

ТЮКИН АЛЕКСАНДР ПАВЛОВИЧ

**РАЗРАБОТКА КОМБИНИРОВАННОГО МЕТОДА ОБОГАЩЕНИЯ
ЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ
АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ И УДАРНОЙ СЕПАРАЦИИ**

Специальность 25.00.13 – «Обогащение полезных ископаемых»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2013 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Научный руководитель:

Шехирев Дмитрий Витальевич
кандидат технических наук, с.н.с.

Официальные оппоненты:

Краснов Гелий Дмитриевич

доктор технических наук, профессор,
Институт проблем комплексного освоения
недр РАН (ИПКОН РАН, г. Москва),
главный научный сотрудник

Романчук Александр Ильич

кандидат технических наук, Центральный
научно-исследовательский
геологоразведочный институт цветных и
благородных металлов (ФГУП ЦНИГРИ,
г. Москва), зав. отделом обогащения
минерального сырья

Ведущая организация

Горный институт Кольского
научного центра РАН (г. Апатиты)

Защита диссертации состоится 4 апреля 2013 года в 14 час 30 мин в аудитории К-212 на заседании диссертационного совета Д 212.132.05 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» по адресу: 119049, г. Москва, Крымский вал, д. 3.

С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке НИТУ «МИСиС».

Отзывы на автореферат направлять по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, 4, НИТУ «МИСиС», ученому секретарю совета Лобовой Т. А.

Автореферат разослан 4 марта 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Лобова Т.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Все процессы обогащения зернистых материалов направлены на создание таких условий, при которых траектории движения частиц компонентов разделяются в зависимости от физических или химических свойств каждого из них. При этом одновременное использование комплекса нескольких свойств может обеспечить повышение эффективности процесса.

Обогащение зернистых материалов при помощи классических водных процессов (флотация, концентрирование на столах) не всегда представляется возможным. Это может касаться доводки шлиховых гравитационных концентратов благородных металлов на россыпных месторождениях, обнаруженных в засушливых регионах или, напротив, труднопроходимой болотистой местности, где в холодное время года из-за сильных морозов проведение водных процессов затруднительно. На металлургических предприятиях существуют отдельные участки технологических схем, где из сухого исходного продукта необходимо производить сухой концентрат благородных металлов для его последующей пирометаллургической переработки.

Сепарация зернистых материалов, содержащих благородные металлы, в большинстве случаев заключается в разделении минеральных и металлизированных частиц, различающихся по плотности и по механическим свойствам упругости и трения. Обогащение подобных продуктов обычно происходит в малых объемах и требует высокой точности разделения траекторий частиц, и данный показатель является приоритетным по сравнению с остальными, например такими, как производительность оборудования.

В ходе обзора литературы и мировых патентов на изобретения за прошедшие 100 лет установлено, что на текущий момент не разработана технология сепарации зернистых смесей, позволяющая снизить дисперсии потоков разделяемых компонентов до минимума при индивидуальном воздействии на каждую частицу, нарастить эффективность за счет одновременного использования нескольких свойств веществ, и при этом не требующая применения воды.

Цель работы – установление закономерностей и разработка метода разделения зернистых материалов с комбинированием аэродинамической и ударной сепарации.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- изучить закономерности движения твердых частиц в плоском горизонтальном канале под действием ламинарного потока воздуха, а также ударного взаимодействия частиц с плоской неподвижной поверхностью;
- разработать детерминированную математическую модель движения твердых частиц в совмещенных процессах аэродинамической и ударной сепарации, связывающую скорость и траекторию движения частиц с крупностью, плотностью и коэффициентами трения и восстановления;
- разработать и изготовить лабораторную установку для проведения аэродинамической и ударной сепарации зернистых продуктов;

- установить закономерности разделения минеральных компонентов в зависимости от скоростей и траекторий движения частиц, определенных экспериментально и рассчитанных по математической модели;
- исследовать влияние гранулометрического состава и морфологии частиц на эффективность аэродинамической и ударной сепарации;
- разработать конструкцию сепаратора и технологический режим обогащения методом комбинирования аэродинамической и ударной сепарации на примере платиносодержащих дробленых шлаков вторичной анодной электроплавки Заполярного филиала ОАО «ГМК «Норильский никель».

Методы исследований

Для прямого измерения масс, скоростей и линейных размеров использовались известные современные инструментальные методы.

Для выполнения алгебраических операций, моделирования процессов, статистической обработки результатов экспериментов использовались современные компьютерные программные пакеты.

Определение диаметров частиц, скоростей их движения, коэффициентов трения и коэффициентов восстановления проводили с применением метода статистических измерений (многократное измерение с невысоким показателем прецизионности и принятие среднего результата, когда доверительный интервал математического ожидания не превышает установленной величины).

Постановка экспериментов по аэродинамической и ударной сепарации зернистых материалов осуществлена на основе разработанных методики и лабораторной установки.

Для фиксации и последующего анализа траекторий движения твердых частиц использован специально разработанный метод ускоренной микро-видеосъемки (240 кадров/с).

Научная новизна

Разработана детерминированная математическая модель движения минеральных частиц в совмещенных процессах аэродинамической и ударной сепарации, связывающая скорость и траекторию движения частиц с крупностью, плотностью и коэффициентами трения и восстановления, позволяющая подбирать оптимальные условия процессов сепарации по критериям разности скоростей разделяемых фракций в плоском канале и разности горизонтальной составляющей скорости частиц после удара о поверхность.

Установлены закономерности поведения частиц в процессе аэродинамической сепарации, проявляющиеся в экстремальном характере зависимости разности скоростей частиц различной плотности, крупности, формы и эффективности сепарации от длины разгонного канала.

Установлена взаимосвязь между положением точки падения частицы на горизонтальную плоскость и параметрами процесса ударной сепарации (скорость и угол падения твердой частицы на отражающую поверхность, коэффициенты восстановления и трения пары материалов «частица-поверхность», расположение поверхности в пространстве), что позволяет выбрать оптимальные параметры ударной сепарации и обеспечить наиболее эффективное разделение частиц компонентов исходной смеси.

Достоверность результатов исследований

Достоверность экспериментальных исследований подтверждается использованием современных инструментальных и расчетных методов, многократной повторяемостью измерений с применением статистических методов их обработки, а также удовлетворительной сходимостью расчетных и фактических значений результирующих величин (скорости и траектории движения частиц, показатели извлечения компонентов в продукты сепарации).

Практическая значимость

Разработаны экспериментальные методики, позволяющие на основе фиксирования и математического анализа траекторий движения частиц разделяемых фракций определять динамические характеристики процесса разгона частиц потоком воздуха в плоском канале, а также характеристики упругого удара в системе «частица - твердая поверхность».

Создана методика расчета режимных параметров аэродинамической и ударной сепарации зернистых продуктов, обеспечивающих их эффективное обогащение.

Разработана конструкция сепаратора для обогащения платиносодержащих дробленых шлаков вторичной анодной электроплавки Заполярного филиала ОАО «ГМК «Норильский никель» методом комбинирования аэродинамической и ударной сепарации.

Разработан технологический режим аэродинамической и ударной сепарации для обогащения платиносодержащих дробленых шлаков вторичной анодной электроплавки Заполярного филиала ОАО «ГМК «Норильский никель».

На защиту выносятся

Разработанная детерминированная математическая модель, позволяющая с достаточной точностью определять условия поддержания максимальной разности скоростей частиц разделяемых фракций в плоском воздушном канале, а также оптимальных значений углов наклона отражающей поверхности, при которых обеспечивается наилучшее пространственное распределение частиц разделяемых фракций и эффективность обогащения.

Разработанные методики расчета зависимостей скорости и направлений движения частиц при их разгоне в плоском воздушном канале, свободном падении и упругом соударении с отражающей поверхностью, от коэффициентов трения и восстановления, угла наклона отражающей поверхности, скорости и направления движения частиц перед ударом, плотности, формы частиц, позволяющие выбрать оптимальные параметры процесса в зависимости от физических и физико-механических свойств перерабатываемого сырья.

Разработанная конструкция сепаратора для обогащения платиносодержащих дробленых шлаков вторичной анодной электроплавки Заполярного филиала ОАО «ГМК «Норильский никель» методом комбинирования аэродинамической и ударной сепарации.

Апробация работы

Основные положения и результаты работы докладывались на VII Конгрессе обогатителей стран СНГ (Москва, 2009), VIII Конгрессе обогатителей стран СНГ (Москва, 2011), на научно-техническом совете Медного завода ЗФ ОАО «ГМК «Норильский никель» в 2012 году.

Публикации

По результатам работы опубликовано 2 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК, получен 1 патент на конструкцию установки.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, шести разделов, заключения, списка использованных источников. Диссертация имеет объем 150 страниц машинописного текста и включает 61 рисунок и 50 таблиц, список использованных источников состоит из 108 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована цель работы и способы ее реализации, основные положения, выносимые на защиту.

В главе 1 представлен аналитический обзор свойств минеральных частиц, различия в которых используются для их разделения при обогащении, а также методов, обеспечивающих условия для реализации данных различий (классификация, отсадка, концентрирование на столах, шлюзах, в желобах, воздушное и тяжелосредное обогащение).

Сделан вывод о том, что рассматриваемые методы имеют сравнительно низкую эффективность, т.к. в основном реализуют условия для разделения частиц только по плотности при стесненном режиме их движения, что вызывает также значительную дисперсию потоков разделяемых компонентов. Кроме того, практически все рассмотренные методы требуют использования воды, что в ряде случаев крайне затруднительно или невозможно.

Установлено, что сепарация зернистых продуктов, использующих специфические свойства минеральных частиц (коэффициент трения и коэффициент восстановления в паре с материалом выбранной поверхности), крайне редко используется на практике и количество соответствующих работоспособных методов на сегодняшний день крайне мало.

На основании обзора литературы и мировых патентов на изобретения за прошедшие 100 лет сделан вывод, что в части газодинамической (пневматической) сепарации имеется всего 10 запатентованных конструкций. Все известные методы сводятся к стесненному движению частиц в горизонтальном или вертикальном потоке газа в трубе круглого или прямоугольного сечения и используют только различие частиц компонентов по плотности. В целом существующие методы сухого обогащения рассматриваются только как вынужденная мера при невозможности использования воды, либо вообще не предназначены для обогащения рудного сырья и полуфабрикатов цветных и благородных металлов.

С учетом того, что единственным ресурсом, имеющимся в неограниченном доступе вне зависимости от расположения месторождения и климатических условий, является воздух, сделан вывод, что принципиально наиболее перспективным из сухих процессов обогащения является аэродинамический.

В связи с тем, что частицы благородных металлов и вмещающей породы различаются не только по плотности, но и по коэффициентам трения и восстановления, представляется перспективной разработка комбинированного

метода обогащения, сочетающего в себе аэродинамическую сепарацию и дополнительное ударное разделение промежуточного продукта, с реализацией режима движения частиц, близкого к свободному.

В главе 2 приведены результаты исследований закономерностей движения твердых частиц под действием динамического давления ламинарного потока газа в горизонтальном разгонном канале с обеспечением режима движения, близкого к свободному (ширина сечения канала превышает высоту более чем на порядок, высота – сравнима с размерами частиц).

Для проведения экспериментальных исследований сконструирована установка, принципиальная схема которой изображена на рисунке 1. Через загрузочное отверстие 1 в расходный бункер питателя 2 загружается исходная смесь 3, которая при помощи шнека подается в горизонтальный разгонный канал 5. В разгонный канал также нагнетается воздух от компрессора 4. Разгонный канал установлен на стойке 6 с возможностью регулировки высоты. Тяжелая фракция после выхода из разгонного канала с малой скоростью попадает в приемные контейнеры, а легкая фракция, выходящая с большой скоростью – в приемные контейнеры 8. В приемные контейнеры 9 попадают продукты разделения промежуточного продукта, который после выхода из разгонного канала взаимодействует с отражающей поверхностью 10. Приемные контейнеры и отражающая поверхность также установлены на регулируемых стойках 6.

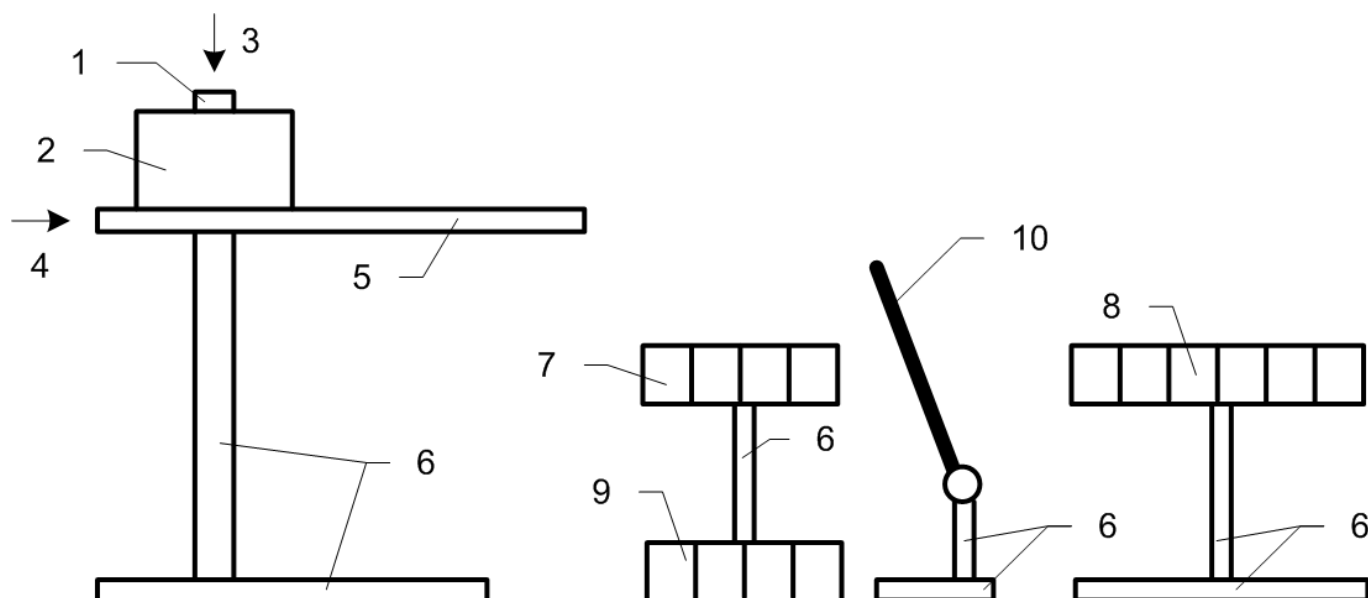


Рисунок 1 – Принципиальная схема установки

Принципиальная схема аэродинамической сепарации приведена на рисунке 2. Режим движения частиц близкий к свободному достигается ограничением расхода питания – объемное соотношение Т/Г не превышает 1:200; ламинарный поток воздуха обеспечивается тем, что высота разгонного канала не превышает размер частиц более, чем на порядок, что приводит к снижению гидравлического диаметра. Ширина разгонного канала многократно превышает размер частиц, что обеспечивает достаточную производительность.

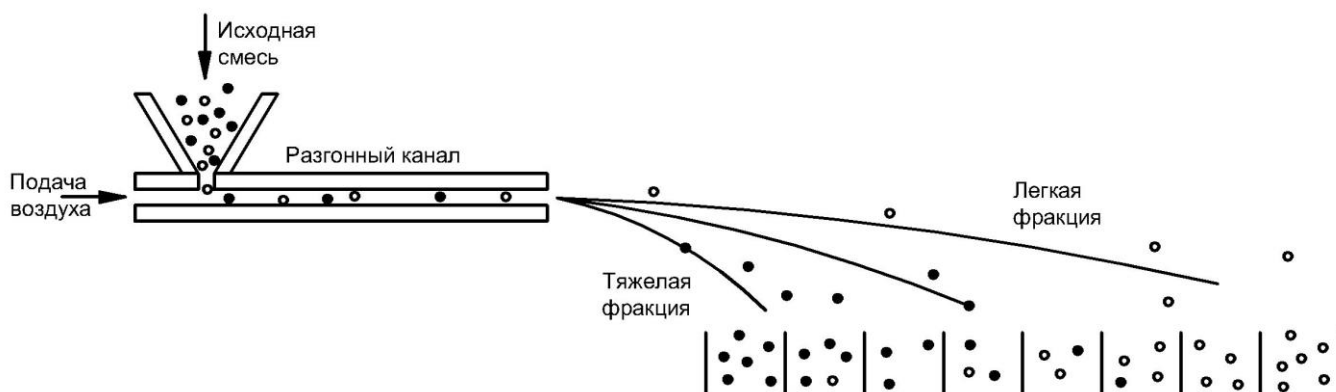


Рисунок 2 – Принципиальная схема аэродинамической сепарации

Для расчета оптимальных скоростей потока воздуха и длины разгонного канала, при которых в точке выхода из него скорости частиц разных компонентов будут максимально отличаться друг от друга, разработана математическая модель, в основу которой заложены следующие параметры и известные формулы (таблица 1).

Таблица 1 – Математическая модель аэродинамической сепарации

Обозначение	Наименование
Входящие данные (измеряемые величины)	
D	Диаметр частицы (м)
ρ	Плотность частицы (кг/м ³)
H	Высота внутренней части разгонного канала (м)
B	Ширина внутренней части разгонного канала (м)
T	Температура воздуха (К)
p	Давление воздуха (Па)
μ	Динамическая вязкость воздуха (Па · с)
k	Эффективный коэффициент трения
u	Скорость воздуха (м/с)
L	Длина разгонного канала (м)
Расчетный блок	
$d_2 = \frac{2HB}{H+B}$	Гидравлический диаметр разгонного канала (м)
$\rho_2 = \frac{0,029 p}{RT}$	Плотность воздуха (кг/м ³)
$V = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d}{2}\right)^3$	Объем частицы (кг/м ³)
$m = \rho V$	Масса частицы (кг)
$N = mg$	Вес частицы (Н)
$F_{тр} = kN$	Сила трения о стенки разгонного канала (Н)
$Re = \frac{\rho_2 (u-v) d}{\mu}$	Число Рейнольдса для режима обтекания частицы
$\psi = \begin{cases} \frac{7,27}{Re^{0,6}} & \text{при } Re < 500 \\ 0,173 & \text{при } Re \geq 500 \end{cases}$	Коэффициент аэродинамического сопротивления

Обозначение	Наименование
$F = \psi \rho_2 (u-v)^2 d^2$	Сила аэродинамического сопротивления (Н)
$R = F - F_{\text{тр}}$	Равнодействующая сила, действующая на частицу (Н)
$\frac{v}{\lambda(u-v)^2 - \varepsilon} dv = dL$ $\lambda = \frac{\psi \rho_2 d^2}{m}, \varepsilon = \frac{F_{\text{тр}}}{m}$	Уравнение, связывающее пройденный частицей путь и скорость, набранную по прохождении данного пути
Исходящие параметры (результат)	
v	Скорость частицы (м/с)

Для производства автоматизированных расчетов и математического анализа использован пакет MathCAD.

Дифференциальное уравнение, устанавливающее связь пути, пройденного частицей, и скорости, набранной по прохождении этого пути, получено методом дифференциально-интегрального преобразования Второго закона Ньютона с подстановкой равнодействующей силы, под действием которой ускоряется частица. Уравнение учитывает тот факт, что сила аэродинамического сопротивления снижается в процессе разгона, т.к. изменяется разность скоростей частицы и воздуха.

Проведена двухэтапная экспериментальная проверка правильности разработанной математической модели. На первом этапе правильность модели подтверждена в ходе постановки виртуальных экспериментов в программной среде трехмерного физико-механического моделирования «Dynamics», входящей в состав пакета трехмерного моделирования «3ds max». Данный инструмент позволяет регистрировать скорость движения твердого тела под действием силы, изменяющейся по заданному закону, в зависимости от заданных размеров и массы этого тела. По результатам установлено соответствие экспериментальных величин расчетным.

На втором этапе разработана и сконструирована лабораторная установка, позволяющая устанавливать необходимую скорость потока воздуха и длину разгонного канала, а также регистрировать скорость движения твердых частиц во всех его точках. На лабораторной установке проведено сравнение экспериментальных скоростей движения шарообразных частиц со значениями, рассчитанными по математической модели при тех же параметрах процесса. Получена удовлетворительная сходимость расчетных и экспериментальных величин (рисунки 3-5), на основании чего сделан вывод о корректности разработанной модели.

Расчетным путем по модели установлено, что для каждой конкретной смеси двух компонентов существует оптимальная длина пути разгона, по прохождении которой скорости движения частиц различных компонентов отличаются друг от друга максимально, причем данный оптимальный путь зависит от линейной скорости потока газа. В общем случае характер разгона частиц показан на рисунке 6.

Установлено, что характер выявленных зависимостей типичен для любых пар частиц, различающихся крупностью и плотностью.

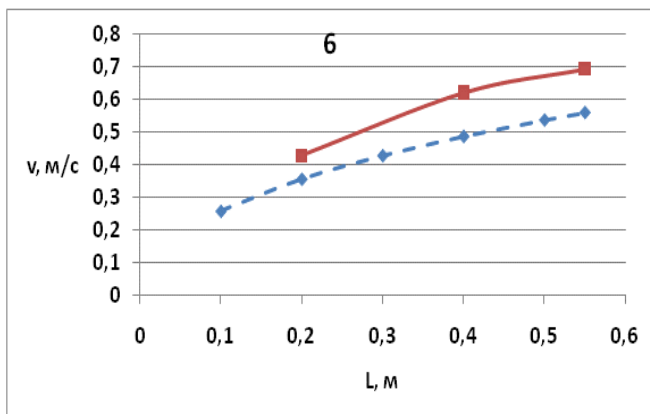


Рисунок 3 – Зависимость скорости (м/с) свинцовых шариков ($d = 1,75$ мм) от пройденного пути (м) при $u = 6$ м/с (пунктирным – расчетная, сплошным – экспериментальная)

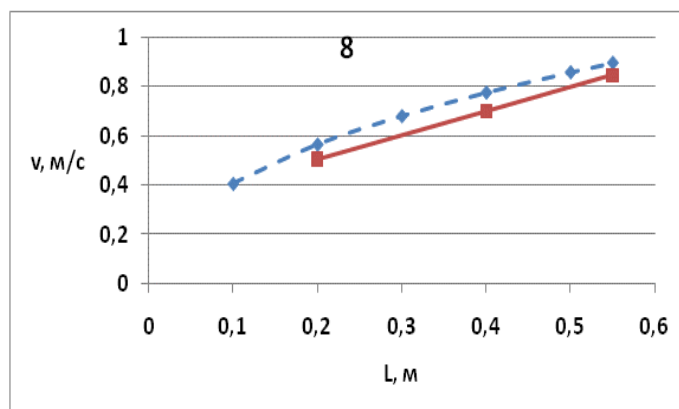


Рисунок 4 – Зависимость скорости (м/с) свинцовых шариков ($d = 1,75$ мм) от пройденного пути (м) при $u = 8$ м/с (пунктирным – расчетная, сплошным – экспериментальная)

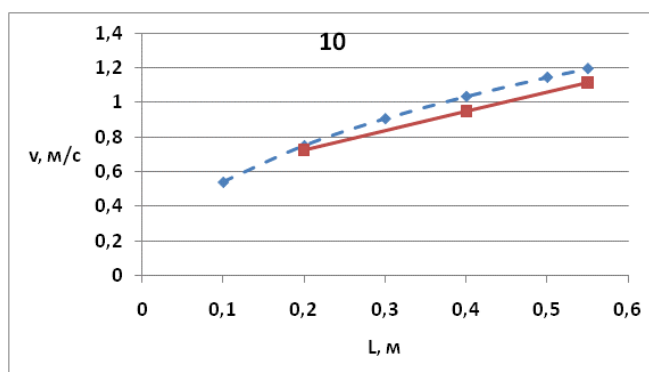


Рисунок 5 – Зависимость скорости (м/с) свинцовых шариков ($d = 1,75$ мм) от пройденного пути (м) при $u = 10$ м/с (пунктирным – расчетная, сплошным – экспериментальная)

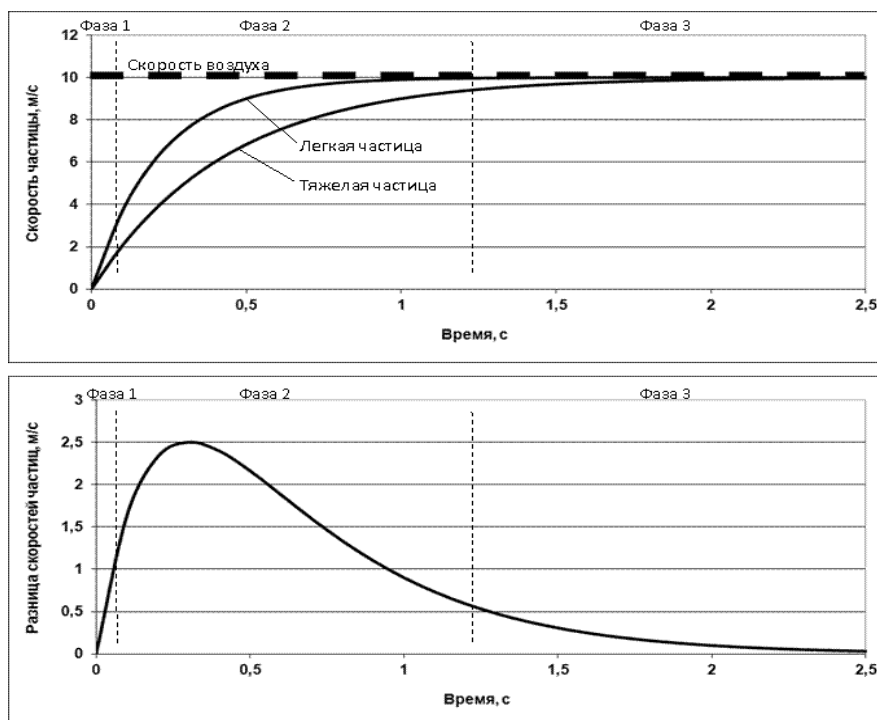


Рисунок 6 – Общий вид зависимости скоростей частиц разных компонентов от времени

В главе 3 приведены результаты изучения возможности использования различия физических свойств частиц (коэффициент трения и коэффициент восстановления в паре с материалом выбранной твердой поверхности) для разделения промежуточного продукта, полученного аэродинамической сепарацией, с использованием ударной сепарации.

Процесс ударной сепарации заключается в том, что частицы разных компонентов смеси, движущиеся к поверхности с равными скоростями по параллельным траекториям, в зависимости от коэффициента трения и коэффициента восстановления в паре с материалом выбранной поверхности, могут отскакивать от этой поверхности в разных направлениях с разными скоростями (рисунок 7).

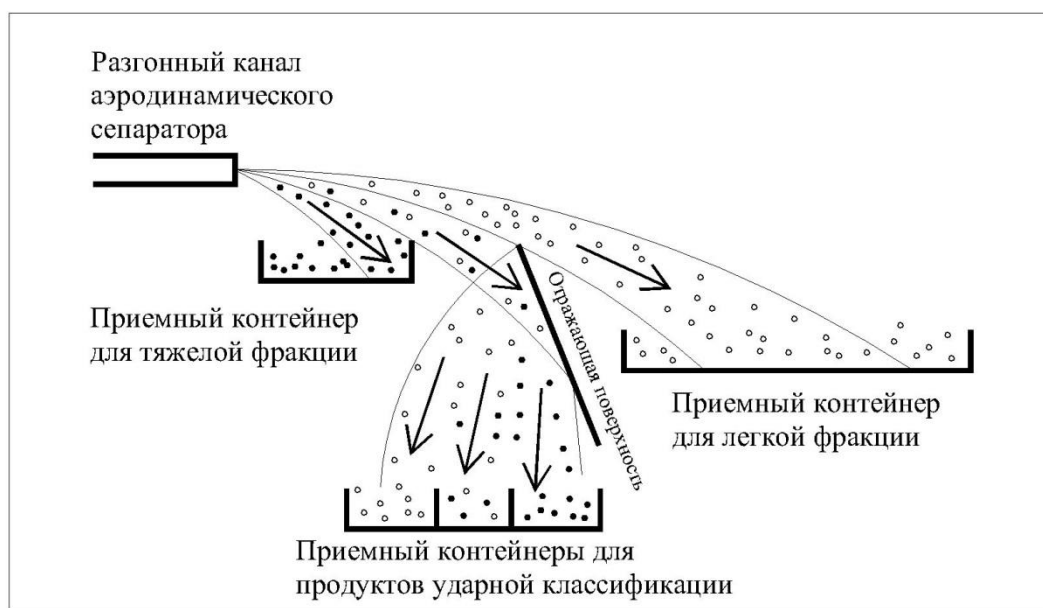


Рисунок 7 – Расположение отражающей поверхности для разделения промпродукта аэродинамической сепарации

Для установления взаимосвязи скорости и угла падения частицы на поверхность, коэффициентов трения и восстановления пары материалов «частица-поверхность» со скоростью и направлением отскока частицы сформулирована математическая модель ударного взаимодействия твердых частиц с поверхностью, основанная на известных закономерностях деформации, скольжения и восстановления при ударе материальной точки о неподвижную поверхность:

$$u = v \sqrt{[\sin \alpha - f(1 + K) \cos \alpha]^2 + (K \cos \alpha)^2} \text{ при } \operatorname{tg} \alpha > f(1 + K),$$

$$u = Kv \cos \alpha \text{ при } \operatorname{tg} \alpha \leq f(1 + K),$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{K} - f \left(1 + \frac{1}{K} \right) \text{ при } \operatorname{tg} \alpha > f(1 + K),$$

$$\operatorname{tg} \beta = 0 \text{ при } \operatorname{tg} \alpha \leq f(1 + K), \text{ где:}$$

u – скорость материальной точки после удара,
 v – скорость материальной точки до удара,
 α – угол падения (угол между вектором v и нормалью к поверхности),
 β – угол отскока (угол между вектором u и нормалью к поверхности),
 f – коэффициент трения,
 K – коэффициент восстановления.

Критерием оптимизации процесса ударного разделения является максимальное расстояние между приемными контейнерами, в которые попадают частицы разных компонентов после отскока от поверхности.

Установлено, что значительное различие в коэффициентах трения частиц приводит в большей степени к повышению разности углов отскока, а значительное различие в коэффициентах восстановления – к увеличению разности скоростей отскока.

Следовательно, при определенных диапазонах угла установки поверхности может наблюдаться как повышение эффективности сепарации по данным двум свойствам, так и снижение (таблица 2).

Таблица 2 – Варианты повышения и снижения эффективности сепарации в зависимости от свойств частиц, определяющих ход процесса упругого удара

Показатель	Вариант 1	Вариант 2
Способ установки поверхности	Установлена так, что среднее направление отскока частиц близко к вертикальному	Установлена так, что среднее направление отскока частиц близко к горизонтальному
Графическая схема установки поверхности		
Случай 1: (K_1-K_2) \uparrow (f_1-f_2) \uparrow	Разделение происходит преимущественно за счет разности углов отскока, обусловленной различием коэффициентов трения.	Частицы первого компонента отскакивают с большей скоростью и под углом, более близким к 90°. Кумулятивное наращивание эффективности сепарации.
Случай 2: (K_1-K_2) \uparrow $ f_1-f_2 $ \downarrow	Разделение неэффективно из-за малой разницы углов отскока частиц.	Разделение происходит преимущественно за счет разности скоростей отскока, обусловленной различием коэффициентов восстановления

Показатель	Вариант 1	Вариант 2
Случай 3: $ K_1 - K_2 \downarrow$ $(f_1 - f_2) \uparrow$	Разделение происходит преимущественно за счет разности углов отскока, обусловленной различием коэффициентов трения.	Разделение малоэффективно происходит преимущественно за счет разности углов отскока, обусловленной различием коэффициентов трения.
Случай 4: $ K_1 - K_2 \downarrow$ $ f_1 - f_2 \downarrow$	Разделение неэффективно из-за незначительного различия свойств.	Разделение неэффективно из-за незначительного различия свойств.
Случай 5: $(K_1 - K_2) \uparrow$ $(f_2 - f_1) \uparrow$	Разделение происходит преимущественно за счет разности углов отскока, обусловленной различием коэффициентов трения.	Наблюдается взаимоподавление эффекта разделения, т.к. частицы первого компонента отскакивают с большей скоростью, но под большим отрицательным углом к горизонту.
Случай 6: $(K_2 - K_1) \uparrow$ $(f_1 - f_2) \uparrow$	Разделение происходит преимущественно за счет разности углов отскока, обусловленной различием коэффициентов трения.	Наблюдается взаимоподавление эффекта разделения, т.к. частицы первого компонента отскакивают с большей скоростью, но под большим отрицательным углом к горизонту.

По результатам анализа траекторий частиц с различными физическими свойствами установлено, что:

- при значительном различии в коэффициентах трения частиц разных компонентов следует устанавливать отражающую поверхность так, чтобы среднее направление отскока частиц было максимально приближено к вертикальному;

- при значительном различии в коэффициентах восстановления частиц разных компонентов следует устанавливать отражающую поверхность так, чтобы среднее направление отскока частиц было максимально приближено к горизонтальному;

- при отсутствии существенных различий в коэффициентах трения и восстановления, а равно как и в случае взаимно-противоположных различий в указанных свойствах, следует подобрать другой материал ударной поверхности.

Введено и обосновано понятие «эффективный коэффициент трения» зернистого материала о поверхность, разработана методика его экспериментального определения:

1. Определение среднего времени скатывания навески материала по поверхности фиксированной длины, расположенной под углом к горизонтальной плоскости.

2. Расчет ускорения навески.

3. Расчет коэффициента трения по формуле:

$$k = \frac{a + g \sin \alpha}{g \cos \alpha}, \text{ где:}$$

a – рассчитанное ускорение,

g – ускорение свободного падения,

α – угол между наклонной поверхностью и горизонтальной плоскостью.

4. Повторение эксперимента при других значениях угла наклона поверхности, подтверждение повторяемости результатов.

Предложен следующий алгоритм выбора способа установки отражающей поверхности:

1. Выбор материала отражающей поверхности, экспериментальное определение эффективного коэффициента трения и коэффициента восстановления частиц разделяемых компонентов в паре с материалом поверхности.

2. Расчет оптимального угла падения частиц исходной смеси на поверхность (по математической модели ударной сепарации), при котором достигается:

а) максимальное различие углов отскока – в случае, если наиболее существенно выражена разница в коэффициентах трения,

б) максимальное различие скоростей отскока – в случае, если наиболее существенно выражена разница в коэффициентах восстановления.

3. С учетом кривизны траекторий падения выходящих из разгонного канала частиц промежуточного продукта – расчет оптимального расстояния от точки выхода, на котором необходимо установить поверхность, чтобы при заданном угле падения на нее частиц обеспечить:

а) среднее направление отскока, близкое к вертикальному – в случае, если наиболее существенно выражена разница в коэффициентах трения и разделение производится преимущественно по углу отскока,

б) среднее направление отскока, близкое к горизонтальному – в случае, если наиболее существенно выражена разница в коэффициентах восстановления и разделение производится преимущественно по скорости отскока.

При этом следует учитывать следующие ограничения:

– поверхность должна устанавливаться достаточно близко к точке выхода смеси из разгонного канала, чтобы дисперсия углов, под которыми ориентированы траектории падающих частиц, была как минимум на порядок меньше дисперсии углов отскока; соблюдение этого требования позволяет не учитывать первую из двух указанных величин и выполнить отражающую поверхность плоской.

– поверхность должна устанавливаться на достаточном удалении от точки выхода смеси из разгонного канала, чтобы существовала возможность точно отделить друг от друга расходящиеся потоки продуктов аэродинамической сепарации.

В ходе серии экспериментов с модельными шарообразными частицами и поверхностью из обезжиренного кварцевого стекла установлено, что траектории отскока шарообразных частиц, рассчитанные по формулам теории удара, близки к фактическим траекториям (таблица 3), что свидетельствует об адекватности предложенной модели.

Таблица 3 – Расчетные и экспериментальные значения угла отскока стальных шаров от плоского стекла

Показатель	$\alpha = 30^\circ$	$\alpha = 45^\circ$	$\alpha = 60^\circ$
Расчетный угол отскока (β)	34,0	50,6	65,1
Фактический угол отскока (β)	35	50	65
Разность	+2,9 %	–1,2 %	–0,15 %

В главе 4 исследованы прогностические способности разработанной математической модели аэродинамической и ударной сепарации применительно к смесям реальных минеральных материалов, которые состоят из частиц, обладающих неоднородностью и дисперсией свойств (диаметр, масса, плотность, форма).

В качестве таких материалов использованы природные минералы: кварцевый песок и ильменит фракции +0,35 –0,65 мм в массовом соотношении 1:1 (рисунок 8). В связи с тем, что минеральные компоненты имеют неправильную форму, разработан способ ее учета при расчете режимных параметров по модели, основанный на коэффициенте сферичности:

1. Рассчитывается максимально достижимая собственная скорость частицы в разгонном канале бесконечной длины при заданной скорости воздуха.

2. В зависимости от коэффициента сферичности частицы определяется поправочный коэффициент P , показывающий, во сколько раз конечная скорость минеральной частицы относительно воздуха будет отличаться от конечной скорости эквивалентного по объему шара (по литературным данным или расчетно).

3. Рассчитывается уточненная максимальная собственная скорость частицы относительно разгонного канала.

4. Вводится коэффициент P' , равный отношению уточненной максимальной собственной скорости частицы (относительно разгонного канала) и первоначально рассчитанной по модели. Для минеральных частиц $P' > 1$.

5. Расчетная скорость частицы в каждой точке канала умножается на P' .

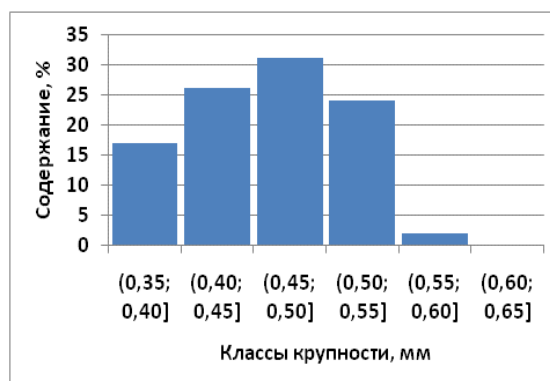
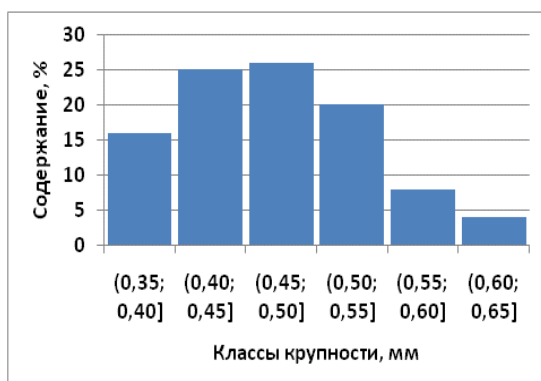
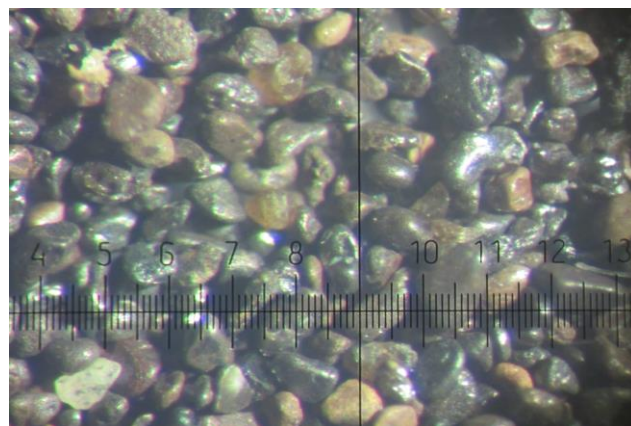
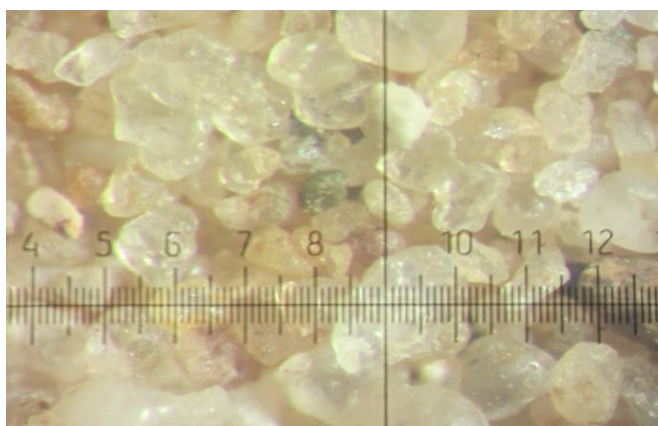


Рисунок 8 – Микрофотографии и гранулометрический состав разделяемых минеральных компонентов

По модели, с учетом поправки на неправильную форму частиц, произведен расчет скоростей частиц кварца в разных точках вдоль разгонного канала при различных значениях скорости воздуха. На лабораторной установке проведены серии экспериментов, в ходе которых зарегистрирована фактическая скорость частиц кварца при тех же параметрах процесса. Установлена удовлетворительная сходимость расчетных и экспериментально определенных значений скорости (рисунки 9-11) и, как результат, подтверждена применимость предложенного способа учета неправильной формы частиц.

По модели, уже учитывающей неправильную форму частиц, рассчитаны оптимальные параметры аэродинамической сепарации смеси кварца и ильменита. В ходе расчета установлено, что максимально достижимая разность их скоростей составляет 1,25 м/с, и она достигается при выходе из разгонного канала длиной 1,00 м при скорости воздуха 8 м/с (рисунок 12).

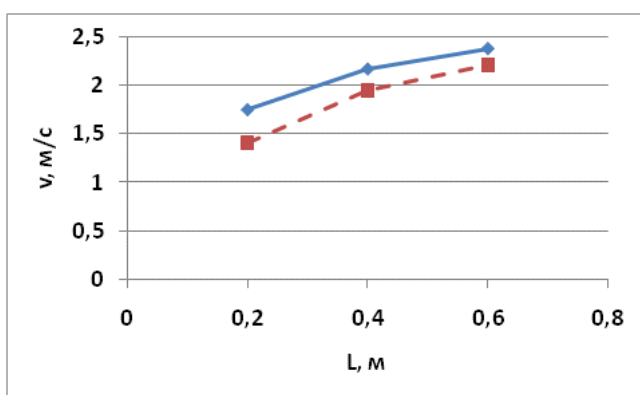


Рисунок 9 – Расчетная (сплошная) и фактическая (пунктирная) зависимость скорости движения частиц кварца от пройденного расстояния при скорости воздуха $u = 6$ м/с

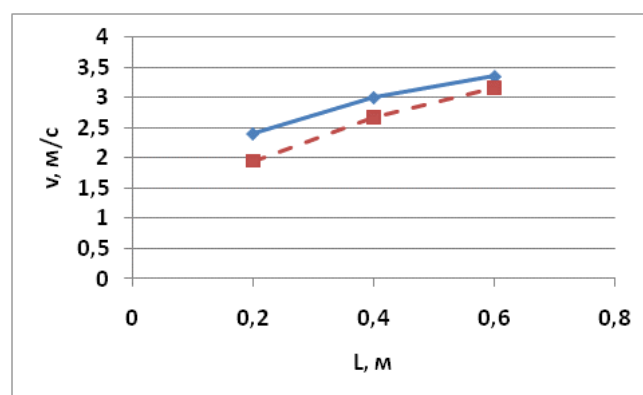


Рисунок 10 – Расчетная (сплошная) и фактическая (пунктирная) зависимость скорости движения частиц кварца от пройденного расстояния при скорости воздуха $u = 8$ м/с

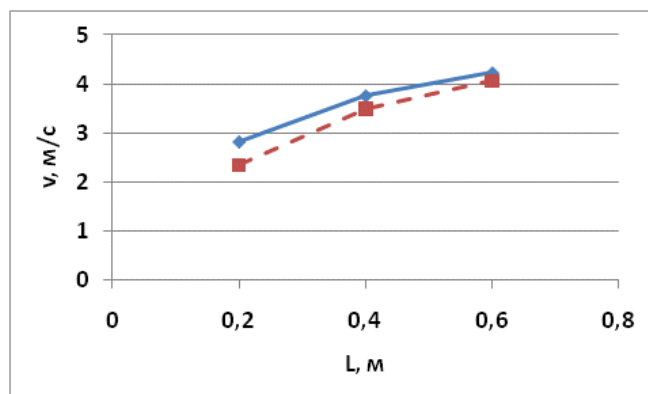


Рисунок 11 – Расчетная (сплошная) и фактическая (пунктирная) зависимость скорости движения частиц кварца от пройденного расстояния при скорости воздуха $u = 10$ м/с

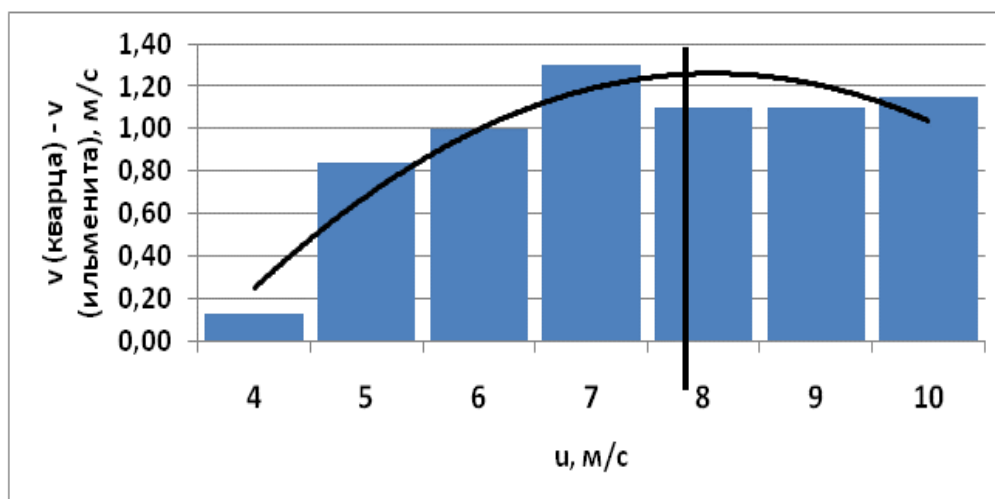


Рисунок 12 – Максимальные разности скоростей частиц кварца и ильменита, достигаемые при различных скоростях воздуха (u)

Проведена аэродинамическая сепарация кварца и ильменита на различных режимах (скорость воздуха, длина пути разгона) и установлено, что режим, рассчитанный по модели, привел к получению наилучшего результата при одинаковых требованиях к продуктам процесса. Таким образом, доказана возможность и подтверждена правильность расчета по модели оптимальных режимных параметров аэродинамической сепарации. Показатели аэродинамической сепарации смеси, содержащей 50 % ильменита и 50 % кварца, приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Показатели аэродинамической сепарации при длине разгонного канала 1,00 м и различных значениях скорости воздуха (6, 8 и 10 м/с)

Показатель	u = 6 м/с	u = 8 м/с		u = 10 м/с
		Фактические	Расчетные	
Концентрат				
γ, %	15,5	18,1	19,6	16,3
ε (FeTiO ₃) , %	27,9	32,6	35,4	29,3
β, %	90,0	90,0	90,0	90,0
Промпродукт				
γ, %	77,8	73,9	68,8	76,5
ε (FeTiO ₃) , %	71,4	66,6	63,5	69,9
β, %	45,9	45,1	46,0	45,7
Хвосты				
γ, %	6,7	8,0	11,6	7,2
ε (FeTiO ₃) , %	0,7	0,8	1,1	0,7
θ, %	5,0	5,0	5,0	5,0

Сделан вывод о том, что повторная аэродинамическая сепарация промежуточного продукта возможна с эффективностью, не уступающей эффективности сепарации исходной смеси, т.к. наличие промежуточного продукта вызвано исключительно дисперсией траекторий потоков частиц обоих компонентов.

Расчетно установлено, что при заданных требованиях к продуктам процесса (максимальное содержание ильменита в хвостах – 5 %, минимальное содержание в концентрате – 90 %) проведение в одну стадию аэродинамической сепарации смеси, содержащей 50 % ильменита и 50 % кварца, будет сопровождаться циркулирующей нагрузкой, равной 1200 %.

На основании полученного результата предложена технологическая схема, представляющая собой каскад двух аэродинамических сепараторов, работающих без вывода промпродукта с перекрестной передачей хвостов и концентрата соответственно (рисунок 13). Суммарная циркулирующая нагрузка составила 320 %.

По модели рассчитаны оптимальные угол наклона и точка установки отражающей поверхности из обезжиренного кварцевого стекла для дополнительного разделения промежуточного продукта аэродинамической сепарации. В результате достигнут дополнительный вывод хвостов, и при сходных требованиях к продуктам процесса циркулирующая нагрузка на технологическую схему, состоящую из одного аэродинамического сепаратора с отражающей поверхностью, зафиксирована на уровне 163 % (рисунок 14).

В данном конкретном примере расчетно установлено, что для максимизации эффективности процесса аэродинамическую стадию разделения необходимо вести без вывода промпродукта, как и предыдущем случае.

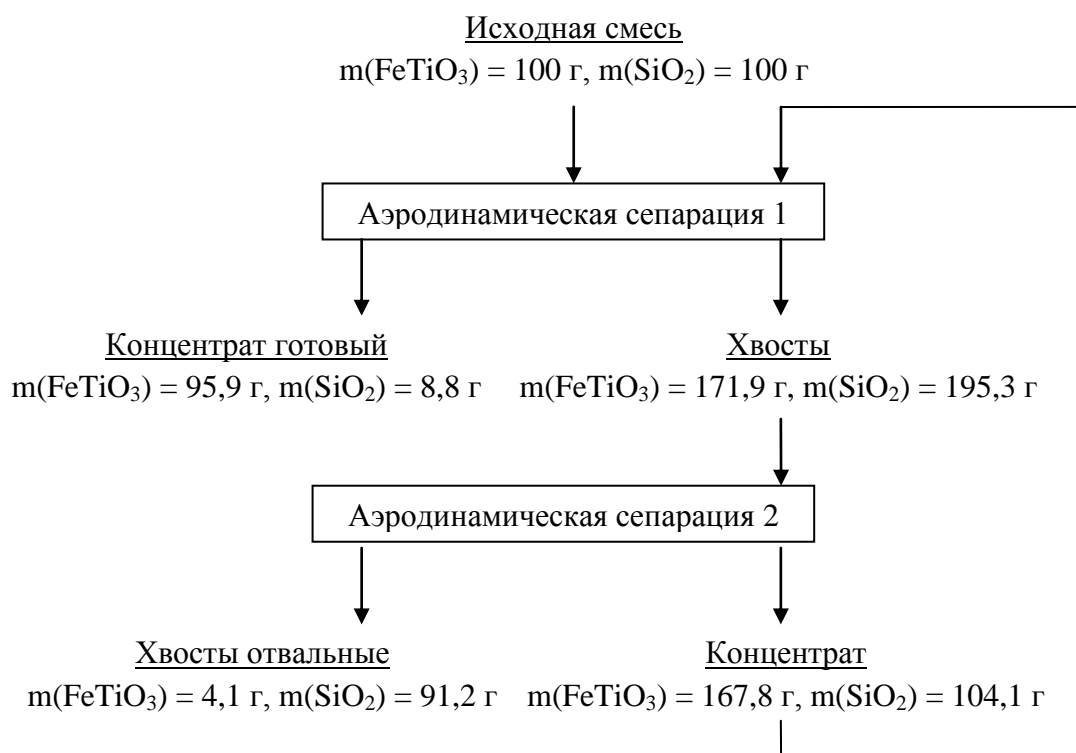


Рисунок 13 – Каскадная схема аэродинамической сепарации кварца и ильменита

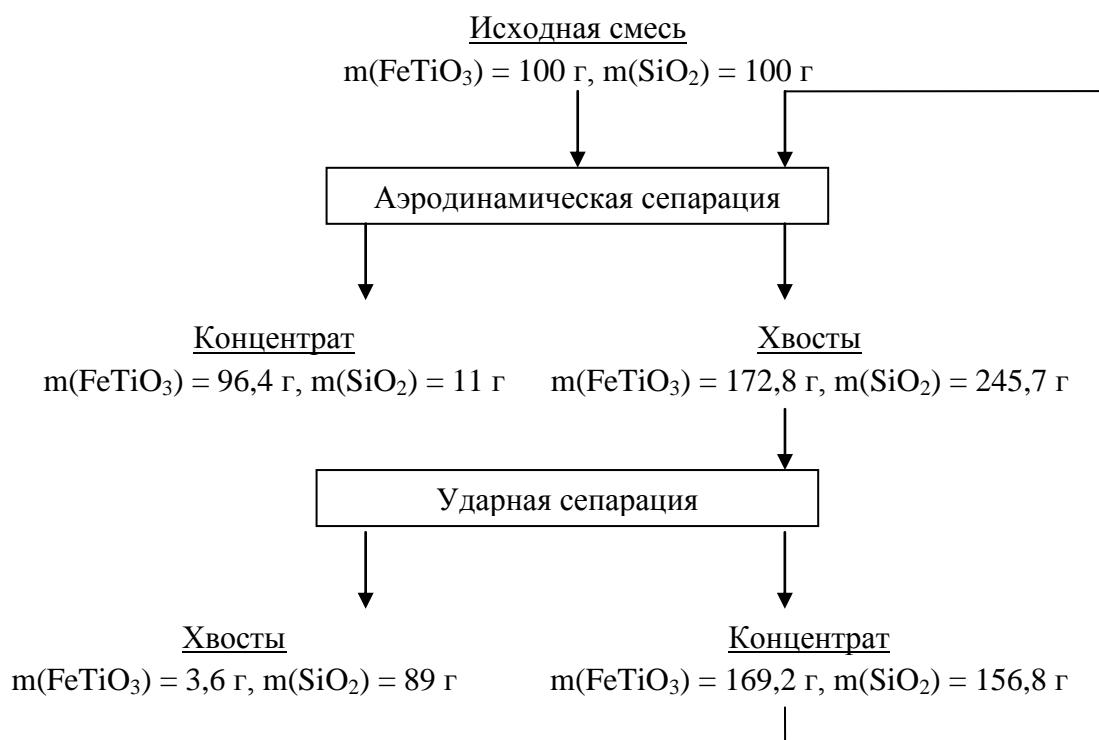


Рисунок 14 – Схема аэродинамической и ударной сепарации кварца и ильменита

Таким образом, при одновременном использовании различий в комплексе нескольких физических свойств разделяемых компонентов установлена возможность проведения процесса в одну стадию и зафиксировано снижение суммарной циркулирующей нагрузки с 320 % до 163 % от массы исходной смеси при том же составе исходного сырья и тех же требованиях к продуктам процесса, описанных выше.

Проведен ряд дополнительных экспериментов, направленных на изучение поведения минеральных частиц в разгонном канале. В частности, осуществлена съемка отпечатков, произведенных потоком частиц кварца на слое ультратонкого порошка, нанесенного на внутреннюю часть разгонного канала (рисунок 15).

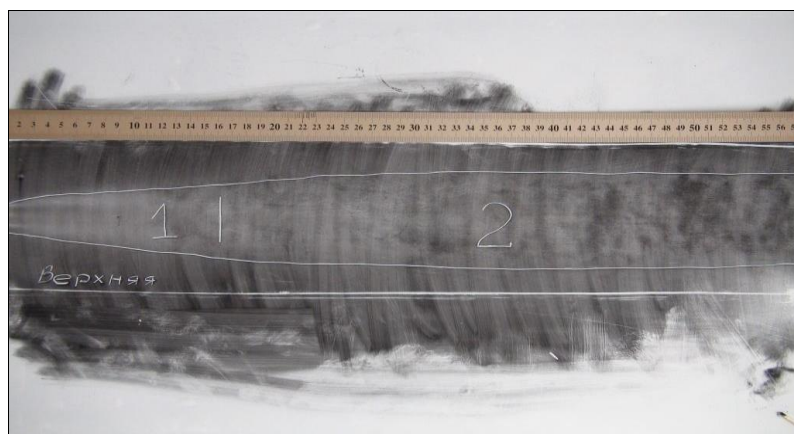


Рисунок 15 – След от летящих частиц на стенке разгонного канала (кварц фракции +0,4 –0,63 мм, $v = 8 \text{ м/с}$). Зона 1 – установление режима и расширение потока, зона 2 – движение в ламинарном потоке воздуха.

Установлено, что на установление стабильного режима разгона после загрузки смеси в канал требуется определенное время, и эмпирически определено, что длина разгонного канала (в метрах) численно не должна быть меньше 2,5 % от величины скорости воздуха, выраженной в м/с.

Произведена оценка влияния гранулометрического состава смеси на эффективность аэродинамической сепарации, которая может снижаться вследствие имеющей место дисперсии траекторий потоков частиц каждого компонента. Установлено, что относительное отклонение скоростей движения частиц одного компонента от средней скорости практически пропорционально относительному отклонению диаметра частиц этого от их среднего диаметра (таблица 5).

Таблица 5 – Сравнение средних квадратических отклонений диаметров частиц и скоростей их движения.

Величина	Средняя	СКО, абс.	СКО, отн. %
Скорость движения частицы ильменита, м/с	2,95	0,89	30
Диаметр частиц ильменита, м	0,46	0,09	19,6
Скорость движения частицы кварца, м/с	3,8	0,88	23
Диаметр частиц кварца, м	0,47	0,10	22,2

С применением компьютерной среды физико-механического моделирования «Dynamics» изучено влияние морфологии частиц на эффективность ударной сепарации. В данной среде моделирования проведены серии виртуальных экспериментов, по результатам которых установлены следующие качественные зависимости:

1. эффективность ударной сепарации повышается асимптотически от частиц, имеющих острые грани, к частицам, имеющим обтекаемую форму (рисунок 16);

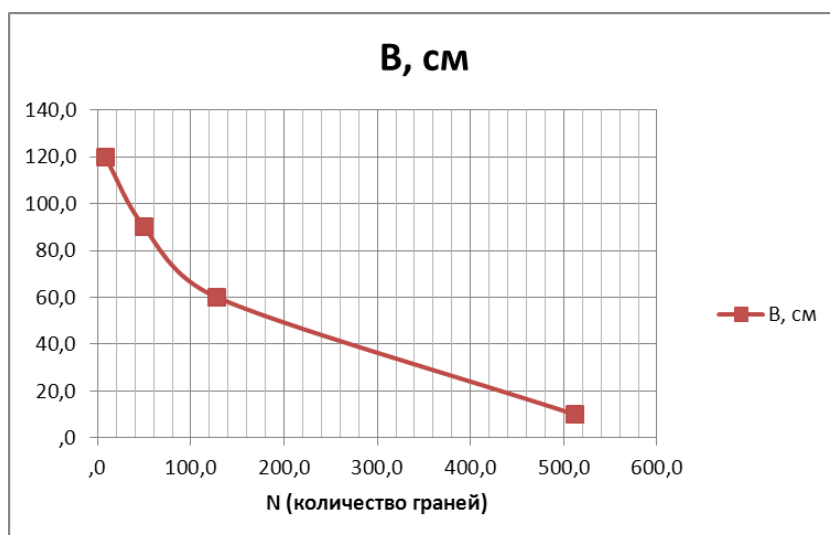


Рисунок 16 – Общий вид зависимости дисперсии скоростей отскока (B) от количества граней частицы (N).

2. эффективность ударной классификации повышается с повышением коэффициента сферичности частиц (рисунок 17);

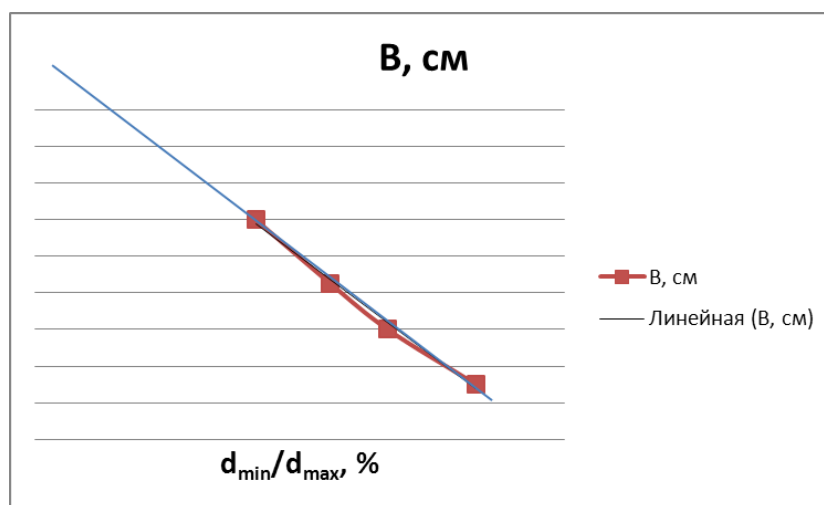


Рисунок 17 – Общий вид зависимости дисперсии скоростей отскока (B) от коэффициента сферичности частиц.

3. Резкое различие первых двух свойств у разделяемых компонентов приводит к существенному повышению эффективности ударной сепарации, т.к. у частиц, имеющих обтекаемую форму и высокий коэффициент сферичности, снижается дисперсия углов и скоростей отскока, в результате чего они образуют обогащенный продукт. Наиболее значимо это сказывается при разделении металлических и минеральных частиц.

Установлено, что гранулометрический состав не влияет на эффективность ударной классификации.

В главе 5 на основании установленных закономерностей движения твердых частиц в плоском воздушном канале и их ударного взаимодействия с отражающей поверхностью создана методика расчета режимных параметров аэродинамической и ударной сепарации зернистых продуктов, обеспечивающих их эффективное обогащение (скорость потока воздуха, длина разгонного канала, расположение отражающей поверхности). Методика базируется на плотностях, диаметрах и морфологии частиц разделяемых компонентов.

Расчет режимных параметров осуществляется в следующем порядке:

1. определение плотности и средних диаметров частиц каждого из разделяемых компонентов;

2. определение эффективных коэффициентов трения каждого из компонентов смеси в паре с материалом стенок разгонного канала;

3. построение по математической модели расчетных зависимостей скоростей движения частиц каждого из компонентов от пройденного в разгонном канале расстояния при различных значениях скорости воздуха. Выбор оптимальных значений скорости воздуха и длины разгонного канала, при которых скорости частиц разделяемых компонентов максимально отличаются друг от друга;

4. определение эффективных коэффициентов трения и коэффициентов восстановления каждого из компонентов смеси в паре с материалом выбранной отражающей поверхности. При необходимости – подбор материала отражающей поверхности, обеспечивающий максимальное различие компонентов смеси по одному из указанных коэффициентов;

5. расчет расположения ударной поверхности (дальность от точки выхода частиц из разгонного канала, угол наклона);

6. построение материальных потоков.

В главе 6 расчетным путем доказана применимость аэродинамической и ударной сепарации для концентрирования платины и металлов платиновой группы в дробленом шлаке вторичной анодной электроплавки ЗФ ОАО «ГМК «Норильский никель», представляющем собой силикатную матричную составляющую, содержащую вторичные шпинели, и многофазные металлизированные корольки, средний состав которых, % масс.: Fe – 22,7; Ni – 59,3; S – 2,5; Co – 1,9; Cu – 8,0; Se – 0,75; Rh – 0,18; Pd – 1,2; Ag – 3,4. Основные компоненты корольков – металлический сплав на основе никеля, сульфидная составляющая, содержащая селен и фаза серебра (палладий, родий).

На основании имеющихся данных о действующей в ЗФ ОАО «ГМК «Норильский никель» схеме материальных потоков, а также о параметрах процессов, потерях благородных металлов в них, и о составе шлака вторичной анодной электроплавки, установлено, что фракция +0,16 -0,5 мм шлака, выход которой при измельчении составляет 66,7 %, может быть обогащена методом аэродинамической и ударной сепарации с полным извлечением корольков в отдельный продукт, содержащий 1,2 % Pd. Балансы платины и палладия при переработке шлака существующим методом (на переделе конвертирования медного штейна) и с применением аэродинамической сепарации приведены, соответственно, в таблицах 6 и 7.

Таблица 6 – Баланс платины и палладия при переработке шлака на переделе конвертирования медного штейна

Наименование	Масса, т	Pt			Pd		
		г/т	м, кг	ε, %	г/т	м, кг	ε, %
Переработано:							
Фракция -0,16 мм	85,17	37,50	3,19		150,00	12,78	
ВСЕГО			3,19			12,78	
Получено:							
Готовая продукция			2,89	90,53		11,57	90,53
Потери			0,30	9,47		1,21	9,47
ВСЕГО			3,19	100,00		12,78	100,00

Таблица 7 – Баланс платины и палладия при переработке шлака на вторичной анодной электроплавки с предварительным аэродинамическим обогащением

Наименование	Масса, т	Pt			Pd		
		г/т	м, кг	ε, %	г/т	м, кг	ε, %
Переработано:							
Фракция +0,16 мм	170,33	1194,27	203,42		4777,08	813,70	
ВСЕГО			203,42			813,70	
Получено:							
Готовая продукция			201,39	99,00		805,56	99,00
Потери			2,03	1,00		8,14	1,00
ВСЕГО			203,42	100,00		813,70	100,00

Качество концентрата после аэродинамической сепарации шлака позволит осуществлять его возврат в анодную электропечь металлургического цеха Медного завода. Это позволит снизить оборот благородных металлов через технологическую ветвь «конвертирование медного штейна – огневое рафинирование меди – электролиз меди – переработка медного шлама», в результате чего их потери снизятся на 8,47 абс. %, а сквозное извлечение в готовую продукцию возрастет, соответственно, до 98,87 %.

С учетом текущих объемов шлака (около 700 кг/сутки) и содержаний благородных металлов в них (255,5 г/т платины, 3234,72 г/т палладия) количество дополнительно извлеченных металлов в год составит: 68,92 кг Pd, 17,23 кг Pt, 2,2 кг Au, 68,96 кг Ag и 2,71 кг Rh. Биржевая стоимость данного количества благородных металлов составляет 80 745 246 рублей.

Расчетным путем установлено, что аэродинамическая и ударная сепарация шлака может быть осуществлена при скорости потока воздуха, равной 8 м/с в разгонном канале длиной 1 м.

Разработана конструкция установки с габаритными размерами 1х1х1,7 м. Рассчитано, что 9 таких установок позволят перерабатывать весь годовой объем шлака после измельчения – 170 тонн.

Данный расчет докладывался на научно-техническом совете металлургического цеха Медного завода, по результатам получено положительное экспертное заключение, подтверждающее применимость аэродинамической и ударной сепарации для переработки шлака вторичной анодной электроплавки с заявленными показателями.

ОБЩИЕ ВЫВООДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработана детерминированная математическая модель движения минеральных частиц в совмещенных процессах аэродинамической и ударной сепарации, связывающая скорость и траекторию движения частиц с крупностью, плотностью и коэффициентами трения и восстановления, позволяющая подбирать оптимальные условия процессов сепарации по критериям разности скоростей разделяемых фракций в плоском канале и разности горизонтальной составляющей скорости частиц после удара о поверхность.

2. Установлены закономерности поведения частиц в процессе аэродинамической сепарации, проявляющиеся в экстремальном характере зависимости разности скоростей частиц различной плотности, крупности, формы и эффективности сепарации от длины разгонного канала.

3. Установлена взаимосвязь между положением точки падения частицы на горизонтальную плоскость и параметрами процесса ударной сепарации (скорость и угол падения твердой частицы на отражающую поверхность, коэффициенты восстановления и трения пары материалов «частица-поверхность», расположение поверхности в пространстве), что позволяет выбрать оптимальные параметры ударной сепарации и обеспечить наиболее эффективное разделение частиц компонентов исходной смеси.

4. Разработаны экспериментальные методики, позволяющие на основе фиксирования и математического анализа траекторий движения кусков разделяемых фракций определять динамические характеристики процесса разгона частиц потоком воздуха в плоском канале, а также характеристики упругого удара в системе «частица-твердая поверхность».

5. Создана методика расчета режимных параметров аэродинамической и ударной сепарации зернистых продуктов, обеспечивающих их эффективное обогащение.

6. Разработана конструкция сепаратора для обогащения платиносодержащих дробленых шлаков вторичной анодной электроплавки Заполярного филиала ОАО «ГМК «Норильский никель» методом комбинирования аэродинамической и ударной сепарации.

7. Разработан технологический режим аэродинамической и ударной сепарации для обогащения платиносодержащих дробленых шлаков вторичной анодной электроплавки Заполярного филиала ОАО «ГМК «Норильский никель».

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. **Тюкин А.П.** Технология безводной сепарации сыпучих смесей, основанная на различии физических свойств составляющих компонентов и геометрических параметров частиц. «Цветные металлы» № 10, 2011, с. 11-16.

2. **Тюкин А.П.** Аэродинамическая сепарация и ударная классификация зернистых материалов. «Обогащение руд» № 5, 2011, с. 7-12.

3. Пат. 102312 Российская Федерация, МПК В 07 В 7/04. Устройство для сепарации частиц из сыпучих материалов / **Тюкин А.П.** № 2009109133; заявл. 13.03.2009; опубл. 27.02.2011, Бюл. № 6.