископаемых  
(технические науки)»

Автореферат диссертации на соискание  
учёной степени кандидата технических наук

Апатиты - 2022

Работа выполнена в Горном институте - обособленном подразделении Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра "Кольский научный центр Российской академии наук" (ГоИ КНЦ РАН)

Научный руководитель: ведущий научный сотрудник лаборатории «Новых технологических процессов и аппаратов» ГоИ КНЦ РАН.

Официальные оппоненты: **Газалеева Галина Ивановна**, доктор технических наук, заместитель генерального директора по аналитической работе АО «Уралмеханобр»

**Ануфриева Светлана Ивановна**, кандидат химических наук, заведующий технологическим отделом ФГБУ «ВИМС»

**Ведущая организация** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земной коры СО РАН (ИЗК СО РАН)

**Хохуля Михаил Степанович**, кандидат технических наук,

Защита диссертации состоится «19» апреля 2022 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.1.096.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук (ИПКОН РАН) по адресу: 111020, Москва, Крюковский тупик, 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИПКОН РАН: <http://ипконран.рф>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,  
доктор технических наук

Матвеева Т.Н.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Современное развитие железорудной отрасли России в значительной мере характеризуется вовлечением в переработку сырья с низким содержанием массовой доли железа, тонкой вкрапленностью рудных минералов, близкими физико-механическими свойствами, что существенно осложняет увеличение объемов выпуска качественных концентратов и получение высоких технико-экономических показателей производства.

В связи с отработкой большей части наиболее легкообогатимых богатых железных руд, в переработку поступает бедный тонковкрапленный материал сложного вещественного состава. Данное обстоятельство обуславливает необходимость развития ресурсосберегающих технологий обогащения, обеспечивающих комплексное выделение ценных компонентов, эффективное разделение тонких фракций перерабатываемого сырья, обладающего низкой себестоимостью обогащения, а также отвечающих современным требованиям экологической безопасности.

Для окисленных железистых кварцитов месторождений Заимандровского района наблюдается сокращение запасов минерально-сырьевой базы, характеризующейся снижением содержания различных форм железа в добываемых рудах. Эффективность функционирования обогатительного предприятия железорудной отрасли с целью увеличения продолжительности его деятельности в первую очередь связана с реализацией комплекса мероприятий, обеспечивающих полноту и комплексность извлечения полезных компонентов из руд действующих месторождений с одновременным улучшением качества выпускаемого железорудного концентрата. Одним из направлений решения данной проблемы является повышение эффективности гравитационного цикла получения гематитового концентрата, который характеризуется высокими потерями тонких фракций ценного минерала с отвальными хвостами и низким качеством выделяемого концентрата.

Необходимость совершенствования технологий гравитационного обогащения железорудного сырья, в частности, окисленных железистых кварцитов, состоящих из тонкозернистого материала, требует проведения исследований по изучению закономерностей разделения тонких фракций частиц при реализации гравитационных процессов в потоках малой толщины. Нераскрытым остается потенциал и в использовании явления сегрегации при разделении таких минеральных частиц. Возникает необходимость исследования этого процесса и практического оформления его результатов. Развитие теоретических основ обогащения мелких фракций руды возможно осуществить путем использования современных методов моделирования с привлечением методов вычислительной гидродинамики.

Таким образом, актуальность работы обусловлена необходимостью повышения полноты и комплексности обогащения железорудного сырья оптимизацией гравитационного извлечения тонких фракций ценных минералов.

**Объект исследований** – процессы гравитационного обогащения гематитсодержащего минерального сырья в винтовых потоках малой толщины.

**Предмет исследований** – закономерности сегрегационного разделения минеральных частиц на винтовых аппаратах и факторы, влияющие на ее эффективность.

**Цель работы** – научное обоснование, разработка и апробация способов повышения эффективности выделения тонких фракций гематита из железорудного сырья

с использованием винтовой сепарации, обеспечивающих снижение потерь полезного компонента с отвальными хвостами и повышение качества конечного гематитового концентрата.

**Идея работы** заключается в использовании закономерностей сегрегационного разделения минеральных частиц на винтовых аппаратах, установленных на основе численного моделирования, для повышения эффективности обогащения тонких фракций железорудного сырья.

**Задачи исследований:**

1. Изучить вещественный состав и минералого-технологические особенности гематитсодержащего сырья, получаемого при переработке окисленных железистых кварцитов, для выбора и обоснования способов их гравитационного обогащения.

2. На основе численного моделирования определить закономерности движения минеральных частиц различной крупности и плотности на рабочей поверхности винтовых аппаратов и гидродинамические особенности процесса винтовой сепарации.

3. Разработать методику количественной оценки явления сегрегации и выявить закономерности данного процесса на базе численного моделирования винтовой сепарации с определением факторов, оказывающих влияние на эффективность сегрегации минеральных частиц.

4. Разработать и обосновать новые технологические решения для гравитационного обогащения тонких минеральных частиц на основе выявленных закономерностей их гравитационного разделения.

5. Провести опытные и промышленные испытания предлагаемых технологических решений по повышению эффективности гравитационного обогащения тонких фракций минерального сырья для внедрения их на действующем производстве.

**Методы исследований:** обобщение и анализ научно-технической информации; гранулометрический, минералогический, химический методы анализа, определение степени раскрытия минералов; методы вычислительной гидродинамики и дискретных элементов; лабораторные и промышленные исследования по обогащению с использованием винтовой сепарации, концентрации на столе, центробежной концентрации, высокоинтенсивной магнитной сепарации, методов рудоподготовки; статистические методы обработки результатов.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Численная модель винтовой сепарации, основанная на системе дифференциальных уравнений неразрывности и сохранения импульса, модифицированных для учета многофазности разделительной среды, генерации и диссипации турбулентной кинетической энергии, а также уравнений баланса сил, действующих на минеральные частицы, решаемых методом конечных объемов, позволяет с требуемой точностью определить качественно-количественные показатели обогащения минерального сырья и гидродинамические параметры разделения.

2. Установлены закономерности сегрегации минеральных частиц по плотности по высоте винтового потока малой толщины:

- увеличение содержания твердого в питании винтового аппарата обеспечивает повышение эффективности сегрегации;

- уменьшение кривизны профиля поперечного сечения винтового желоба, способствует интенсификации сегрегации мелких фракций минеральных частиц.

3. Обоснованы направления повышения эффективности гравитационного разделения гематитсодержащего сырья Заимандровской группы месторождений:

- в качестве основного способа обогащения немагнитной фракции с переменным содержанием ценного компонента целесообразно использование двухстадиальной винтовой сепарации с выделением на первой стадии объединенного концентрата и промпродукта для стабилизации качественно-количественных показателей при получении гематитового концентрата, а также применение винтовых аппаратов с поперечным профилем в виде слабонаклонной кривой для повышения эффективности обогащения тонких фракций исходного питания;

- с целью раскрытия сростков ценного минерала в промежуточном продукте винтовой сепарации и получения из него концентрата кондиционного качества необходимо его доизмельчение до крупности менее 0,2 мм в шаровой мельнице с последующим дообогащением на винтовом шлюзе;

- доводочные операции следует производить с использованием концентрационного стола, что обеспечивает стабильное получение гематитового концентрата с содержанием железа общего не менее 62% при сквозном извлечении гематитового железа около 75% и более высокие качественно-количественные показатели по сравнению с винтовой сепарацией и высокоинтенсивной магнитной сепарацией.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** подтверждается большим объемом экспериментальных исследований, сопоставимостью результатов, вычислительных, лабораторных экспериментов и промышленных испытаний в условиях действующего производства, оценкой полученных данных методами математической статистики, применением современного программного обеспечения, оборудования и средств измерения.

**Научная новизна результатов** состоит в следующем.

1. Разработана методика моделирования винтовой сепарации, основанная на применении математического аппарата методов вычислительной гидродинамики, позволяющая прогнозировать качественно-количественные показатели обогащения при различных режимах разделения минерального сырья, а также определять гидродинамические параметры потока суспензии.

2. На основании разработанного метода количественной оценки эффекта сегрегации в винтовых потоках малой толщины выявлена зависимость эффективности процесса сегрегации минеральных частиц по плотности от массовой доли твердого в исходном питании и профиля поперечного сечения винтового аппарата.

3. Установлено, что повышение качественно-количественных показателей гравитационного обогащения тонких фракций минерального сырья на винтовых аппаратах достигается за счет интенсификации эффекта сегрегации.

**Практическая значимость работы**

1. Предложена компьютерная модель процесса винтовой сепарации гематитсодержащего сырья, на основании расчета которой выполнена оценка ее эффективности и даны рекомендации к ее практической реализации.

2. В промышленных условиях испытана и рекомендована к внедрению технология винтовой сепарации гематитсодержащего промпродукта основной магнитной сепарации АО «Олкон», обеспечивающая повышение качественно-количественных показателей его переработки.

3. Выбраны и обоснованы конструктивные параметры винтовых аппаратов, оптимальные режимы разделения винтовой сепарацией, концентрацией на столе, а также рудоподготовки промежуточных продуктов, которые обеспечивают эффективное выделение гематита из исходного питания в получаемый концентрат.

4. Разработана гравитационная технология обогащения промпродукта магнитной сепарации, в настоящее время поэтапно реализуемая на АО «Олкон», которая обеспечивает существенный прирост качества гематитового концентрата с 45% до 62% по железу общему и извлечения гематита на величину около 35%, что в результате обеспечит увеличение объемов получаемого концентрата на уровне 75 тысяч тонн в год.

#### **Реализация результатов работы**

Разработанная методика численного моделирования использована в научно-исследовательских работах, выполненных для промышленного предприятия, с целью обоснования целесообразности внедрения винтовой сепарации в цикле получения гематитового концентрата.

Разработанная гравитационная технология получения гематитового концентрата принята к внедрению на обогатительной фабрике АО «Олкон» и частично реализована на ряде секций фабрики.

#### **Апробация работы**

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на 10 международной научной школе молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (Москва, 2013); на научно-технической конференции с участием иностранных специалистов «Экологическая стратегия развития горнодобывающей отрасли – формирование нового мировоззрения в освоении природных ресурсов» (Апатиты, 2014); на VI школе молодых ученых «Геотехнология и обогащение полезных ископаемых» (Апатиты, 2015); на 12 международной школе молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (Москва, 2015); на XIV конференции пользователей CADFEM/ANSYS (Санкт-Петербург, 2017); на X научно-практической конференции с международным участием «Цифровая трансформация экономики и промышленности» ИНПРОМ-2019 (Апатиты, 2019); на международной конференции «Инновационные процессы комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья» Плаксинские чтения – 2020 (Апатиты, 2020), Международной конференции «Проблемы комплексной и экологически безопасной переработки природного и техногенного минерального сырья» Плаксинские чтения – 2021 (Владикавказ, 2021).

#### **Публикации**

Основные положения диссертации опубликованы в 16 работах, в том числе в 7 статьях в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК.

**Личный вклад автора** заключается в постановке и обосновании цели и идеи исследования, формулировке задач; анализе научно-технической литературы по теме диссертации; разработке методики компьютерного моделирования для прогнозирования технологических показателей обогащения; проведении лабораторных экспериментов и промышленных испытаний; обработке и интерпретации результатов численного моделирования; разработке эффективной схемы переработки, направленной на повышение качественно-количественных показателей обогащения; написании текстовой части публикаций и докладов.

Объем и структура работы диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 82 наименований, содержит 155 страниц машинописного текста, 66 рисунков, 27 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель и задачи исследований, представлены защищаемые научные положения и общая характеристика результатов исследования.

**Анализ современного состояния исследований по изучению сегрегации материала при гравитационной переработке различных руд**

**В первой главе** приведено современное состояние исследований по изучению явления сегрегации и практики использования гравитационных аппаратов для сегрегационного разделения тонких фракций руд.

Эффект сегрегации при гравитационном обогащении проявляется в таких процессах как: отсадка, обогащение на шлюзах и суживающихся желобах, винтовая сепарация, концентрация на столах и центробежная концентрация. Основным недостатком, характерным для данного оборудования является высокий уровень потерь ценных минералов с тонкими фракциями руд и материалов крупностью от 0,1-0,2 мм (отсадочные машины, шлюзы, желоба) до 0,04 мм (винтовые аппараты и концентрационные столы).

Исследованием явления сегрегации в различное время занимались такие ученые как Ф. Дайер, В.П. Лященко, В.М. Бочковский, Р.Л. Браун, Б.В. Кизевальтер, И.И. Блехман, Г.Ю. Джанелидзе, В.Я. Хайман, А.Д. Учитель, Е.А. Непомнящий, Е.С. Лапшин, В.П. Надутый, И.Н. Исаев, С.И. Полькин, В.Д. Иванов, А.В. Богданович, А.М. Васильев, А.Е. Пелевин. Исследователи отмечают влияние крупности, плотности и формы разделяемых частиц на данный процесс и связывают его с взаимными столкновениями между частицами, колебаниями рабочей среды или поверхности, а также действием турбулентных вихрей. Тем не менее, данный феномен до настоящего времени не имеет удовлетворительного теоретического описания, отсутствует адекватная модель данного процесса.

С развитием современного программного и аппаратного обеспечения все большее применение находит численное моделирование процесса разделения гетерогенных сред, основанное на методах вычислительной гидродинамики. Большинство работ по численному моделированию процессов гравитационного разделения выполнены за рубежом следующими исследователями: К. Гальвин, С. Разиех, М. Нарашима, М. Дохэйм, Б. Мэтьюс, Б. Мишра, К. Солнордэл, Ю. Ся. Разработаны модели таких аппаратов как гидравлический сепаратор и гидроциклон, предприняты попытки моделирования отсадки и винтовой сепарации с рядом упрощений. Однако, зачастую представленные результаты исследований носят предварительный характер и не позволяют в полной мере исследовать кинетику разделения минеральных частиц и определить качественно-количественные показатели обогащения в силу определенных ограничений разработанных моделей, также ряд авторов не приводят каких-либо экспериментальных данных, подтверждающих соответствие модели реальному процессу разделения.

Таким образом, численное моделирование процессов гравитационного обогащения минерального сырья с целью повышения эффективности разделения тонких фракций руд на основании изучения закономерностей явления сегрегации является актуальным и перспективным направлением исследований.

### **Теоретическое описание компьютерного моделирования на базе методов вычислительной гидродинамики**

**Во второй главе** приведены методики численного моделирования гравитационных винтовых обогатительных аппаратов.

Механика газо- и гидротоков строится на основе законов сохранения массы и импульса (уравнения Навье-Стокса). Данные уравнения применимы для моделирования однофазной среды разделения, однако в большинстве гравитационных процессов обогащения, когда в рабочем объеме аппарата присутствует более одной непрерывной фазы: вода и воздух; моделирование данных устройств без учета взаимодействия данных сред ведет к неточным результатам расчета. В данном случае необходимо использовать уравнения сохранения массы и импульса в формулировке многофазного многоскоростного континуума. Одной из наиболее универсальных моделей в данном подходе является модель Эйлера, которая позволяет получать достоверные результаты при различных концентрациях первичной и вторичной фазы. Многофазная модель Эйлера позволяет описать поведение нескольких отдельных взаимодействующих фаз.

Рассматриваемая модель применима только при ламинарном течении, в реальных процессах гравитационного обогащения зачастую присутствуют и течения в переходном и турбулентном режимах, для описания которых разработан ряд моделей турбулентности. Для моделирования течений в объеме обогатительного оборудования наиболее часто применяется  $k-\epsilon$  модель, которая дает адекватные результаты в широком диапазоне чисел Рейнольдса и не требует значительного увеличения вычислительных ресурсов. В основу данной модели заложены уравнения Рейнольдса – уравнения Навье-Стокса, усредненные по Рейнольдсу. В данном подходе скорость жидкости декомпозируются на усредненную и флуктуирующую компоненты.

Предложенные модели применяются для описания поведения непрерывных сред, таких как вода и воздух. Для моделирования движения частиц материала в гравитационных аппаратах используется модель дискретных элементов (модель Лагранжа). Совместный расчет моделей Эйлера и Лагранжа позволяет описать поведение суспензии в рабочем объеме обогатительного аппарата. Жидкая фаза рассматривается как многофазный многоскоростной континуум и моделируется на основе решения уравнений Навье-Стокса, расчет траектории движения большого числа дискретных частиц позволяет описать поведение диспергированной фазы. Расчет траектории движения дискретной частицы производится на основе уравнения баланса сил, действующих на частицу.

Для описания столкновений частиц материала между собой и со стенками расчетной области используется модель столкновений дискретных элементов. Метод дискретных элементов применим для описания поведения гранулированного материала с большим объемным содержанием частиц, где взаимодействие частица-частица играет важную роль.

Все перечисленные математические выражения являются системой нелинейных дифференциальных уравнений, имеющих аналитическое решение лишь в очень простых случаях. Вычислительная техника позволяет выполнять такие расчеты при помощи



приближенных численных методов. Метод конечных объемов является одним из них, это один из наиболее эффективных численных методов решения математических задач, описывающих состояние физических систем сложной структуры и состоит из:

- разбиения расчетной области на дискретные контрольные объемы на основе расчетной сетки;

- интегрирования определяющих уравнений на отдельных контрольных объемах с целью составить алгебраическое уравнение для дискретных переменных как скорости, давление и др.;

- линеаризации дискретизированных уравнений и решение системы линейных уравнений, получившихся в итоге, с целью получения обновленных значений переменных.

Таким образом, разработка численной модели процесса или аппарата на базе методов вычислительной гидродинамики состоит из последовательных этапов:

1. Постановка задачи моделирования.
2. Создание геометрии исследуемого объекта.
3. Генерация расчетной сетки.
4. Задание необходимых физических, начальных и граничных условий моделирования.
5. Расчет модели.
6. Анализ результатов моделирования.

### **Численное моделирование процесса гравитационного обогащения минерального сырья в рабочем объеме обогатительного оборудования**

В третьей главе приведены результаты численного моделирования процессов винтовой сепарации на базе методов вычислительной гидродинамики.

С целью оценки принципиальной возможности использования методов вычислительной гидродинамики для моделирования процессов гравитационного обогащения проведены вычислительные эксперименты по определению скорости свободного и стесненного падения частиц пластинчатой формы в широком диапазоне коэффициента сферичности. Произведено сравнение полученных значений скоростей с экспериментальными данными по определению скорости свободного и стесненного осаждения частиц. Установлено, что при моделировании данных процессов относительное отклонение значений расчетных скоростей от экспериментальных данных не превышает 10% и в среднем эта величина составляет 3%. Указанные факты позволили судить о перспективности и целесообразности применения численного моделирования на базе методов вычислительной гидродинамики для моделирования гравитационных процессов обогащения с требуемой точностью.

С целью обоснования технологии получения гематитового концентрата обогатительной фабрикой АО «Олкон» были разработаны модели процесса обогащения промпродукта основной магнитной сепарации на винтовом сепараторе ВСП-500, и винтовом шлюзе ШВ-500.

Для корректного задания параметров питания модели аппаратов было проведено минералого-технологическое исследование пробы промпродукта (немагнитной фракции) основной магнитной сепарации текущего производства. Основными минералами пробы являются: гематит – около 10%; суммарное содержание кварца и полевого шпата – около 74%; на долю амфиболов приходится около 11%; прочие (гранат, эпидот, кальцит,

единичные зерна сульфидов) – 4%; магнетит – 1%. Гранулометрическая характеристика полученной пробы материала представлена в таблице 1. Выход материала крупностью - 0,4+0,1 мм составляет 70% с распределением в нем до 73% гематита.

Таблица 1 - Распределение исходного материала по крупности и содержание в нем гематита

Классы крупности, мм	Выход, %	Содержание гематита, %	Распределение гематита, %
+0,6	3,8	5,2	1,8
-0,6+0,4	10,0	9,2	8,7
-0,4+0,3	16,1	10,3	15,8
-0,3+0,2	23,7	10,0	22,5
-0,2+0,1	30,2	12,0	34,4
-0,1+0,071	8,1	11,3	8,7
-0,071	8,1	10,6	8,1
Итого:	100,0	10,5	100,0

Одним из наиболее важных параметров при изучении процессов гравитационного обогащения является определение скорости водного потока малой толщины на рабочей поверхности винтовых аппаратов. На рисунке 1 в виде графиков показаны полученные закономерности скорости движения жидкости в зависимости от расстояния от центральной части рассматриваемых винтовых аппаратов. Установлено, что наибольшие значения скоростей достигаются у внешнего борта винтовой поверхности желоба, где толщина водного потока максимальна, а минимальные – у внутреннего.

Установлено, что в водном потоке, движущемся по винтовой поверхности, проявляется поперечная циркуляция потока, т.е. в придонном слое радиальная составляющая скорости имеет отрицательное значение и происходит циркуляция потока по направлению к центральной оси аппарата; в поверхностном слое жидкости циркуляция происходит по направлению к внешней стороне борта винтового аппарата и радиальная составляющая скорости является положительной величиной.

Разработанные модели дают возможность определить координаты положения минеральных частиц в пространстве. На рисунке 2 представлено графическое распределение отслеживаемых частиц в расчетных объемах моделей аппаратов по значению плотности. В результате выполненного моделирования была выявлена характерная картина распределения минеральных частиц на желобах винтовых аппаратах с образованием веера из минеральных частиц различной плотности: частицы гематита имеют тенденцию скапливаться у внутреннего борта аппарата и переходят в концентрат, частицы пустой породы преимущественно концентрируются у внешнего борта и переходят в хвосты.

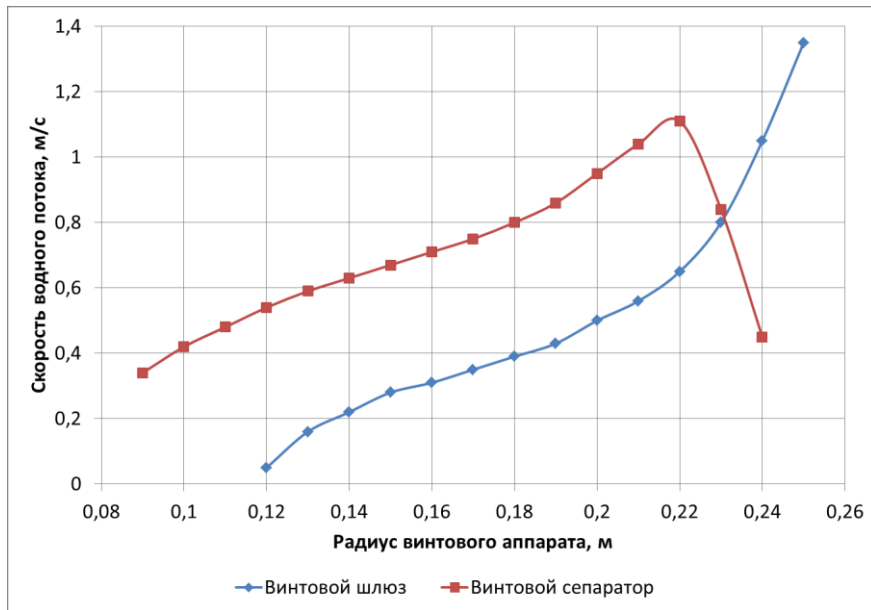


Рисунок 1 - Скорость движения воды в зависимости от расстояния от центральной части винтового аппарата

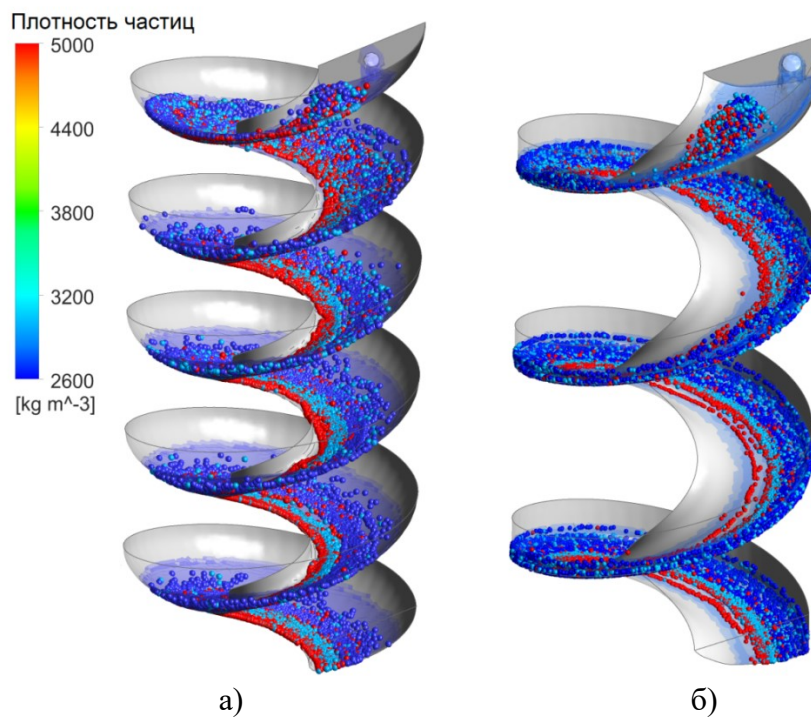


Рисунок 2 - Графическое распределение отслеживаемых частиц по плотности,  $\text{кг/м}^3$ , в рабочем объеме аппаратов: а) винтовой сепаратор, б) винтовой шлюз

На основе проведенного численного моделирования получено распределение частиц исходного материала по крупности в расчетном объеме моделей винтовых аппаратах, которое приведено на рис. 3.

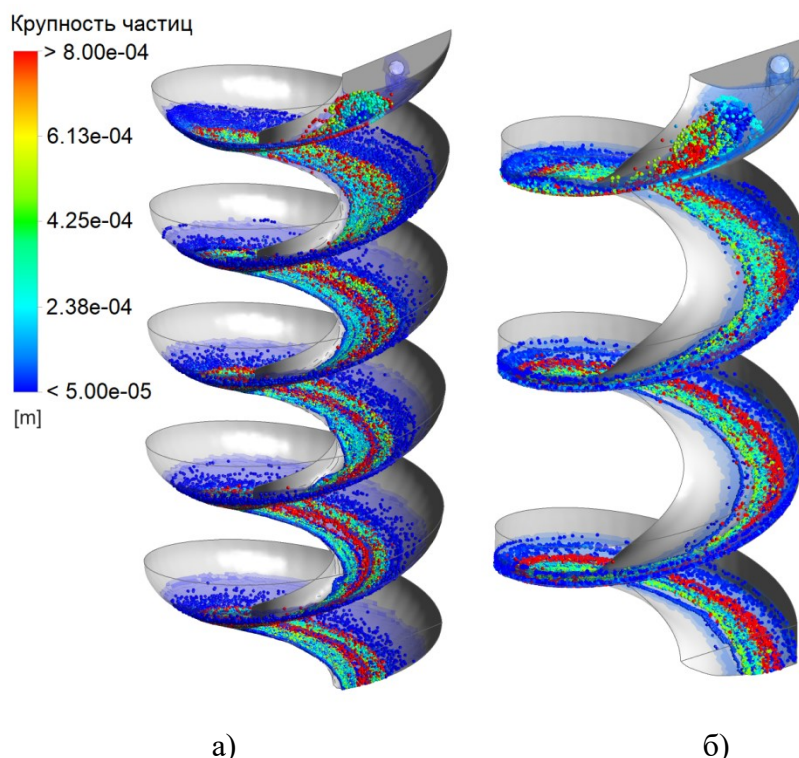


Рисунок 3 - Графическое распределение отслеживаемых частиц материала по крупности, м, в расчетном объеме моделей: а) винтовой сепаратор, б) винтовой шлюз

Установлено, что в концентрат переходят преимущественно частицы гематита крупностью в основном менее 0,3 мм. Промпродукт по гранулометрическому составу схож с концентратом и характеризуется повышенным содержанием частиц с крупностью более 0,3 мм. В хвосты винтовых аппаратов переходят в основном частицы крупностью менее 0,1 мм и крупные частицы пустой породы.

В таблице 2 показаны прогнозные показатели обогащения исходного питания на винтовых аппаратах различной конструкции, полученные в результате расчета компьютерных моделей.

Таблица 2 - Показатели обогащения промпродукта основной магнитной сепарации, полученные в результате численного моделирования

Наименование продуктов	Выход, %	Содержание гематита, %	Извлечение гематита, %	Выход, %	Содержание гематита, %	Извлечение гематита, %
	Винтовой сепаратор ВСП-500			Винтовой шлюз ШВ-500		
Концентрат	6,5	78,5	51,2	8,7	81,9	71,5
Промпродукт	42,0	7,8	32,8	42,4	4,5	19,2
Хвосты	51,5	3,1	16,0	48,9	1,9	9,3
Итого:	100,0	10,0	100,0	100,0	10,0	100,0

Результаты моделирования показали преимущество винтовых аппаратов по сравнению с используемыми на обогатительном железорудном производстве отсадочными машинами за счет более эффективного разделения тонких фракций минерального сырья.

С целью проверки адекватности разработанных моделей и подтверждения результатов моделирования были проведены лабораторные опыты по разделению

исходного материала на рассматриваемых аппаратах. Условия технологических экспериментов совпадали с условиями моделирования. Оценка адекватности моделирования производилась на основе расчета абсолютной погрешности моделирования (рисунок 4), как модуля разности по выходам и содержаниям гематита, полученных в результате расчета модели и лабораторного эксперимента соответственно.

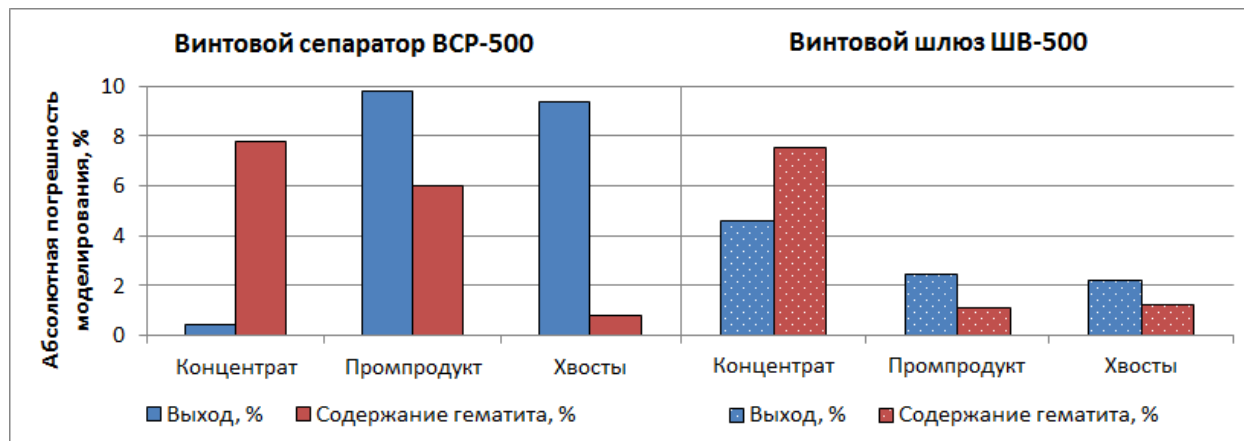


Рисунок 4 - Абсолютное отклонение показателей обогащения, полученных в результате расчета моделей винтовых аппаратов, от результатов технологических экспериментов по винтовой сепарации исходного материала

Абсолютная погрешность моделирования по выходу концентрата не превысила 5%, по выходу промпродукта и хвостов – менее 10%. Абсолютная погрешность по содержанию гематита в концентрате составила менее 8%, по содержанию гематита в промпродукте – менее 2% и в хвостах – менее 1%. Указанные факты позволили утверждать об адекватности моделирования при заданных режимах работы винтовых аппаратов, а также подтвердили более высокую эффективность винтовой сепарации гематитсодержащего промпродукта основной магнитной сепарации по сравнению с существующей технологией отсадки. Установлено, что наиболее высокие качественно-количественные показатели разделения исходного сырья достигаются при использовании винтового шлюза с пологим профилем желоба.

*Численная модель винтовой сепарации, основанная на системе дифференциальных уравнений неразрывности и сохранения импульса, модифицированных для учета многофазности разделительной среды, генерации и диссипации турбулентной кинетической энергии, а также уравнений баланса сил, действующих на минеральные частицы, решаемых методом конечных объемов, позволяет с требуемой точностью определить качественно-количественные показатели обогащения минерального сырья и гидродинамические параметры разделения.*

Явление сегрегации оказывает существенное влияние на процесс разделения минерального сырья на винтовых аппаратах, однако до сих пор остается слабоизученным, большая часть исследований данного процесса носит качественный характер.

При винтовой сепарации явление сегрегации заключается в распределении минеральных зерен по крупности, плотности и форме в условиях их соприкосновения в потоке малой толщины. Сегрегация по плотности происходит по высоте водного потока,

т.е. можно выделить придонный слой, где скапливаются зерна с повышенным значением плотности, и поверхностный слой, где концентрируются легкие частицы (рисунок 5).

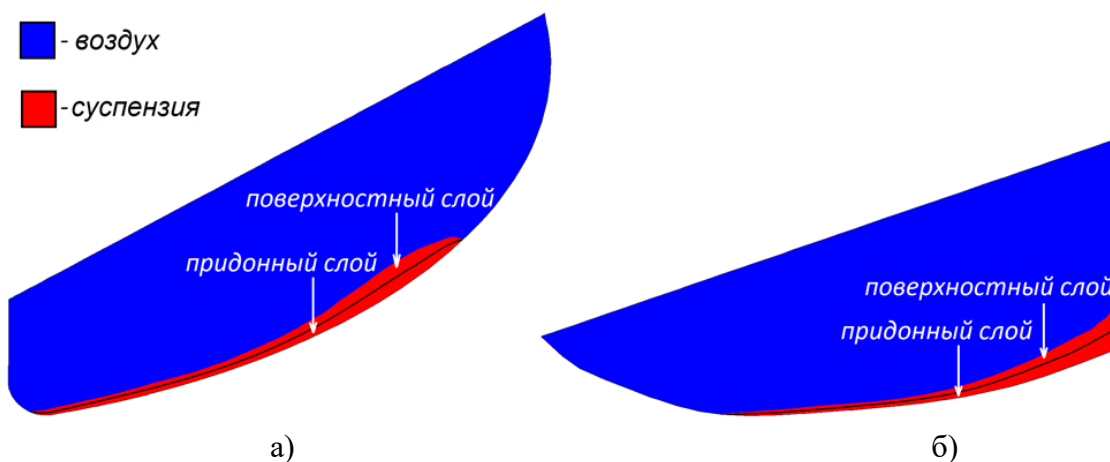


Рисунок 5 - Распределение суспензии в поперечном сечении винтового желоба а) винтового сепаратора, б) винтового шлюза с указанием поверхностного и придонного слоя потока малой толщины

Используя разработанные модели винтовых аппаратов, возможно установить границу раздела придонного и поверхностного водного слоя, а также определить расстояние от поверхности винтового желоба, на котором находятся отслеживаемые минеральные частицы. Таким образом, определив массу минеральных частиц, которые покинули расчетный объем модели на высоте больше или меньше, чем граница раздела поверхностного и придонного слоя, можно установить распределение частиц по придонному и поверхностному слою потока суспензии, что в свою очередь дает возможность количественно оценить процесс сегрегации на винтовых аппаратах.

Для количественной оценки явления сегрегации по плотности на винтовых аппаратах предложена формула, описывающая эффективность сегрегации по плотности:

$$E_s = \frac{\gamma(\beta - \alpha)}{\alpha(1 - \alpha)} = \frac{\varepsilon - \gamma}{1 - \alpha}$$

где  $\gamma$  – выход частиц материала, которые покинули расчетный объем, находясь в придонном слое;

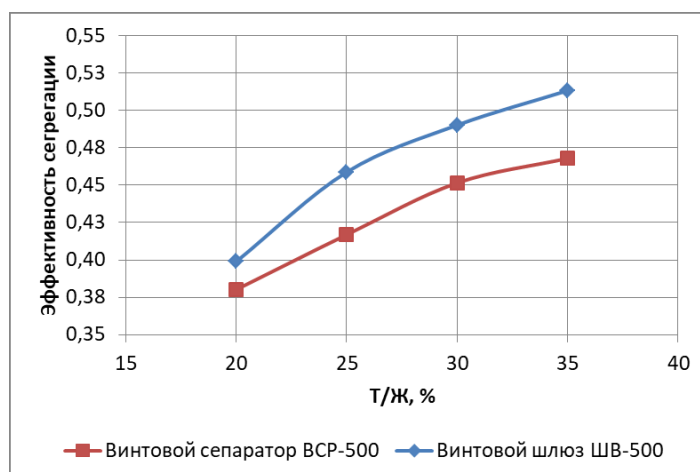
$\beta$  – содержание частиц гематита в материале придонного слоя;

$\alpha$  – содержание гематита в исходном питании;

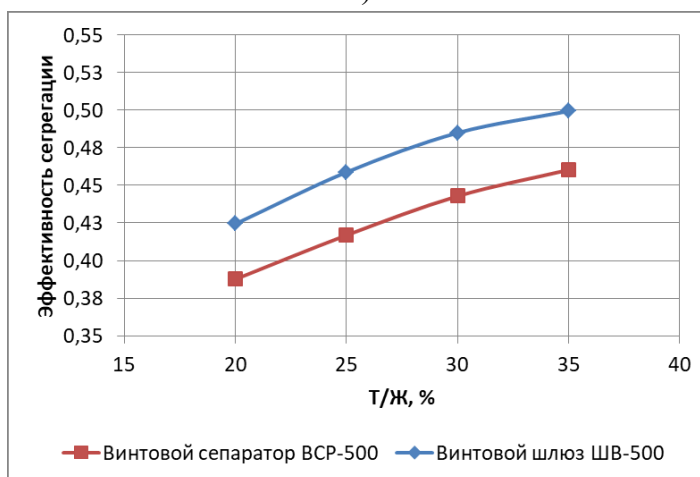
$\varepsilon$  – извлечение гематита в придонный слой.

С целью количественной оценки явления сегрегации по плотности был выполнен расчет эффективности сегрегации частиц гематитсодержащего промпродукта основной магнитной сепарации на винтовом сепараторе и винтовой шлюзе с использованием разработанных численных моделей. Была определена масса частиц гематита, покинувшая рабочий объем аппарата в придонном и поверхностном слоях, и рассчитана эффективность сегрегации по предложенной формуле. Исследовалось влияние на сегрегацию минеральных частиц по плотности таких параметров процесса разделения как массовое содержание твердого в питании, и соответственно производительность по

питанию и расход воды. На рисунке 6 приведена зависимость эффективности сегрегации по плотности от доли твердого в питании.



а)



б)

Рисунок 6 - Влияние содержания твердого в питании на эффективность сегрегации по плотности на винтовых аппаратах: а) при постоянном расходе воды, б) при постоянном расходе питания

Было установлено, что при повышении содержания твердого в питании за счет увеличения нагрузки по питанию, а также снижения расхода воды, эффективность и интенсивность сегрегации по плотности на винтовых аппаратах увеличивается. Выявлено, что наиболее эффективно сегрегация протекает при разделении исходного промпродукта на винтовом шлюзе с профилем поперечного сечения в виде слабоклонной кривой.

*Установлены закономерности сегрегации минеральных частиц по плотности по высоте винтового потока малой толщины:*

- увеличение содержания твердого в питании винтового аппарата обеспечивает повышение эффективности сегрегации;

- уменьшение кривизны профиля поперечного сечения винтового желоба, способствует интенсификации сегрегации мелких фракций минеральных частиц.

## **Совершенствование гравитационной технологии получения гематитового концентрата на обогатительной фабрике АО «Олкон».**

**В четвертой главе** приведены результаты технологических исследований по повышению эффективности гравитационного разделения немагнитной фракции основной магнитной сепарации.

В соответствии с существующей технологической схемой обогащение дробленной руды осуществляется на 10 технологических секциях, а для достижения необходимого содержания массовой доли общего железа в концентрате материал направляется на секции дообогащения. Технологические секции №2-6 имеют одинаковое аппаратное оснащение: обогащение на них происходит по двухстадиальной схеме измельчения с двумя стадиями мокрой магнитной сепарации. Выделение гематитового концентрата осуществляется из немагнитной фракции первой стадии магнитной сепарации с использованием в гравитационном цикле двух стадий обогащения на отсадочных машинах. В результате обогащения получают магнетитовый и гематитовый концентрат. На секциях №8-12 обогащение происходит по двухстадиальной схеме измельчения с четырьмя стадиями мокрой магнитной сепарации с получением только магнетитового концентрата.

С целью оценки эффективности работы существующей гравитационной технологии получения гематитового концентрата было проведено несколько опробований данного участка обогатительной фабрики. По данным опробования отсадочные машины характеризуются низкой эффективностью обогащения. Извлечение гематитового железа от операции в концентрат отсадки колеблется в довольно широком диапазоне от 5% до 67%, усредненное его значение составило 30%. Качество концентрата по железу общему не превышает 50% и в среднем эта величина составляет около 30%. Из-за низкого качества концентрата все продукты участка отсадки зачастую переводятся в хвосты, а кондиционный концентрат был получен только один раз из шести опробований. Средние по опробованиям потери гематитового железа с хвостами отсадки составили 56%.

Одной из основных причин низких показателей обогащения заключается в гранулометрическом составе питания отсадочных машин. При отсадке минимальная крупность обогащаемого материала составляет 0,1-0,2 мм для различных видов руд. В питание отсадочных машин поступает материал с содержанием класса -0,1 мм от 9% до 20% и класса -0,2 мм от 37% до 53%. Таким образом, до 50% их питания не может быть эффективно переработано в силу недостатков используемого обогатительного оборудования. Это связано с пространственными флуктуациями частиц в камере отсадочной машины, вызванными неоднородностью структуры элементарных объемов взвеси, где тонкие частицы гематита вместе с породными минералами взмучиваются и выносятся в верхние слои суспензии. Концентрат отсадки характеризуется большим содержанием частиц крупностью более 0,2 мм: от 83% до 97%. Извлечение гематита крупностью менее 0,2 мм в концентрат составило не более 8% от операции в среднем по опробованиям. Частицы крупностью менее 0,1 мм в концентрате отсадки практически отсутствуют, а их содержание составило около 1%.

Таким образом, получение кондиционного гематитового концентрата с приемлемыми технологическими показателями из железорудного сырья, которое перерабатывается в настоящее время на обогатительной фабрике АО «Олкон», является весьма затруднительной задачей. Существующая схема гравитационного получения



гематитового концентрата не соответствует реалиям производства и основным направлениям развития технологии обогащения в данной отрасли.

С целью подтверждения принципиальной возможности использования винтовых аппаратов в схеме обогащения промпродукта основной магнитной сепарации для повышения извлечения из него тонких фракций гематитового продукта были выполнены промышленные испытания винтовой сепарации на участке отсадки.

Промышленные сравнительные испытания осуществлялись с использованием винтового шлюза ВШ-500 и винтового сепаратора ВСП-500, исходным питанием для которых служило питание отсадочных машин. Результаты проведенных опробований представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Результаты промышленных испытаний винтовой сепарации

Наименование продуктов	Выход, %	Содержание, %			Извлечение, %		
		Fe <sub>общ.</sub>	Fe <sub>магн.</sub>	Fe <sub>гем.</sub>	Fe <sub>общ.</sub>	Fe <sub>магн.</sub>	Fe <sub>гем.</sub>
<b>Винтовой шлюз</b>							
Концентрат	25,6	61,6	0,2	58,2	76,1	14,7	80,6
Промпродукт	33,3	8,7	0,4	6,7	14,0	38,1	12,1
Хвосты	41,1	5,0	0,4	3,3	9,9	47,2	7,3
Итого:	100,0	20,7	0,3	18,5	100,0	100,0	100,0
Концентрат	13,3	58,2	1,0	52,0	58,4	9,9	85,3
Промпродукт	40,0	9,0	1,4	2,4	27,2	41,6	11,8
Хвосты	46,7	4,1	1,4	0,5	14,4	48,5	2,9
Итого:	100,0	13,3	1,3	8,1	100,0	100,0	100,0
Концентрат	8,4	46,1	0,9	31,3	43,9	10,4	78,9
Промпродукт	51,3	6,6	0,8	0,9	38,3	56,4	13,8
Хвосты	40,3	3,9	0,6	0,6	17,8	33,2	7,3
Итого:	100,0	8,8	0,7	3,3	100,0	100,0	100,0
Концентрат	6,1	51,3	1,2	36,1	39,2	5,4	65,5
Промпродукт	29,6	7,5	1,3	2,4	27,8	28,3	21,1
Хвосты	64,3	4,1	1,4	0,7	33,0	66,3	13,4
Итого:	100,0	8,0	1,4	3,4	100,0	100,0	100,0
<b>Винтовой сепаратор</b>							
Концентрат	4,8	34,1	0,4	21,2	22,0	1,7	35,2
Промпродукт	50,0	7,9	0,8	3,2	53,1	36,5	55,4
Хвосты	45,2	4,1	1,5	0,6	24,9	61,8	9,4
Итого:	100,0	7,4	1,1	2,9	100,0	100,0	100,0
Концентрат	4,7	37,2	0,9	21,2	20,2	5,1	25,6
Промпродукт	53,1	9,4	0,6	4,5	57,8	38,6	61,4
Хвосты	42,2	4,5	1,1	1,2	22,0	56,3	13,0
Итого:	100,0	8,6	0,8	3,9	100,0	100,0	100,0
Концентрат	5,7	41,2	0,8	31,5	24,0	5,4	32,2
Промпродукт	47,2	11,4	0,8	6,5	54,9	44,6	55,1
Хвосты	47,1	4,4	0,9	1,5	21,1	50,0	12,7
Итого:	100,0	9,8	0,8	5,6	100,0	100,0	100,0

Проведенные технологические испытания винтовых аппаратов подтвердили целесообразность использования винтовой сепарации при переработке промпродукта основной магнитной сепарации. Установлено, что при его обогащении увеличиваются

объемы выпуска железорудного концентрата за счет повышения извлечения мелких фракций гематита в гравитационном цикле обогащения.

Для перераспределения концентратов и промпродуктов винтовой сепарации, полученных в ходе промышленных испытаний было проанализировано несколько различных вариантов схем, различающихся между собой компоновкой и типом используемого оборудования, а также качеством исходного питания. В результате проведенных исследований рекомендована технологическая схема получения гематитового концентрата, представленная на рисунке 7.

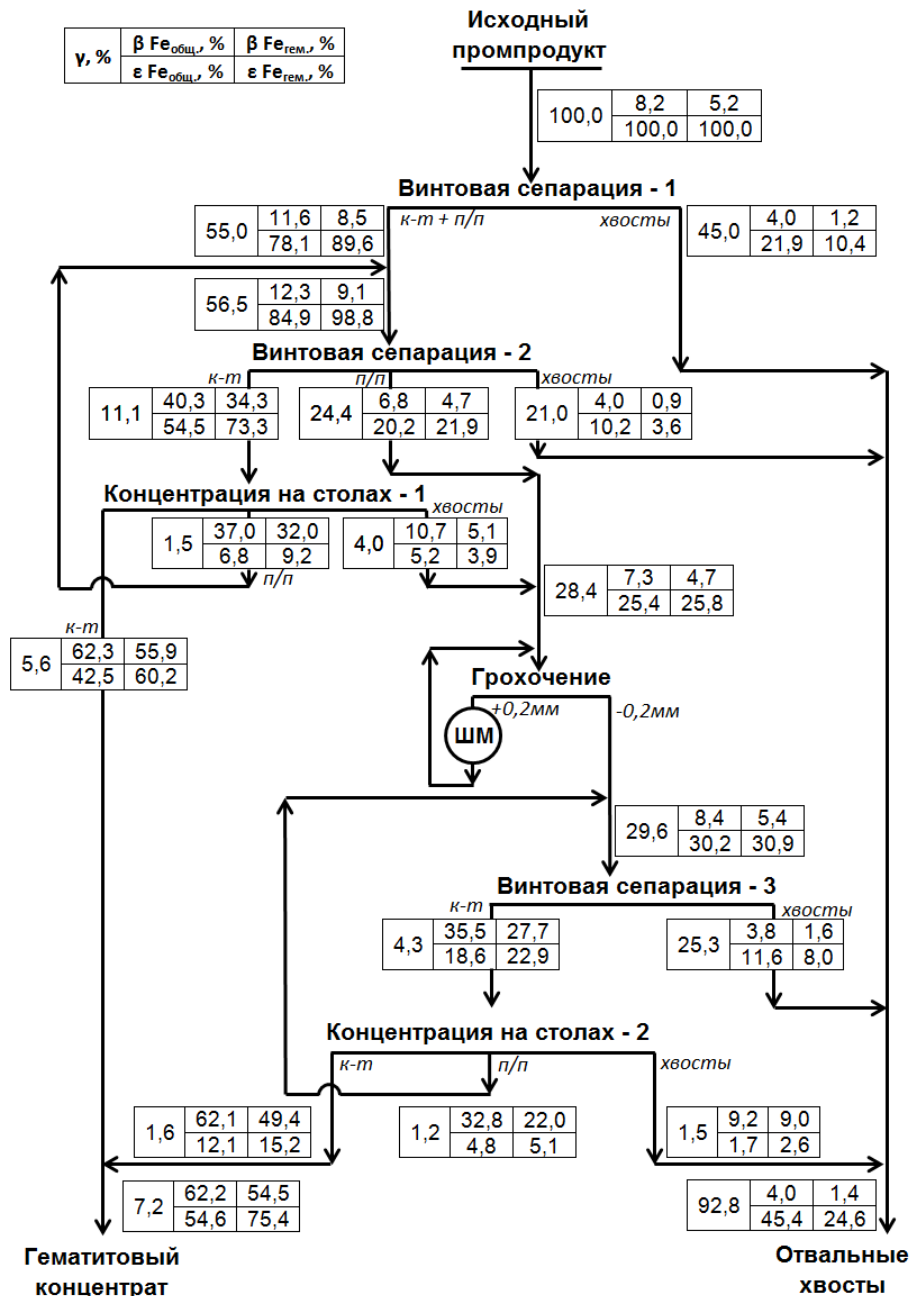


Рисунок 7 - Качественно-количественная схема получения гематитового концентрата

По сравнению с действующей схемой обогащения данный вариант переработки немагнитной фракции основной магнитной сепарации обеспечивает стабильное получение гематитового концентрата с содержанием железа общего более 62%,

соответственно прирост по данному показателю составит более 17%. Извлечение гематитового железа находится на уровне около 75%, тогда как этот показатель по действующей технологии, как правило, не превышает 35%. Также разработанная технология обеспечивает выделение отвальных хвостов с содержанием железа общего не более 5%.

Предварительная экономическая оценка разработанной технологии показала, что увеличение качества и объема выделяемого гематитового концентрата позволит предприятию увеличить годовую прибыль примерно на 7 миллионов долларов США в год при переработке около 3 миллионов тонн исходного питания в виде промпродукта. Единовременные капитальные затраты на внедрение рекомендованной технологии по предварительной оценке составят около 4,17 миллионов долларов. Себестоимость производства одной тонны гематитового концентрата находится на уровне 8,3 долларов. Расчетное значение срока окупаемости инвестиций составит 1 год, что подтвердило целесообразность внедрения рекомендуемой технологии получения гематитового концентрата. Такие показатели обусловлены отсутствием затрат на рудоподготовку, сушку и обезвоживание коллективного концентрата, которые определены в структуре затрат на получение магнетитового концентрата, применением оборудования с низкой энергоёмкостью, использованием существующей инфраструктуры обогатительной фабрики.

*Обоснованы направления повышения эффективности гравитационного разделения гематитсодержащего сырья Заимандровской группы месторождений:*

*- в качестве основного способа обогащения немагнитной фракции с переменным содержанием ценного компонента целесообразно использование двухстадийной винтовой сепарации с выделением на первой стадии объединенного концентрата и промпродукта для стабилизации качественно-количественных показателей при получении гематитового концентрата, а также применение винтовых аппаратов с поперечным профилем в виде слабонаклонной кривой для повышения эффективности обогащения тонких фракций исходного питания;*

*- с целью раскрытия сростков ценного минерала в промежуточном продукте винтовой сепарации и получения из него концентрата кондиционного качества необходимо его доизмельчение до крупности менее 0,2 мм в шаровой мельнице с последующим дообогащением на винтовом шлюзе;*

*- доводочные операции следует производить с использованием концентрационного стола, что обеспечивает стабильное получение гематитового концентрата с содержанием железа общего не менее 62% при сквозном извлечении гематитового железа около 75% и более высокие качественно-количественные показатели по сравнению с винтовой сепарацией и высокоинтенсивной магнитной сепарацией.*

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Представленная диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных исследований процесса гравитационного разделения с применением методов численного моделирования изложены новые технологические решения по разработке гравитационной технологии обогащения гематитсодержащего промпродукта основной магнитной сепарации АО «Олкон»,

обеспечивающей повышение качественно-количественных показателей разделения по сравнению с существующей схемой переработки данного материала, за счет увеличения эффективности обогащения тонких фракций минерального сырья.

Основные научные и практические результаты заключаются в следующем.

1. Разработана методика компьютерного моделирования процесса винтовой сепарации, основанная на применении методов вычислительной гидродинамики и дискретных элементов. Показано, что моделирование процесса винтовой сепарации минерального сырья позволяет произвести прогнозную оценку гидродинамических параметров процесса разделения, траектории движения минеральных частиц, а также качественно-количественных показателей обогащения.

2. На основании численного моделирования винтовой сепарации установлено, что явление сегрегации по плотности оказывает существенное влияние на процесс разделения минеральных частиц в винтовых потоках малой толщины. Разработан метод количественной оценки эффективности явления сегрегации по плотности в потоках малой толщины. Установлено, что эффективность сегрегации зависит от массовой доли твердого в исходном питании винтовых аппаратов, а также профиля поперечного сечения винтового желоба.

3. В результате опробования цикла отсадки на обогатительной фабрике АО «Олкон» установлено, что используемая технология переработки немагнитной фракции не обеспечивает эффективного выделения гематита в концентрат за счет потерь тонких фракций ценного минерала крупностью в основном менее 0,2 мм с хвостами операции.

4. На основании результатов численного моделирования, а также промышленных испытаний показана целесообразность замены отсадочных машин на винтовые аппараты, что обеспечит повышение качественно-количественных показателей обогащения исходного промпродукта за счет увеличения эффективности разделения тонких фракций данного минерального сырья.

5. Установлены конструктивные параметры винтовых аппаратов, технологические параметры разделения винтовой сепарацией и концентрацией на столе, а также режимы рудоподготовки промежуточных продуктов, которые обеспечивают эффективное выделение гематита из исходного питания в концентрат.

6. Разработана гравитационная технология обогащения гематитсодержащего промпродукта основной магнитной сепарацией на базе винтовой сепарации, которая обеспечивает существенный прирост качества гематитового концентрата и извлечения ценных компонентов в него.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах

*Статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК*

1. Хохуля М.С., Фомин А.В. Использование методов вычислительной гидродинамики в процессах гравитационного обогащения различных видов минерального сырья // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2017. - №S23. - С.474-482.

2. Фомин А.В. Изучение сепарационных характеристик разделения промпродукта основной магнитной сепарацией в гидроциклоне на основе компьютерного моделирования / Фомин А.В., Хохуля М.С., Опалев А.С., Львов В.В. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2017. - №S23. - С.465-473.

3. Хохуля М.С. Получение магнетит-гематитового концентрата из железистых кварцитов и складированных отходов их обогащения на основе минералоготехнологических исследований / Хохуля М.С., Опалев А.С., Рухленко Е.Д., Фомин А.В. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2017. - №4. - С.259-271.

4. Опалев А.С. Создание инновационных технологий производства высококачественного железорудного концентрата на предприятиях северо-запада России / Опалев А.С., Хохуля М.С., Фомин А.В., Карпов И.В. // Горный журнал. - 2019. - №6. - С.56-61.

5. Скороходов В.Ф. Прикладные аспекты применения компьютерного моделирования гидродинамики многофазных сред в исследованиях процессов разделения минералов при обогащении руд / Скороходов В.Ф., Хохуля М.С., Опалев А.С., Фомин А.В., Бирюков В.В., Никитин Р.М. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 2019. - № 2. - С.139-153.

6. Скороходов В.Ф. Использование моделей обогатительных аппаратов для оценки технологических показателей переработки минерального сырья / Скороходов В.Ф., Хохуля М.С., Фомин А.В., Никитин Р.М. // Горный журнал. - 2020. - № 3. - С.50-55.

7. Хохуля М.С. Ресурсосберегающая технология получения гематитового концентрата из складированных хвостов обогатительного производства АО «Олкон» / Хохуля М. С., Фомин А. В., Алексеева С. А., Карпов И. В. // Горный журнал. - 2020. - № 9. - С. 85-90.

#### *Публикации в других изданиях*

1. Хохуля М.С. Получение гематитового концентрата из текущих и складированных хвостов обогащения железистых кварцитов ОАО «Олкон» / Хохуля М.С., Конторина Т.А., Сытник М.В., Фомин А.В. // V Уральский горнопромышленный форум: официальный каталог. Екатеринбург: АМБ. - 2013. - С.139-140.

2. Фомин А.В., Хохуля М.С. Расчет скорости свободного падения частиц пластинчатой формы в ньютоновской жидкости на основе CFD-моделирования // 10 международная научная школа молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых»: тезисы докладов. Москва: ИПКОН РАН. - 2013. - С.273-275.

3. Хохуля М.С. Получение гематитового концентрата из текущих и складированных хвостов обогащения железистых кварцитов ОАО «Олкон» / Хохуля М.С., Конторина Т.А., Сытник М.В., Фомин А.В. // Международный научно-исследовательский журнал. Екатеринбург: МНИЖ. - 2013. - № 12. - С.102-106.

4. Хохуля М.С. Использование методов вычислительной гидродинамики для изучения процессов разделения минералов и разработки нового обогатительного оборудования / Хохуля М.С., Опалев А.С., Фомин А.В., Бирюков В.В. // Труды Фермановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. - 2017. - №14. - С.336-338.

5. Хохуля М.С. Обоснование целесообразности вовлечения в переработку складированных хвостов АО «Олкон» применением комбинированной технологии обогащения / Хохуля М.С., Фомин А.В., Карпов И.В., Конторина Т.А. // Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья (Плаксинские чтения – 2017): материалы международной научной конференции. - 2017. - С.336-339.

6. Хохуля М.С. Обоснование и разработка технологических решений повышения извлечения гематита на обогатительном производстве АО «Олкон» / Хохуля М.С., Фомин А.В., Алексеева С.А., Карпов И.В. // Проблемы и перспективы эффективной переработки минерального сырья в 21 веке (Плаксинские чтения – 2019): материалы международного совещания. Иркутск. - 2019. - С. 226-229.

7. Fomin A.V., Khokhulya M.S. Improving efficiency of gravity separation of fine iron ore materials using computer modeling // Topical issues of rational use of natural resources. Volume 2. London: Taylor & Francis Group CRC Press. - 2020. - P.509-516.

8. Skorokhodov, V.F. Applications of Computer Simulation for Hydrodynamics of Multiphase Media in Studying Separation Processes in Mineral Dressing / Skorokhodov, V.F., Khokhulya, M.S., Opalev, A.S., Fomin, A.V., Biryukov, V.V., Nikitin, R.M. // Journal of Mining Science. – 2019. - Vol. 55. - Issue 2. - P.304-318.

9. Опалев А.С. Научно-технический подход к совершенствованию технологии получения железорудного концентрата на АО «Олкон» / Опалев А.С., Хохуля М.С., Карпов И.В., Фомин А.В. // Инновационные процессы комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения – 2020): материалы международной конференции. Апатиты : ФИЦ КНЦ РАН. - 2020. - С.216-218.

Автореферат

ФОМИН АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ

НАУЧНОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ГРАВИТАЦИОННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ГЕМАТИТСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ В ПОТОКАХ МАЛОЙ ТОЛЩИНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Технический редактор В.Ю. Жиганов

Подписано к печати 18.02.2022. Формат бумаги 60x84 1/16.

Усл. печ. л. 1,28. Заказ № 9. Тираж 100 экз.

ФГБУН ФИЦ КНЦ РАН

184209, г. Апатиты, Мурманская область, ул. Ферсмана, 14