На правах рукописи

ПРОКОПЬЕВ СЕРГЕЙ АМПЕРОВИЧ

ТЕХНОЛОГИЯ СТАДИАЛЬНОГО ВЫДЕЛЕНИЯ МАГНЕТИТОВОГО КОНЦЕНТРАТА С ПОМОЩЬЮ ВИНТОВОЙ СЕПАРАЦИИ

Специальность 25.00.13 – «Обогащение полезных ископаемых»

Автореферат диссертации на соискание
учёной степени кандидата технических наук

Екатеринбург – 2019

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» и в ФГБУН Институт земной коры СО РАН.

Научный руководитель – **Пелевин Алексей Евгеньевич**
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Морозов Валерий Валентинович,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры общей и неорганической химии ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (НИТУ «МИСиС»).

Мамонов Сергей Владимирович,
кандидат технических наук, заведующий отделом обогащения
ОАО «Уралмеханобр».

Ведущая организация
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет
им. Г. И. Носова».

Защита диссертации состоится 30 мая 2019 г. в $14^{\underline{00}}$ на заседании диссертационного совета Д 212.280.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» по адресу: 620144, г. Екатеринбург, ГСП, ул. Куйбышева, д. 30, 2-й учебный корпус, ауд. 2142.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» http://science.ursmu.ru/

Автореферат разослан 15 апреля 2019 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор В. К. Багазеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Для промышленности чёрной металлургии России характерно постоянное увеличение объёмов добычи и обогащения магнетитовых руд. При этом с одной стороны, массовая доля железа в добываемых рудах постоянно снижается, но, с другой стороны, повышаются требования к качеству железных концентратов.

Типовая схема обогащения магнетитовых руд построена по принципу стадиального выделения хвостов. После каждой операции уменьшения крупности осуществляется магнитная сепарация с целью удаления хвостов. Каждая стадия измельчения предусматривает раскрытие зерен магнетита и породных минералов. Однако современные конструкции магнитных сепараторов позволяют селективно выделять только породные минералы в хвосты. Магнетит вместе со сростками переходит в магнитный продукт и направляется в следующую стадию измельчения. Готовый концентрат получается только в последней стадии обогащения. При такой схеме магнетит подвергается переизмельчению и возрастают его потери с хвостами.

В этой связи, особую актуальность приобретает разработка схем обогащения магнетитовых руд с применением технологии стадиального выделения магнетитового концентрата по мере раскрытия зёрен магнетита, начиная с ранних стадий измельчения и обогащения. Стадиальное выделение магнетитового концентрата позволяет снизить количество материала, поступающего на последующее измельчение и, как следствие, уменьшить затраты на производство концентрата.

Для стадиального выделения магнетитового концентрата можно использовать гравитационное обогащение с помощью винтовой сепарации. Разделение магнетитовых руд с помощью винтовой сепарации является малоизученным процессом. Таким образом, научно-практическое направление, связанное с разработкой технологии обогащения магнетитовых руд со стадиальным выделением магнетитового концентрата с помощью винтовой сепарации, является актуальным.

Объект исследований – технология обогащения магнетитовых руд.

Предмет исследования – закономерности гравитационного разделения минералов в винтовых сепараторах.

Цель работы – разработка рациональной комбинированной технологии переработки магнетитовых руд, включающей гравитационный и магнитный методы обогащения.

Идея работы заключается в применении комбинированной гравитационно-магнитной схемы обогащения магнетитовой руды со стадиальным выделением концентрата с помощью винтовой сепарации.

Задачи исследований:

1. Изучение особенностей гидродинамики водного потока и механизма разделения частиц по плотности в винтовых аппаратах.

2. Выявление закономерностей влияния параметров винтового сепаратора и технологических факторов на эффективность процесса винтовой сепарации

при выделении готового магнетитового концентрата на ранних стадиях обогащения.

3. Разработка гравитационно-магнитной схемы обогащения магнетитовой руды со стадиальным выделением концентрата с помощью винтовой сепарации.

Методы исследований: обобщение и анализ научно-технической информации; гранулометрический, оптический, минералогический, химический, рентгенофлуоресцентный методы анализа, определение раскрытия минералов; методы прикладной математики и механики; экспериментальные исследования технологии винтовой сепарации в лабораторных и промышленных условиях, статистические методы обработки результатов экспериментов, технико-экономический анализ.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Применение комбинированной технологии, включающей винтовую сепарацию для стадиального выделения части магнетитового концентрата и магнитную сепарацию для получения основного концентрата, определяется закономерностями изменения фракционного состава промпродуктов по крупности, плотности и массовой доле железа в процессе измельчения магнетитовых руд, проявляющимися в наличии раскрытых зёрен магнетита в промпродуктах.

2. Разделение частиц по плотности и крупности в винтовом сепараторе обеспечивается расслоением частиц по высоте потока и наличием циркулирующих потоков, движущихся в нижнем слое потока к внутреннему борту, а в верхнем слое потока к внешнему борту. Основными силами, обеспечивающими разделение частиц, являются подъемные силы и гидродинамические силы, возникающие при поперечных циркуляциях потоков и волновых явлениях.

3. Комбинированная гравитационно-магнитная схема обогащения магнетитовой руды со стадиальным выделением концентрата с помощью винтовой сепарации позволяет увеличить выход концентрата без снижения его качества и снизить нагрузку на последующие стадии измельчения.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается большим объемом экспериментальных исследований, выполненных для магнетитовых руд, сопоставимостью результатов лабораторных экспериментов и промышленных испытаний в условиях действующей фабрики, применением статистических методов математической обработки результатов и апробированных методик. Максимальная относительная средняя ошибка предсказания с использованием теоретических формул составила ± 2,2–4,26 %.

Научная новизна результатов состоит в следующем.

Установлено, что при обогащении магнетитовых руд для стадиального выделения магнетитового концентрата в качестве признака разделения, кроме магнитной восприимчивости и крупности, следует использовать плотность.

Выявлен механизм разделения частиц по плотности в винтовых сепараторах, обусловленный поперечными циркуляциями воды, наличием капиллярных волн, гидродинамической и центробежной силами и силой тяжести. В винтовом водном потоке можно наблюдать капиллярные, гравитационные и переходные

между ними волны одновременно. Поперечная циркуляция водного потока в винтовом желобе приводит к перемещению тяжёлых частиц в сторону внутреннего борта, а лёгких частиц в сторону внешнего борта винтового сепаратора.

Технологические показатели винтовой сепарации при стадиальном выделении магнетитового концентрата зависят от конструктивных параметров винтового сепаратора, от производительности и массовой доли твёрдого в питании, от фракционного состава исходного продукта и раскрытия зерен магнетита в нем.

Практическая значимость работы

Разработана комбинированная гравитационно-магнитная схема обогащения магнетитовой руды с выделением магнетитового концентрата после первой стадии измельчения с помощью винтовой сепарации.

Установлены конструктивные параметры винтового сепаратора и необходимые технологические режимы процесса винтовой сепарации, обеспечивающие стадиальное выделение магнетитового концентрата.

В промышленных условиях испытана и рекомендована к внедрению технология стадиального выделения магнетитового концентрата после первой стадии измельчения с помощью винтовой сепарации, позволяющая снизить затраты на последующее измельчение и увеличить выход концентрата.

Реализация результатов работы

Разработанные в диссертации методы и методики оценки обогатимости, модель винтового аппарата с установленными конструктивными параметрами использованы в научно-исследовательских работах, выполненных для промышленных предприятий.

Разработанная технология стадиального выделения части железного концентрата с помощью винтовой сепарации после первой стадии измельчения апробирована в промышленных условиях на Абагурской обогатительно-агломерационной фабрике. Экономический эффект при использовании технологии выделения части готового концентрата после первой стадии мокрой магнитной сепарации, составит 105,59 млн рублей в год.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на XXIX Международном конгрессе переработки минерального сырья (IMPC-2018, Moscow, Russia), на Международном совещании «Научные основы и современные процессы комплексной переработки труднообогатимого сырья» (Плаксинские чтения, г. Казань, 2010 г.), на III, V, VI, IX Конгрессах обогатителей стран СНГ (г. Москва, МИСиС, 2001, 2005, 2007, 2013 г.), на Международном совещании «Современные методы комплексной переработки руд и нетрадиционного минерального сырья» (г. Апатиты. 2007 г.), на XXIII Международной научно-технической конференции «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья» (г. Екатеринбург, 2018 г.), на Международной научно-практической конференции «Эффективные технологии производства цветных, редких и благородных металлов» (г. Алматы, Казахстан, 2018 г.), на технических совещаниях промышленных железорудных предприятий «ЕВРАЗруда», «Оленегорский ГОК», «Михайловский ГОК», «Стойленский ГОК».

Публикации

Основные положения диссертации опубликованы в 17 работах, в том числе в четырёх статьях в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК, в одном патенте на изобретение РФ и в одной монографии.

Личный вклад автора в публикациях, выполненных в соавторстве, состоял в формировании основной идеи, анализе имеющейся априорной информации, в постановке задач исследований, организации и разработке методик лабораторных исследований и промышленных испытаний, участии в исследованиях и испытаниях, интерпретации полученных результатов, написании текстовой части публикаций и докладов.

Объём и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, трёх приложений, списка использованных источников из 154 наименований, содержит 161 страницу машинописного текста, 31 рисунок, 27 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цель и задачи исследований, представлены защищаемые научные положения, изложены методы исследований, научная новизна и практическая значимость работы, приведены личный вклад автора, реализация и апробация работы.

Современное состояние теории и практики стадиального выделения концентратов из железорудного сырья

В первой главе приведено современное состояние практики обогащения магнетитовых руд и практика применения винтовой сепарации при обогащении гематитовых руд.

Значительный вклад в развитие техники и технологии обогащения магнетитовых руд внесли: И. С. Дацюк, В. Г. Деркач, В. И. Кармазин, В. В. Кармазин, С. Г. Евсиович, В. Л. Егоров, И. С. Журавлёв, Л. А. Ломовцев, А. Н. Марюта, И. К. Младецкий, П. Е. Остапенко, Б. М. Пирогов, В. А. Чантурия, Л. А. Вайсберг.

Значительный вклад в развитие теории и практики применения винтовых аппаратов внесли Р. Берт, А. Таггарт, В. Глисн, Р. Багнольд, Л. Б. Левенсон, М. Ф. Аникин, В. Д. Иванов, Г. И. Требуховский, М. Л. Певзнер, К. В. Соломин, М. И. Акимов, Б. В. Кизевальтер, А. М. Базилевский, Г. А. Стаханов, Н. Г. Холодов, В. Н. Шохин, Л. Г. Подкосов, И. Н. Исаев, А. В. Богданович.

В России первые промышленные испытания с положительным результатом по применению винтовой сепарации для стадиального выделения концентрата выполнены на Высокогорском ГОКе. Испытания и опытная эксплуатация винтовых сепараторов выполнены под руководством Р. А. Гельбинга при участии автора диссертации С. А. Прокопьева.

Возможность стадиального выделения концентрата определяется наличием раскрытых зёрен магнетита в готовом продукте стадии измельчения. Это условие выполняется уже после первой стадии измельчения с применением шаровых мельниц. Поэтому для стадиального выделения магнетитового концентрата, кроме винтовой сепарации, принципиально возможно использовать дру-

гие методы обогащения: магнитная сепарация в слабом магнитном поле, магнитная сепарация в переменном магнитном поле, магнитно-гравитационная сепарация, тонкое грохочение и флотация.

Все вышеперечисленные методы испытаны в лабораторных и частично в промышленных условиях. Наиболее испытанной является технология с применением тонкого грохочения. Однако при тонком грохочении крупные зёрна магнетита не попадут в концентрат и вместе с надрешётным продуктом поступят на последующее измельчение. Кроме этого, применение грохотов по сравнению с винтовыми сепараторами приводит к увеличению капитальных затрат и эксплуатационных расходов.

Поэтому винтовую сепарацию следует рассматривать в качестве перспективного метода обогащения для стадиального выделения концентрата в комбинированной технологии обогащения магнетитовой руды.

Технологические свойства магнетитовых руд

Во второй главе приведены методики проведения исследований и вещественный состав магнетитовых руд и продуктов, потенциально пригодных для выделения из них магнетитового концентрата для условий Абагурской обогатительно-агломерационной фабрики.

На Абагурской фабрике обогащаются скарновые магнетитовые руды нескольких месторождений Западной Сибири. Примышленным минералом месторождений является магнетит с преобладанием тонкой и частично мелкой рудной вкрапленностью (0,071–1,0 мм). Другие рудные минералы присутствуют в незначительном количестве. Схема обогащения Абагурской фабрики включает две стадии измельчения в замкнутом цикле и две стадии мокрой магнитной сепарации. В качестве продуктов, потенциально пригодных для выделения из них готового концентрата, рассмотрены промпродукт (магнитный продукт) операции ММС-I, слив шаровой мельницы и пески гидроциклонов второй стадии измельчения.

В таблице 1 приведён гранулометрический состав этих продуктов с массовой долей железа в классах крупности. Для каждого из продуктов характерно увеличение массовой доли железа при снижении крупности класса. Исключением является класс крупности –0,04 мм, массовая доля железа в котором может быть ниже, чем в классе –0,071+ 0,04 мм (см. таблицу 1). Такая закономерность характерна для скарновых магнетитовых руд с преобладанием тонкой и частично мелкой рудной вкрапленностью.

Каждый из рассмотренных продуктов пригоден для выделения из него готового концентрата с помощью винтовой сепарации. Однако с точки зрения компоновки оборудования и для снижения необходимого количества винтовых сепараторов признано нецелесообразным применение винтовой сепарации внутри замкнутого цикла измельчения. Поэтому в качестве наиболее перспективного продукта для получения из него готового концентрата принят магнитный продукт операции ММС-I.

В таблице 2 приведены результаты исследований по оценке раскрытия магнетита в классах крупности промпродукта ММС-I, которые позволяют разделить промпродукт ММС-I на две фазы: богатую по железу (свободный маг-

нетит и богатые сростки) и бедную по железу (рядовые и бедные сростки и породные минералы). Эти фазы отличаются не только массовой долей железа, но и плотностью. Плотность первой фазы составляет 4500-5000 кг/м^3, плотность второй фазы составляет 2700-4500 кг/м^3, что определяет возможность применения гравитационного метода для разделения этих фаз.

Таблица 1 – Результаты фракционирования по крупности промпродуктов Абагурской обогатительно-агломерационной фабрики

Класс крупности, мм	Выход, %	Массовая доля Fe, %	Распределение Fe, %
Промпродукт операции ММС-I			
+0,5	16,82	41,15	12,92
–0,5+0,25	18,39	49,75	17,09
–0,25+0,125	17,56	53,41	17,52
–0,125+0,071	15,69	58,11	17,02
–0,071+0,04	12,25	60,09	13,75
–0,04	19,29	60,23	21,7
Всего:	100,00	53,55	100,00
Слив шаровой мельницы			
+0,5	8,06	43,45	6,43
–0,5+0,25	17,58	47,52	15,34
–0,25+0,125	25,27	53,94	25,03
–0,125+0,071	21,25	59,25	23,11
–0,071+0,04	12,82	60,65	14,28
–0,04	15,02	57,33	15,81
Всего:	100,00	54,46	100,00
Пески гидроциклонов			
+0,5	14,21	42,58	11,04
–0,5+0,25	22,44	49,16	20,14
–0,25+0,125	26,93	56,60	27,83
–0,125+0,071	16,72	61,21	18,66
–0,071+0,04	7,73	62,89	8,87
–0,04	11,97	61,63	13,46
Всего:	100,00	54,80	100,00

Массовая доля первой фазы (свободного магнетита и богатых сростков) в промпродукте ММС-I составляет 66,24 %. Эта величина характеризует максимальную величину теоретического выхода магнетитового концентрата винтовой сепарации.

На практике неизбежно произойдёт попадание частиц с промежуточной плотностью, как в лёгкий, так и в тяжёлый продукт винтового сепаратора. Кроме этого, частицы с различной крупностью разделяются на винтовых сепараторах с различной эффективностью (для мелких и тонких продуктов применяют различные винтовые аппараты). Поэтому практический выход магнетитового концентрата винтовой сепарации будет ниже теоретического.

Таблица 2 – Раскрытие магнетита в классах крупности промпродукта ММС-I

Класс крупности, мм	Массовая доля (к промпродукту ММС-I), %					
	свободный магнетит	сростки магнетита			свободные породные минералы	всего
		богатые (> 90 %)	рядовые (15-90 %)	бедные (<15%)		
+0,5	1,70	6,08	5,12	2,96	1,21	17,07
–0,5+0,25	4,98	6,81	2,90	2,98	0,83	18,50
–0,25+0,125	6,16	5,09	2,35	2,26	0,78	16,65
–0,125+0,071	7,95	2,48	2,10	0,93	1,00	14,45
–0,071+0,04	7,36	1,60	1,33	0,97	0,85	12,11
–0,04	16,03	0,00	0,00	0,00	5,19	21,22
Итого	**44,18**	**22,06**	13,80	10,10	9,86	100,00

Применение комбинированной технологии, включающей винтовую сепарацию для стадиального выделения части магнетитового концентрата и магнитную сепарацию для получения основного концентрата, определяется закономерностями изменения фракционного состава промпродуктов по крупности, плотности и массовой доле железа в процессе измельчения магнетитовых руд, проявляющимися в наличии раскрытых зёрен магнетита в промпродуктах.

Особенности гидродинамики и разделения частиц по плотности на винтовых аппаратах

В третьей главе приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований по выявлению закономерностей перемещения пульпы по винтовым желобам и разделения частиц по плотности в винтовых потоках.

Характеристики водных потоков в винтовых аппаратах

Определение режимов и состояния водных потоков на винтовых аппаратах выполнено путём замера глубины, средней скорости водного потока и расчёта чисел Re и Fr для винтовых желобов с диаметрами 0,4–1,5 м. Зависимость числа Fr от числа Re приведена на рисунке 1.

Большая часть потока характеризуется числом Фруда более единицы. На этом основании состояние потока следует считать «бурным». Свободная поверхность имеет волны, которые можно обнаружить визуально. И только небольшая часть водного потока у внутреннего борта имеет «спокойное» состояние при Fr < 1. Состояние потока при Fr = 1 отнесено к критическому.

Выделены шесть режимов водных потоков на винтовом желобе.

1. Ламинарный докритический, или «спокойный» (Re < 300; Fr < 1);
2. Ламинарный критический (Re < 300; Fr = 1);
3. Ламинарный сверхкритический или «бурный» (Re < 300; Fr > 1);
4. Первый переходный режим со сверхкритическим состоянием (Re = 300–1000; Fr > 1);
5. Второй переходный режим со сверхкритическим состоянием (Re = 1000–3400; Fr > 1);
6. Турбулентный сверхкритический или «бурный» (Re > 3400; Fr > 1).

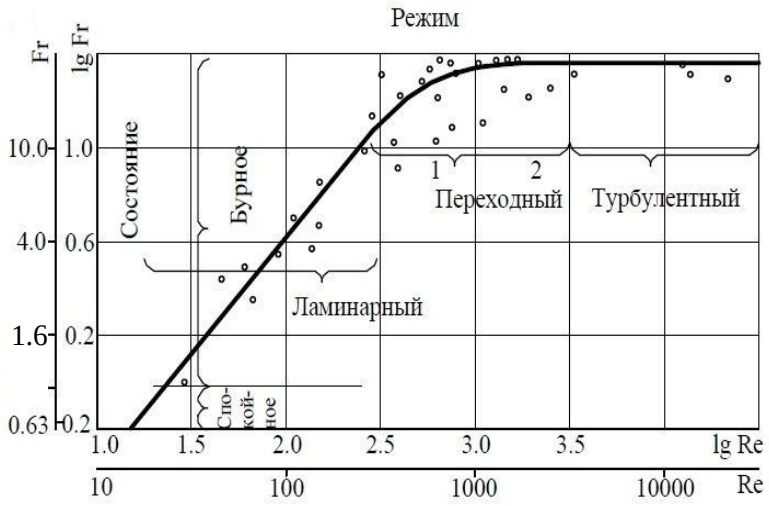

Рисунок 1 – Зависимость между числами Fr и Re

Водные потоки на винтовых аппаратах относятся к сложным формам движения жидкости. Они не имеют постоянной глубины и скорости по ширине желоба, и в одном желобе водный поток одновременно имеет несколько режимов и состояний. Режимы и состояния водных потоков зависят от конструктивных особенностей винтовых аппаратов и их производительности.

Поперечная циркуляция водных потоков в винтовых аппаратах

Водный поток при перемещении по винтовому желобу имеет сложный характер движения. Верхние струи потока движутся по развертывающим спиралям, постепенно приближаясь к внешнему борту, оказавшись вблизи дна, водные струи движутся по свертывающимся спиралям с уменьшающимся радиусом. Это приводит к поперечной циркуляции водных потоков в винтовых аппаратах. При увеличении диаметра винтового желоба более одного метра возникает вторичная поперечная циркуляция с другим направлением водных струй (рисунок 2).

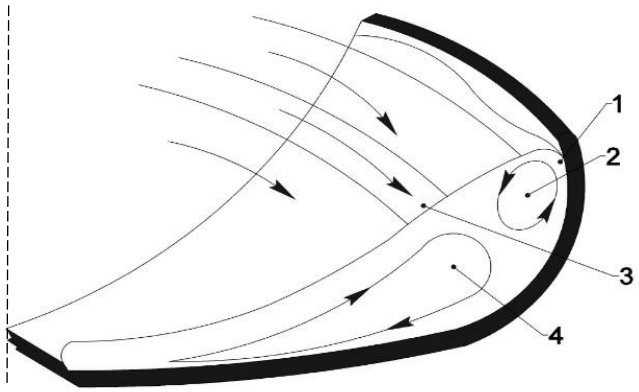

Рисунок 2 – Поперечная циркуляция потока на винтовых аппаратах: *1* – внешний край потока; *2* – вторичная циркуляция; *3* – промежуточная зона; *4* – первичная циркуляция

Поперечная циркуляция на винтовых желобах – устойчивое явление, она не нарушается даже в желобе, в котором на рабочей поверхности вдоль винтовых линий были выполнены рифли.

Гидродинамические силы различных направлений по высоте водного потока, возникающие при поперечных циркуляциях потока следует отнести к основным силам, обеспечивающим процесс разделения по плотности и крупности на винтовых аппаратах.

Исследование волн потока

Поверхность водных потоков на винтовых желобах показали, что она имеет волнистую форму. Волны можно разделить на капиллярные (определяются поверхностным натяжением воды) и гравитационные (возникают под действием силы тяжести).

Установлено, что в зависимости от параметров водного потока на винтовых желобах появляются волны либо капиллярные, либо гравитационные, либо те и другие вместе. Капиллярные волны имеют место в водных винтовых потоках с Re < 3000 и Fr > 1 и их можно наблюдать на всех винтовых желобах в потоке, прилегающем к внутреннему борту. Гравитационные волны проявляются при Re > 3000 и Fr > 1 и имеют место на винтовых желобах у внешнего борта.

На винтовых сепараторах с профилем в виде эллипса или окружности можно наблюдать капиллярные, гравитационные и переходные между ними волны одновременно. В области тяжёлой фракции (концентрата) и первого промпродукта присутствуют капиллярные волны. В области легкой фракции (хвостов) наблюдаются гравитационные волны. В области бедных промпродуктов наблюдаются переходные волны. Для винтовых шлюзов характерно наличие только капиллярных волн.

Наличие волн в винтовом потоке значительно влияет на результаты разделения минералов в винтовых аппаратах. Поверхностная ветвь первичной поперечной циркуляции представляет собой капиллярные волны. На винтовых шлюзах легкие частицы, занимающие верхние слои потока, поверхностными пульсирующими водными массами (капиллярными волнами) смещаются к внешнему борту желоба в область хвостов, а тяжелые частицы, оказавшиеся на дне в результате расслоения по плотности, придонной ветвью поперечной циркуляции смещаются в область концентрата. На винтовых сепараторах капиллярные волны также способствуют транспортировке лёгких частиц к внешнему борту желоба.

Таким образом, капиллярные волны являются положительным явлением с точки зрения механизма разделения частиц по плотности в винтовом потоке. Однако это проявляется не всегда. Так при массовой доле тяжелой фракции более 25–30 % в исходном материале на винтовом шлюзе, когда ширина и толщина полосы концентрата становятся весьма значительными (особенно при большой производительности по твердому), можно заметить, как тяжелые частицы из верхних слоев потока капиллярными волнами переносятся в область промпродукта. При этом эффективность обогащения такого материала уменьшается (рисунок 3).

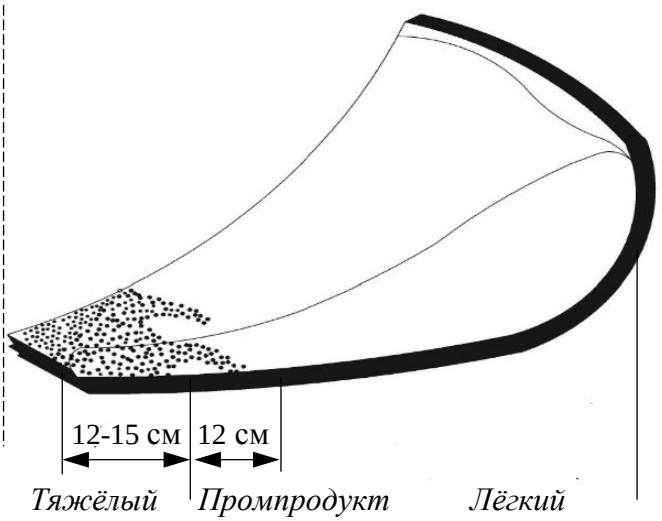

Рисунок 3 – Отклонение капиллярными волнами тяжёлых частиц в область промпродукта

Закономерности движения пульпы на винтовом аппарате

Скорость пульпы в винтовом желобе для соответствующих режимов можно рассчитать по следующим зависимостям:

$$\upsilon_{\text{п.лам.}} = C_{\text{п.лам.}} \frac{g\, H_{\text{п}}^{2} \frac{t}{D} (\text{tg}\beta)^{0,17}\, \rho_{\text{п}}}{\eta_{\text{п}}}\ ; \tag{1}$$

$$\upsilon_{\text{п.пер.1}} = C_{\text{п.пер.1}} \frac{g^{0,8} H_{\text{п}}^{1,4} \left(\frac{t}{D}\right)^{0,8} (\text{tg}\beta)^{0,25}\, \rho_{\text{п}}{}^{0,6}}{\eta_{\text{п}}^{0,6}}\ ; \tag{2}$$

$$\upsilon_{\text{п.пер.2}} = C_{\text{п.пер.2}} \frac{g^{0,65} H_{\text{п}}^{0,95} \left(\frac{t}{D}\right)^{0,65} (\text{tg}\beta)^{0,33}\, \rho_{\text{п}}{}^{0,3}}{\eta_{\text{п}}^{0,3}}\ ; \tag{3}$$

$$\upsilon_{\text{п.турб.}} = C_{\text{п.турб.}}\, g^{0,5} H_{\text{п}}^{0,5} \left(\frac{t}{D}\right)^{0,5} (\text{tg}\beta)^{0,5}\,, \tag{4}$$

где $\upsilon_{\text{п.лам.}}$, $\upsilon_{\text{п.пер.1}}$, $\upsilon_{\text{п.пер.2}}$ и $\upsilon_{\text{п.турб.}}$ – скорость пульпы в винтовом желобе в соответствующих режимах (ламинарный, переходный 1 и 2, турбулентный), см/с; $C_{\text{п.лам}}$, $C_{\text{п.пер.1}}$, $C_{\text{п·пер.2}}$,$C_{\text{п·пер.}}$ – коэффициенты, зависящие от величины критерия Fr; $H_{\text{п}}$ – глубина потока пульпы, см; $\eta_{\text{п}}$ – эквивалентная вязкость пульпы; $\rho_{\text{п}}$ – плотность пульпы, г/см^3; β – угол наклона поперечного сечения желоба к горизонту, град; g – ускорение силы тяжести, см/с^2; D, t – диаметр и шаг желоба, см.

Из анализа соотношений (1–4) видно, что скорости водного потока на винтовых аппаратах определяются не только отношением t / D, но также зависят от угла наклона профиля к горизонту, причем эта зависимость различна в зависимости от режима потока. Приведенные зависимости позволяют проследить постепенный переход от ламинарного режима к турбулентному. Проведенные эксперименты показывают, что глубина и скорость потока пульпы на винтовом аппарате выше при движении пульпы по сравнению с водой и, как следствие, критерии Рейнольдса и Фруда увеличиваются (рисунок 4).

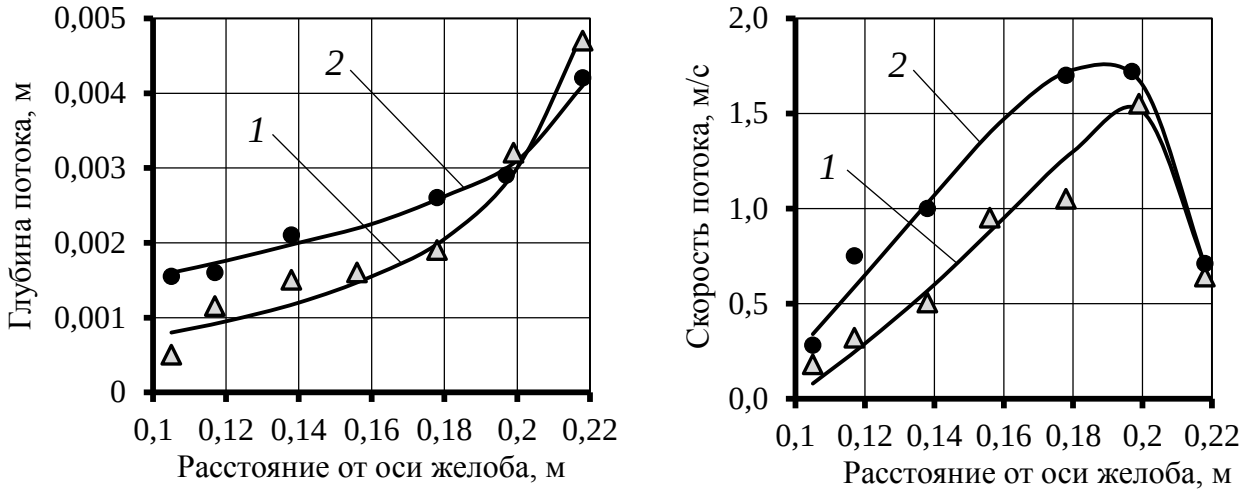

Рисунок 4 – Характеристики потока пульпы в винтовом желобе диаметром 0,5 м с шагом 0,35 м и эллиптическим поперечным сечением: *1* – водный поток; *2* – поток пульпы (массовая доля твердого в питании 31%)

По Р. Багнольду при движении пульпы с высокой массовой долей твердого сдвигающее тангенциальное напряжение между слоями частиц, возникающее вследствие градиента скорости по глубине, является причиной вертикального

разрыхления частиц. Поэтому любое транспортирование потоком воды твёрдых частиц является причиной их разрыхления по плотности под действием подъёмной силы (рисунок 5).

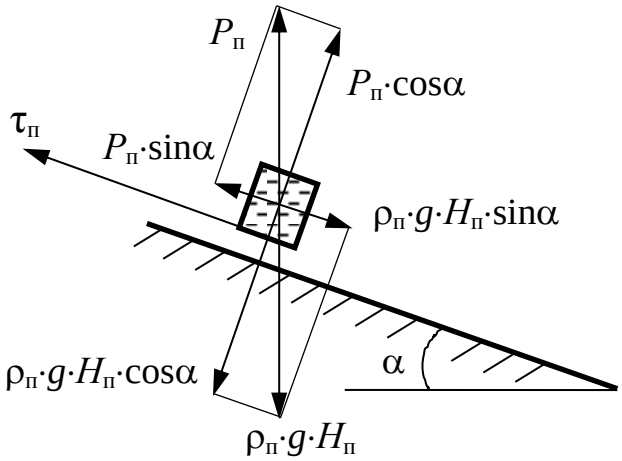

Рисунок 5 – Схема давлений, действующих на элемент потока пульпы на наклонной плоскости: $\tau_п$ – тангенциальное сдвигающее напряжение, Па; $P_п$ – суммарная подъёмная (разрыхляющая) удельная сила (давление), включающая эффекты от соударения частиц, вращения внутренних течений, циркуляций капиллярных волн и водного потока в целом, Па

Тангенциальное сдвигающее напряжение для пульп, движущихся в различных режимах, можно рассчитать по общей формуле:

$$\tau_п = \rho_п g H_п \frac{t}{D}. \quad (5)$$

Выражения для подъёмных удельных сил или давлений при различных режимах движения пульпы, обеспечивающих разрыхление частиц в элементе потока, можно рассчитать с использованием исследований Р. Багнольда

$$P_{п.лам.}=0{,}75\cdot\tau_п; \quad P_{п.пер.1}=0{,}6\cdot\tau_п; \quad P_{п.пер.2}=0{,}45\cdot\tau_п; \quad P_{п.турб.}=0{,}3\cdot\tau_п. \quad (6)$$

Для оценки разрыхления частиц по плотности в потоке пульпы на винтовом желобе можно пользоваться коэффициентом разрыхления (ψ), равным отношению удельной подъемной силы (давления) к удельной силе тяжести ($\rho_п g H_п \cos\alpha$)

$$\psi_{п.лам.} = 0{,}75\frac{t}{D}\cos\alpha; \qquad \psi_{п.пер.1.} = 0{,}6\frac{t}{D}\cos\alpha;$$
$$\psi_{п.пер.2} = 0{,}45\frac{t}{D}\cos\alpha; \qquad \psi_{п.турб.} = 0{,}3\frac{t}{D}\cos\alpha. \quad (7)$$

Разрыхление частиц тем больше, чем больше скорость пульпы (отношение t / D). Увеличение плотности и глубины потока пульпы способствует уменьшению разрыхления частиц. Вязкость пульпы наиболее сильно сказывается на разрыхлении частиц при малых числах Рейнольдса, а скорость наиболее эффективно влияет на разрыхление частиц при турбулентном режиме движения пульпы. Расчеты коэффициентов разрыхления для потоков пульпы на винтовом желобе диаметром 0,50 м, шагом 0,35 м и с эллиптическим профилем с использованием соотношений (1)–(7) показывают, что их значения составляют 0,22–

0,60. Величина коэффициента разрыхления частиц у внутреннего борта больше, чем у внешнего. То, что величина коэффициентов разрыхления меньше единицы, говорит о том, что частицы достаточно разрыхлены и не находятся во взвешенном состоянии.

Максимальная относительная ошибка расчётов по формулам (1)–(6) составляет ± 20 % при количестве экспериментальных данных для различных режимов 22–80. Максимальная относительная средняя ошибка предсказания составляет ± 2,2–4,26 %.

Разделение частиц по плотности в винтовом аппарате

Расслоение и разделение частиц по плотности на винтовом желобе является массовым процессом, при котором положение всего потока в радиальном направлении определяется соотношением силы тяжести и центробежной силы. Движение твердой фазы в этом потоке определяется особенностями винтового потока и направлением действия гидродинамических сил. К таким особенностям относится поперечная циркуляция потока пульпы. Тяжелые частицы, которые в результате расслоения оказываются в нижних слоях потока вместе с массой легких частиц, под воздействием нижней ветви поперечной циркуляции постепенно отклоняются в сторону внутреннего борта, где глубина потока меньше. При этом верхние слои легких частиц постепенно оказываются в области поверхностной ветви поперечной циркуляции и капиллярных волн, с помощью которых они постепенно при движении вниз отклоняются в сторону внешнего борта.

Разделение частиц по плотности и крупности в винтовом сепараторе обеспечивается расслоением частиц по высоте потока и наличием циркулирующих потоков, движущихся в нижнем слое потока к внутреннему борту, а в верхнем слое потока к внешнему борту. Основными силами, обеспечивающими разделение частиц, являются подъемные силы и гидродинамические силы, возникающие при поперечных циркуляциях потоков и волновых явлениях.

Исследование процесса винтовой сепарации при обогащении магнетитсодержащих продуктов

В четвёртой главе приведены результаты сравнительных лабораторных испытаний по выбору типа винтового аппарата и режимов его работы и результаты промышленных испытаний комбинированной гравитационно-магнитной технологии обогащения магнетитовой руды на Абагурской обогатительно-агломерационной фабрике.

Лабораторные испытания по выбору типа винтового аппарата и режимов его работы

Результаты сравнительных испытаний винтовых сепараторов СВ (сепаратор винтовой) и СВМ (сепаратор винтовой минеральный) по выделению магнетитового концентрата из промпродукта ММС-I приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты сравнительных испытаний винтовых сепараторов СВ и СВМ при фракционировании потока по поперечному сечению желоба

Продукты	Выход, %	Массовая доля Fe, %	Извлечение Fe, %
Сепаратор СВ-500			
1 секция	7,25	64,10	8,66
2 секция	12,97	60,69	14,68
Концентрат	**20,22**	**61,91**	**23,34**
3 секция	18,98	58,61	20,74
4 секция	37,07	48,26	33,36
5 секция	23,73	51,00	22,56
Промпродукт винтовой сепарации	**79,78**	**51,54**	**76,66**
Сепаратор СВМ-500			
1 секция	8,68	64,93	10,50
2 секция	25,84	61,89	29,79
Концентрат	**34,52**	**62,66**	**40,29**
3 секция	30,00	56,44	31,55
4 секция	25,15	42,27	19,80
5 секция	10,33	43,45	8,36
Промпродукт винтовой сепарации	65,48	48,95	74,77
Исходный – промпродукт ММС-I	**100,00**	**53,68**	**100,00**

Результаты сравнительных лабораторных испытаний показали перспективность применения для стадиального выделения магнетитового концентрата винтового сепаратора типа СВМ, имеющего более пологий профиль желоба, увеличенный шаг спирали и большее количество витков, по сравнению с винтовым сепаратором типа СВ. Применение сепаратора СВМ по сравнению с сепаратором СВ позволило получить концентрат с большей массовой долей железа (62,66 против 61,91 %) при большем выходе (34,52 против 20,22 %) и извлечении железа (40,29 против 23,34 %).

Для определения оптимальных параметров и режимов работы сепаратора СВМ выполнены опыты при варьировании производительности 500–900 кг/ч; массовой доли твёрдого в питании 20–50 %; количества витков спирали 2–4 (рисунок 6).

В опытах получены концентраты с массовой долей железа 61,05–63,24 %. Оптимальные параметры и режимы работы сепаратора СВМ-500, обеспечивающие максимальное извлечение Fe в концентрат при требуемом качестве (не менее 61,7 % Fe для условий Абагурской обогатительно-агломерационной фабрики), следующие: производительность 500–600 кг/ч; массовая доля твёрдого в питании 40–50 %; количества витков спирали – не менее четырёх.

Промышленные испытания комбинированной гравитационно-магнитной технологии обогащения магнетитовой руды на Абагурской обогатительно-агломерационной фабрике

Опытно-промышленные испытания выполнены на втором участке обогатительной фабрики путём подачи промпродукта ММС-I (исходное питание) на винтовые сепараторы СВМ-3-750 (12 шт.).

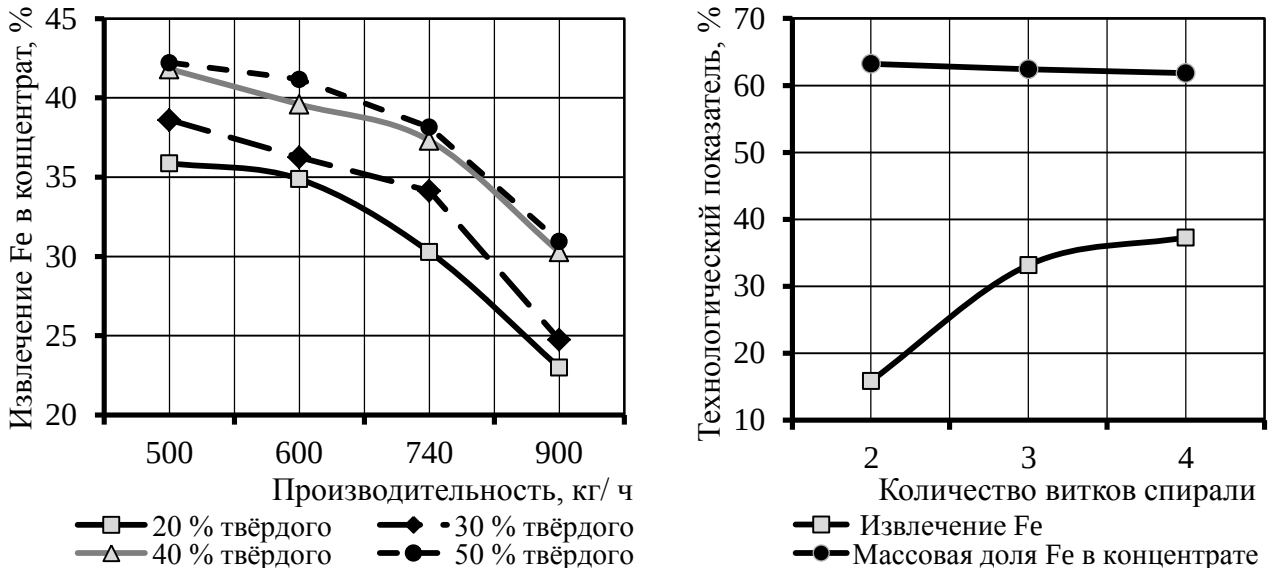

Рисунок 6 – Зависимости технологических показателей обогащения от параметров и режимов работы сепаратора СВМ-500

При выполнении первого этапа испытаний получить кондиционный концентрат не удалось, массовая доля железа в нём не превышала 57–59 %. Исходный продукт винтовой сепарации (промпродукт ММС-I) представляет собой магнетитовые флокулы, содержащие породные минералы, что снизило качество концентрата. Поэтому на втором этапе испытаний для разрушения сильномагнитных флокул на питающем патрубке блока винтовых сепараторов был установлен размагничивающий аппарат.

При промышленных испытаниях установлено, что применение предварительного размагничивания пульпы позволило повысить массовую долю железа в концентрате с 57-59 % до 62-63 %. Технологические показатели разделения промпродукта ММС-I (к операции) при оптимальных режимах работы сепараторов СВМ-3-750 с использованием предварительного размагничивания питания приведены в таблице 4.

Результаты промышленных испытаний показали возможность получения части магнетитового концентрата с массовой долей железа 63,2 % после первой стадии измельчения.

Таблица 4 – Технологические показатели винтовой сепарации

Продукты	Выход, %	Массовая доля Fe,%	Извлечение Fe, %
Концентрат (тяжёлый)	29,8	63,20	36,21
Промпродукт (лёгкий)	70,2	47,26	63,79
Промпродукт ММС- I (исходный)	100,0	52,01	100,00

Разработка технологии обогащения магнетитовой руды на основе стадиального выведения концентрата и обоснование её экономической эффективности

В пятой главе приведён сравнительный технико-экономический анализ использования разработанной схемы для условий Абагурской обогатительно-агломерационной фабрики.

Разработана гравитационно-магнитная схема обогащения с выделением после первой стадии измельчения раскрытых зерен пустой породы в хвосты с помощью магнитной сепарации и с выделением раскрытых зерен магнетита в концентрат с помощью винтовой сепарации (рисунок 7). Технологические балансы существующей и разработанной схемы приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Технологические балансы существующей и разработанной схемы

Продукт	СУЩЕСТВУЮЩАЯ СХЕМА			РАЗРАБОТАННАЯ СХЕМА		
	Выход, %	Массовая доля Fe, %	Извлечение Fe, %	Выход, %	Массовая доля Fe, %	Извлечение Fe, %
Концентрат	60,6	61,7	89,7	61,7	61,7	91,2
Хвосты	39,4	10,9	10,3	38,3	9,6	8,8
Исходная руда	100,0	41,7	100,0	100,0	41,7	100,0

По сравнению с действующей схемой обогащения повышен выход концентрата на 1,1 % (61,7 против 60,6 %) и извлечение железа на 1,5% (91,2 против 89,7 %) при неизменном качестве концентрата.

Выход концентрата от операции винтовой сепарации составил 29,8 %, то есть нагрузка на вторую стадию измельчения снизилась на 29,8 % отн. (см. таблицу 4). Это снижает затраты на измельчение (уменьшение количества мельниц второй стадии).

Расчётный годовой экономический эффект от внедрения разработанной технологии переработки магнетитовых руд для условий Абагурской обогатительно-агломерационной фабрики составляет 105,6 млн рублей. Экономический эффект достигается за счёт снижения себестоимости концентрата (уменьшение количества мельниц второй стадии с десяти до семи) и за счёт увеличения стоимости концентрата (повышение выхода концентрата на 1,1 %).

Комбинированная гравитационно-магнитная схема обогащения магнетитовой руды со стадиальным выделением концентрата с помощью винтовой сепарации позволяет увеличить выход концентрата без снижения его качества и снизить нагрузку на последующие стадии измельчения.

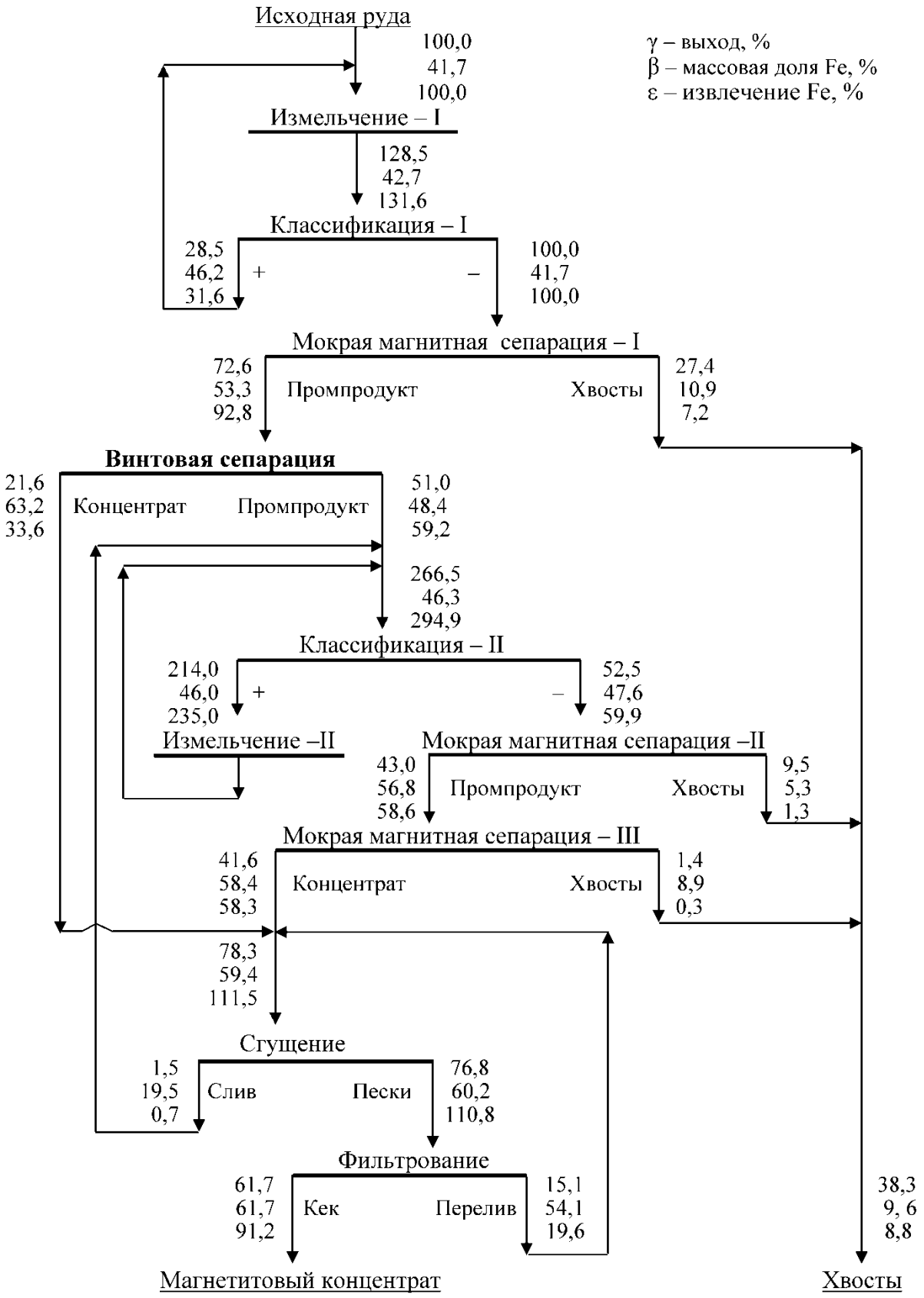

Рисунок 7 – Гравитационно-магнитная схема обогащения магнетитовой руды

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных исследований изложены новые научно-обоснованные технико-технологические решения по разработке комбинированной гравитационно-магнитной схемы обогащения магнетитовых руд с применением винтовой сепарации для стадиального выделения железного концентрата, имеющие существенное значение в области обогащения полезных ископаемых.

Основные научные и практические результаты заключаются в следующем.

1. Установлено, что применение комбинированной технологии, включающей винтовую сепарацию для стадиального выделения части магнетитового концентрата и магнитную сепарацию для получения основного концентрата, определяют закономерности изменения фракционного состава промпродуктов по крупности, плотности и массовой доле железа в процессе измельчения магнетитовых руд, проявляющиеся в наличии чистых зёрен магнетита в промпродуктах.

2. Установлено, что для стадиального вывода части готового концентрата после первой стадии измельчения Абагурской фабрики можно использовать винтовую сепарацию исходя из крупности исходного продукта и наличия раскрытых зёрен магнетита с повышенной плотностью. В промпродукте ММС-I содержание свободных и богатых сростков магнетита составляет 66,24 %. Промпродукт ММС-I характеризуется повышенной массовой долей железа (58,11–60,23 %) в мелких классах крупности –0,125+0 мм и повышенной плотностью этих классов.

3. Получены эмпирические формулы для расчёта скорости движения пульпы, тангенциального сдвигающего напряжения, удельной подъёмной силы (давления) и коэффициента разрыхления частиц на винтовом желобе для ламинарного, переходного и турбулентного режимов. Увеличение плотности и глубины потока пульпы способствует уменьшению разрыхления частиц. Вязкость пульпы наиболее сильно сказывается на разрыхлении частиц при малых числах Рейнольдса, а скорость пульпы наиболее эффективно влияет на разрыхление частиц при турбулентном режиме движения пульпы.

Максимальная относительная ошибка расчётов по формулам составляет ±20 % при количестве экспериментальных данных для различных режимов 22–80. Максимальная относительная средняя ошибка предсказания составляет ± 2,2–4,26 %.

4. Разделение частиц по плотности в винтовом сепараторе обеспечивается расслоением частиц по высоте потока и наличием циркулирующих поперечных потоков, способствующих перемещению тяжёлых частиц, движущихся в нижнем слое потока к внутреннему борту и перемещению лёгких частиц, движущихся в верхнем слое потока к внешнему борту. Капиллярные волны являются составной частью поперечной циркуляции, представляя собой её поверхностную ветвь. Основными силами, обеспечивающими разделение частиц, являются

подъемные силы и гидродинамические силы, возникающие при поперечных циркуляциях потоков и волновых явлениях.

5. Результаты сравнительных лабораторных испытаний показали перспективность применения для стадиального выделения магнетитового концентрата винтового сепаратора СВМ, имеющего более пологий профиль желоба, увеличенный шаг спирали и большее количество витков, по сравнению с винтовым сепаратором СВ. Использование сепаратора СВМ по сравнению с сепаратором СВ позволило получить концентрат с большей массовой долей железа (62,66 против 61,91 %) при большем выходе (34,52 против 20,22 %) и извлечении железа (40,29 против 23,34 %).

6. Промышленные испытания на Абагурской обогатительно-агломерационной фабрике по обогащению промпродукта ММС-I с помощью винтовой сепарации на аппарате СВМ-3-750 подтвердили результаты лабораторных исследований и показали возможность вывода части магнетитового концентрата после первой стадии измельчения. Выход концентрата от питания винтовой сепарации составил 29,8 % при массовой доле железа в концентрате 63,2 %. Это снижает затраты на последующее измельчение промпродукта.

7. При промышленных испытаниях установлено, что обязательным условием применения технологии стадиального выделения магнетитового концентрата из магнитножёстких руд с помощью винтовой сепарации является применение размагничивания питания для разрушения магнетитовых флокул. Применение предварительного размагничивания пульпы позволило повысить массовую долю железа в концентрате с 57-59 % до 62-63 %.

8. Разработанная комбинированная гравитационно-магнитная схема позволяет по сравнению с действующей схемой обогащения Абагурской обогатительно-агломерационной фабрики увеличить выход концентрата на 1,1 % и извлечение железа на 1,5 %. Внедрение разработанной схемы позволит снизить затраты на измельчение за счёт уменьшения количества мельниц второй стадии (на три единицы) или увеличить производительность фабрики при неизменном количестве мельниц.

9. Годовой экономический эффект при внедрении новой технологии для условий Абагурской обогатительно-агломерационной фабрики составит 105,6 млн рублей за счёт снижения количества мельниц и увеличения количества концентрата.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах

Статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК

1. **Прокопьев, С.А.** Винтовые аппараты – перспективное направление в области обогащения минерального сырья / С.А. Прокопьев, В.Д. Иванов, Н.А. Кулиева, М.Л. Болотин // Разведка и охрана недр. − 2004. − № 8-9. − С. 51-52.

2. Прокопьев, Е.С. Существующие механизмы разделения минеральных частиц на винтовых сепараторах / Е.С. Прокопьев, **С.А. Прокопьев**, К.В. Федотов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический

журнал). Отдельная статья (специальный выпуск, препринт). − 2014. − № 1. − 20 с.

3. **Прокопьев, С.А.** Стадиальное выделение магнетитового концентрата с использованием винтовой сепарации / С.А. Прокопьев, А.Е. Пелевин, С.А. Напольских, Р.А. Гельбинг // Обогащение руд. − 2018. − № 4. − С. 28-33.

4. **Прокопьев, С.А.** Особенности массопереноса на винтовых сепараторах / С.А. Прокопьев, А.Е. Пелевин, Ю.П. Морозов // Известия вузов. Горный журнал. − 2018. − № 7. − С. 67-74.

Монография

Иванов, В.Д. Винтовые аппараты для обогащения руд и песков в России: монография / В.Д. Иванов, **С.А. Прокопьев**. – М: – Дакси, 2000. – 239 с.

Патент на изобретение

Патент № 2588521 Российская Федерация, МКП ВОЗВ 9/04. Способ комплексной переработки золошлаковых отходов / **С.А. Прокопьев**, М.Л. Болотин; заявитель ООО ПК «Спирит». – № 2015117100; заявл.05.05.2015; опубл. 27.06.2016. Бюл. № 18.

Публикации в других изданиях

1. **Прокопьев, С.А.** Моделирование и расчет винтовых аппаратов / С.А. Прокопьев // III Конгресс обогатителей стран СНГ: тезисы докладов, т. I. − М.: МИСиС, 2001. − С. 95-96.

2. Иванов, В.Д. Современное состояние теории и практики винтовых аппаратов / В.Д. Иванов, **С.А. Прокопьев**, Т.В. Башлыкова // III Конгресс обогатителей стран СНГ: тезисы докладов, т. II. − М.: МИСиС, 2001. − С. 163-165.

3. Максимов, В.И. Результаты использования винтовых шлюзов при обогащении коренных титаномагнетитовых руд месторождения Юго-восточная Гремяха / В.И. Максимов, **С.А. Прокопьев**, С.В., Соколов, С.А. Алексеева, А.И. Ракоев, Е.В. Черноусенко // V Конгресс обогатителей стран СНГ: тезисы докладов, т. 1. − М.: МИСиС, 2005. − С. 38-39.

4. **Прокопьев, С.А.** Перспективное направление использования винтовой сепарации в технологических схемах обогащения железорудного сырья / С.А. Прокопьев, А.М. Пономарева, Г.А Тарасенко // V Конгресс обогатителей стран СНГ: тезисы докладов, т. 2 – М.: МИСиС, 2005. – С. 163-165.

5. Чантурия, В.А. Перспективы применения гравитационных методов в схемах обогащения железных руд / В.А. Чантурия, Т.Н. Гзогян, **С.А. Прокопьев**, Р.А. Гельбинг // Современные методы комплексной переработки руд и нетрадиционного минерального сырья: материалы международного совещания. – Апатиты, 2007. – С. 182-185.

6. **Прокопьев, С.А.** Стадиальное выведение железосодержащего концентрата методом винтовой сепарации при обогащении магнетитсодержащих руд / С.А. Прокопьев, А.М. Пономарёва, В.А. Чантурия, Р.А. Гельбинг // VI Конгресс обогатителей стран СНГ: тезисы докладов. – М.: МИСиС, 2007. – С. 65-66.

7. Дорошенко, М.В. Минералогическое сопровождение технологических исследований / М.В. Дорошенко, Т.В. Башлыкова, М.В. Проскуряков, **С.А.**

Прокопьев, А.М. Пономарёва // VI Конгресс обогатителей стран СНГ: тезисы докладов. − М.: МИСиС, 2007. − С. 104-105.

8. **Прокопьев, С.А.** Испытания новой модели винтового аппарата при обогащении железных руд / С.А. Прокопьев, А.М. Пономарёва, В.И. Килин // Научные основы и современные процессы комплексной переработки трудно-обогатимого минерального сырья (Плаксинские чтения): материалы международного совещания. − М.: Московский издательский дом, 2010. − С. 300-302.

9. **Прокопьев, С.А.** Совершенствование технологии обогащения песков техногенного месторождения железа «Балка Терноватая» с применением винтовых сепараторов / С.А. Прокопьев, Е.С. Прокопьев, М.Е. Шульгина // IX Конгресс обогатителей стран СНГ: труды конференции, т. 1 – М.: МИСиС, 2013. – С. 363.

10. **Прокопьев, С.А.** Стадиальное получение железного концентрата с помощью винтовой сепарации / С.А. Прокопьев, А.Е. Пелевин, Е.С. Прокопьев, К.К. Иванова // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: мат-лы XXIII Междунар. науч.-техн. конф. – Екатеринбург: УГГУ, 2018. – С. 87-89.

11. **Прокопьев, С.А.** Применение винтовой сепарации при обогащении железных руд для вывода раскрытого магнетита из межцикловых операций / С.А. Прокопьев, А.Е. Пелевин, Е.С. Прокопьев, К.К. Иванова // Эффективные технологии производства цветных, редких и благородных металлов: материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Алматы: ИМиО, 2018. − С. 33-38.

Подписано в печать 12.03.2019 г.
Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Печ. л. 1,375. Тираж 90. Заказ № 39.

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет».
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30