

На правах рукописи



**ПЕНЬКОВ ПАВЕЛ МИХАЙЛОВИЧ**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА  
ЦЕНТРОБЕЖНОЙ СЕПАРАЦИИ НА ОСНОВЕ ВОЗДУШНОЙ  
ТУРБУЛИЗАЦИИ ПРИСТЕНОЧНОГО СЛОЯ И  
ЦИРКУЛЯЦИОННО-НАКОПИТЕЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ**

Специальность 2.8.9 – «Обогащение полезных ископаемых»

Автореферат диссертации на соискание  
ученой степени кандидата технических наук

Екатеринбург - 2024

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет».

Научный руководитель – **Морозов Юрий Петрович**  
доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:**

**Федотов Константин Вадимович**  
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Обогащения полезных ископаемых и охрана окружающей среды имени С.Б. Леонова» ФГБОУ ВО ИРНИТУ

**Ефремова Татьяна Александровна**  
Кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории обогащения руд цветных металлов и техногенного сырья отдела обогащения (наука) АО «Уралмеханобр»

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

Защита диссертации состоится «28» ноября 2024 г. в 11<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета Д 24.2.423.02, 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» <https://ursmu.ru/penkov-pavel-mikhailovic>

Автореферат разослан «27» сентября 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор технических наук, доцент

 Пелевин А.Е.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Широкое распространение гравитационных методов обогащения полезных ископаемых объясняется их преимуществами перед другими методами переработки минерального сырья. Успешное применение центробежных сепараторов на горно-обогатительных предприятиях подтверждает перспективность проведения дальнейших исследований и конструкторских разработок в этом направлении. Принцип действия центробежного сепаратора заключается в принудительном разделении обрабатываемого материала на две фракции: «тяжелую» и «легкую» в центробежном поле.

Использование центробежных сепараторов позволило снизить крупность разделяемых частиц и применять центробежную сепарацию в качестве одного из основных методов извлечения благородных металлов, а также в качестве дополнения к флотации или цианированию.

Широкое применение центробежных сепараторов при обогащении золотосодержащих руд россыпных и коренных месторождений, лежалых хвостов обогатительных фабрик подтверждает эффективность их использования.

В направлении теоретических исследований центробежной сепарации известны работы Федотова К. В., Морозова Ю. П., Енбаева И. А., Богдановича А. В., Меринова Н. Ф. и других авторов. Показано, что в центробежных полях при увеличении центробежных ускорений возрастают коэффициенты равнопадаемости частиц, представлены результаты изучения классифицирующего и сегрегационного механизмов разделения минеральных частиц в центробежных сепараторах, предложены формулы для определения скоростей перемещения частиц в центробежном поле, получена численная модель для расчета скоростей гидродинамических потоков в конусе центробежного сепаратора, определена связь конструктивных и технологических параметров центробежной сепарации.

Одним из направлений повышения извлечения ценных компонентов в центробежной сепарации является использование воздушной турбулизации пристеночного слоя и циркуляционно-накопительной технологии, которая заключается в циркуляции легкой фракции через центробежный сепаратор, пропускание через центробежный сепаратор последовательно заданного количества порций исходного материала с накоплением частиц повышенной плотности в пазах конуса центробежного сепаратора и однократную разгрузку накопленного материала после пропускания заданного количества порций. Исследованием процессов турбуляционно-накопительной центробежной сепарации занимались Морозов Ю. П., Козин В. З., Комлев С. Г., Комлев А. С., Фалей Е.А., Хамидулин И. Х. Показано, что циркуляционно-накопительная технология позволяет повысить качество получаемых продуктов при максимальном извлечении золота в тяжелую фракцию. Направление требует дальнейшего развития в части совершенствования способов турбуляционно-накопительной центробежной сепарации.

Таким образом, тема диссертации, направленная на повышение эффективности использования турбуляционно-накопительной центробежной сепарации при переработке золотосодержащих руд на основе воздушной турбулизации пристеночного слоя и циркуляционно-накопительной технологии, является актуальной.

**Объектом исследований** является процесс турбулизационной центробежной сепарации.

**Предмет исследования** – закономерности центробежной сепарации с воздушной турбулизацией пристеночного слоя и циркуляционно-накопительной технологией.

**Цель работы** – повышение технологических показателей переработки золотосодержащего сырья.

**Идея работы** заключается в использовании эффекта воздушной турбулизации пристеночного слоя конуса в турбулизационном центробежном сепараторе и циркуляционно-накопительной технологии.

**Задачи исследований:**

1. Теоретический анализ и исследование закономерностей воздушной турбулизации пристеночного слоя конуса и циркуляционно-накопительной технологии в центробежной сепарации.

2. Разработка новых способов центробежной сепарации с применением воздушной турбулизации пристеночного слоя конуса и циркуляционно-накопительной технологии.

3. Экспериментальные исследования разработанных технических решений при переработке золотосодержащего сырья.

4. Опытно-промышленные испытания предлагаемой турбулизационной центробежной сепарации.

5. Техничко-экономическая оценка эффективности предлагаемых технологий.

**Методология и методы исследований.**

Методологической основой являлись работы современных отечественных и зарубежных ученых в области обогащения и переработки золотосодержащего сырья. Ведущим методологическим основанием данного исследования является структурный подход, обусловленный необходимостью разработки комплексной технологии с учетом многообразия свойств золотосодержащего сырья. Работа выполнена с применением методов гидродинамики, прикладной математики, математического и экспериментального моделирования, теоретического анализа. При изучении состава сырья и продуктов разделения применялись методы химического, минералогического, спектрального, фазового, пробирного, ситового анализов. Экспериментальная проверка результатов теоретических исследований выполнялась в лабораторных и промышленных условиях.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Использование воздушной турбулизации пристеночного слоя конуса обеспечивает высокие технологические показатели центробежной сепарации за счет лучшего прохождения частиц повышенной плотности через аэрированный пристеночный слой за счет уменьшения плотности турбулизируемого слоя материала.
2. Центробежная сепарация с использованием циркуляционно-накопительной технологии за счет циркуляции исходного питания через сепаратор и одновременной разгрузки после переработки заданного количества порций

обеспечивает высокое содержание частиц повышенной плотности при максимальном их извлечении в тяжелую фракцию.

**Обоснованность и достоверность результатов** работы подтверждается положительными результатами выполненных исследований, удовлетворительной сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований процесса турбулизационной центробежной сепарации, положительными результатами опытно-промышленных испытаний.

**Научная новизна** работы состоит в следующем:

- определены условия эффективного использования циркуляции легкой фракции центробежного сепаратора в турбулизационной центробежной сепарации;
- математическим и экспериментальным моделированием показана высокая эффективность использования воздушной турбулизации пристеночного слоя и циркуляционно-накопительной технологии;
- предложены новые технические решения турбулизационной центробежной сепарации с использованием воздушной турбулизации пристеночного слоя и циркуляционно-накопительной технологии.

**Практическая значимость работы** заключается в эффективном использовании усовершенствованной турбулизационной центробежной сепарации в технологиях переработки золотосодержащего сырья.

**Реализация результатов работы.** Турбулизационная центробежная сепарация с использованием циркуляционно-накопительной технологии внедрена в технологический регламент обогатительной фабрики по переработке золотосодержащей руды месторождения «Ашалы», использована в учебном процессе при выполнении курсовых работ по дисциплине «Исследование руд на обогатимость» и при выполнении курсовых и выпускных квалификационных работ.

#### **Апробация работы**

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международных научно-технических конференциях: «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья» (г. Екатеринбург, 2017 - 2024 г.); на Межрегиональной выставке «Рудник Урала» (г. Екатеринбург, 2022 г.); на Международной конференции «Инновационные процессы комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья» Плаксинские чтения (г. Апатиты, 2020 г.); на Международной научно-практической конференции «Современные тенденции в области теории и практики добычи и переработки минерального и техногенного сырья» (г. Екатеринбург, 2019 г.).

**Публикации.** Основные положения работы опубликованы в 20 работах, в том числе в 4 работах в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК и в 2 патентах РФ на изобретения.

**Личный вклад автора** состоит в определении цели и задач исследования, разработке методик исследований, организации и непосредственном участии в выполнении лабораторных и опытно-промышленных исследований, анализе и обобщении полученных результатов, формулировании выводов.

**Структура и объём работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников информации из 130

наименований, 6 приложений, содержит 164 страницы машинописного текста, 39 рисунков, 62 таблицы.

## 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, отражены личный вклад автора, реализация и апробация работы.

**В первой главе** рассмотрены современное состояние и возможности совершенствования турбулизационной центробежной сепарации.

Вопросы теории центробежной сепарации получили существенное развитие в трудах Российских ученых Федотова К. В., Богдановича А. В. Морозова Ю. П., Тютюнина В. В., Афанасенко С. И., Фалей Е. А., Хамидулина И. Х.

Выполнено определение формы свободной поверхности жидкости в центробежных сепараторах, исследование характеристик движение жидкости во вращающемся центробежном поле. Разработаны численные модели для расчета скоростей гидродинамических потоков, рассмотрены вопросы механизма сепарации и распределения минералов в пристеночном слое центробежного сепаратора.

Показано, что частицы повышенной плотности в пристеночном слое продвигаются в пазы конуса по сегрегационному механизму. Рассмотрены варианты использования воздуха в процессе перемешивания пристеночного слоя конуса.

Развитием турбулизационной центробежной сепарации является технология центробежной сепарации с циркуляцией хвостов и накоплением частиц золота в пазах центробежного сепаратора. Реализация циркуляционно-накопительной технологии центробежной сепарации открывает новые возможности для совершенствования технологии эффективного извлечения золота в богатые продукты.

**Во второй главе** изучена гидродинамика потоков пульпы в пристеночном слое турбулизационного центробежного сепаратора.

Показано, что поток пульпы во вращающемся конусе центробежного сепаратора образует в нижней части параболоид вращения до точки, в которой первая производная будет равна угловому коэффициенту внутренней поверхности конуса, после чего с повышением уровня по высоте конуса поверхность границы разделения фаз «жидкое-газ» превращается в коноидальную поверхность.

С целью исключения большого расхода воды нами предложено осуществлять турбулизацию пристеночного слоя струями сжатого воздуха.

Проведено экспериментальное сравнение показателей турбулизации слоя кварца с водой струями воды и воздуха. Эксперименты выполнены на установке, общий вид и фотография которой приведены на рисунке 1.

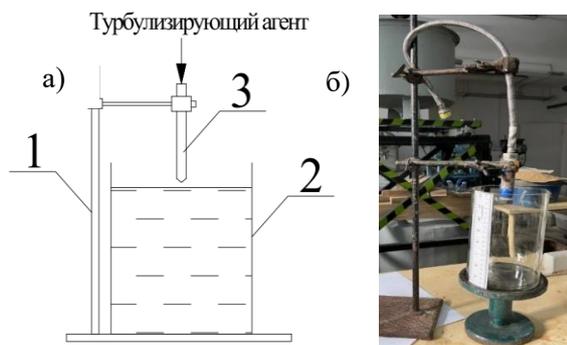


Рисунок 1 – Общий вид (а) и фотография (б) установки для изучения турбулизации струями воды и сжатого воздуха:  
1 – штатив; 2 – емкость с кварцем и водой;  
3 – турбулизатор

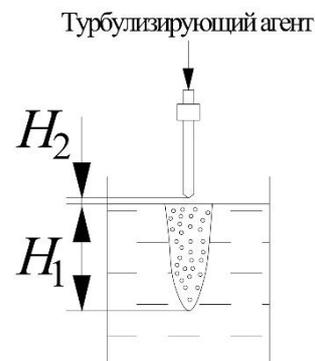


Рисунок 2 – Схема процесса турбулизации:  $H_1$  – глубина проникновения турбулизующего агента, мм;  $H_2$  – расстояние от турбулизатора до поверхности турбулизируемого слоя, мм

В качестве критерия турбулизации использовали глубину проникновения турбулизующего агента  $H_1$  в турбулизующий слой в установившемся режиме турбулизации. Эксперименты в каждом режиме турбулизации проводили по три раза. Относительная ошибка значений составила менее 3,5 %.

После математической обработки результаты приведены на рисунке 3 в виде зависимостей глубины турбулизации слоя кварца в воде  $H_1$  от давления турбулизующего агента  $P$ .

Теоретически для достижения одних и тех же результатов турбулизации давление воздуха в связи с его низкой плотностью должно быть на 1,5 – 2 порядка выше с точки зрения давления на пристеночный слой.

Установлено что одинаковый результат турбулизации сжатым воздухом по сравнению с турбулизацией водой достигается при увеличении давления воздуха до 0,5 МПа, что всего лишь в 4 раза выше давления воды. Обеспечение одинаковой турбулизации при низком давлении воздуха, по сравнению с теоретическим значением объясняется эффектом аэрации пристеночного слоя пузырьками воздуха, которая уменьшает плотность турбулизируемого материала для последующих порций турбулизующего агента и увеличивает за счет этого глубину проникновения турбулизующего воздуха.

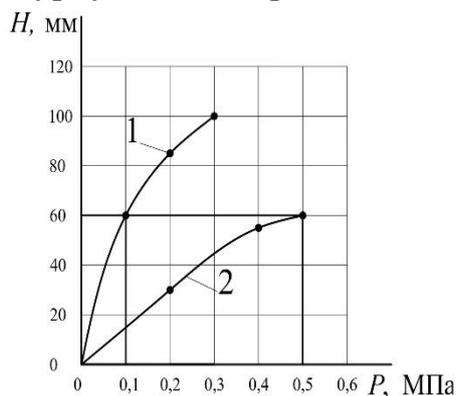


Рисунок 3 – Зависимости глубины турбулизации слоя кварца в воде  $H_1$  от давления турбулизующего агента  $P$  на выходе из турбулизатора:  
1 – турбулизация водой;  
2 – турбулизация сжатым воздухом

В работе выполнен теоретический анализ движения частиц в пристеночном слое. Из всех сил действующих, на частицу в пристеночном слое, для улавливания частиц повышенной плотности в пазах конуса играют роль силы, направленные вдоль оси  $X$  и оси  $Y$ .

На рисунке 4 представлен план скоростей движения в осях  $X$ ,  $Y$ . С помощью которых выполнялся расчет траектории движения частиц в пристеночном слое при приращении во времени.

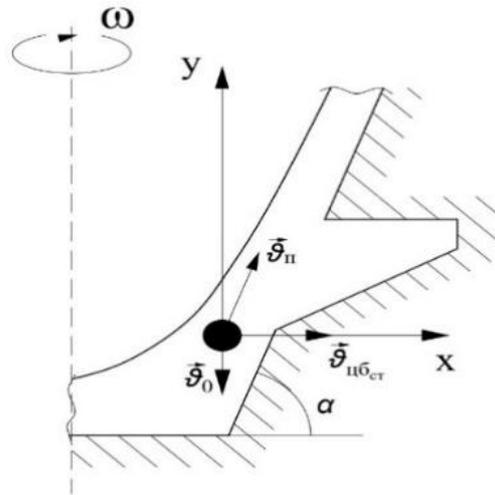


Рисунок 4 – План скоростей движения частиц в пристеночном слое конуса центробежного сепаратора:  $\vec{v}_{цбст}$  – скорость перемещения частицы в стесненных условиях пристеночного слоя за счет центробежной силы, м/с;  $\vec{v}_{\pi}$  – скорость перемещения частицы за счет силы восходящего потока, м/с;  $\vec{v}_0$  – скорость падения частицы, обусловленная влиянием силы тяжести и выталкивающей силы, м/с,  $\alpha$  – угол наклона образующей конуса к горизонту

По предложенному математическому аппарату рассчитаны траектории движения частиц золота в пристеночном слое турбулизационного центробежного сепаратора.

Расчет скоростей движения частиц в пристеночном слое в условиях стесненного движения частиц выполнен по формуле Н.Ф. Меринова:

$$g_{цбст} = \frac{24}{d \cdot \Delta_{ср}} \cdot \left( \sqrt{\mu_{ст}^2 + \frac{d^3 \cdot \Delta_{ср} \cdot (\rho - \Delta_{ср}) \cdot g_{цб}}{216}} - \mu_{ст} \right). \quad (1)$$

Плотность среды  $\Delta_{ср}$  рассчитывается с учетом влияния классов крупности:

$$\Delta_{ср} = \Delta \cdot \theta + \sum_{i=1}^N \rho_i \cdot \Omega_i. \quad (2)$$

Динамический коэффициент вязкости  $\mu_{ст}$  определяется по формуле с учетом влияния мелких классов крупности:

$$\mu_{ст} = \mu_0 \cdot (1 + 2,5\Omega_{-0,1} + 7,349\Omega_{-0,1}^2 + 16,2\Omega_{-0,1}^3) \cdot K_{кр}. \quad (3)$$

Скорость движения восходящих потоков  $\bar{v}_{\pi}$  рассчитывали по формуле:

$$g_{\pi} = \frac{Q_{об}}{S_{сеч}}. \quad (4)$$

Площадь поперечного сечения потока, определяется путем вычитания из площади сечения конуса, площади сечения восходящего потока на заданной высоте конуса.

$$S_{сеч} = \pi \cdot (R_{кон}^2 - R_{сеч}^2). \quad (5)$$

Скорость перемещения частиц по оси  $X$  в пристеночном слое рассчитывали по формуле:

$$g_x = g_{цбст} + g_{\pi} \cdot \cos \alpha, \quad (6)$$

а скорость перемещения частиц по оси  $Y$  по формуле:

$$g_y = g_{\pi} \cdot \sin \alpha - g_{цбст}, \quad (7)$$

где  $d$  – эквивалентный диаметр частицы, м;  $\Delta_{ср}$  – плотность среды, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu_{ст}$  – динамический коэффициент вязкости в стесненных условиях, Н·с/м<sup>2</sup>;  $\rho$  – плотность частицы, кг/м<sup>3</sup>;

$\theta$  – объемная доля жидкой фазы;  $\Delta$  – плотность жидкой фазы,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\rho_i$  – плотность частиц  $i$ -го класса крупности,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\Omega_i$  – объемная доля частиц  $i$ -го класса крупности;  $N$  – количество классов крупности;  $K_{\text{кр}}$  – коэффициент увеличения значения  $\mu_{\text{ст}}$ , зависящий от объемной доли класса минус 0,1 мм ( $\Omega_{0,1}$ ) в твердой фазе пульпы;  $Q_{\text{об}}$  – объемная производительность центробежного сепаратора по пульпе  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $S_{\text{сеч}}$  – площадь поперечного сечения потока в пристеночном слое,  $\text{м}^2$ ;  $R_{\text{кон}}$  – радиус окружности конуса, м;  $R_{\text{сеч}}$  – радиус окружности границы раздела «жидкое – газ» пристеночного слоя, м.

По предложенному математическому аппарату выполнено моделирование траектории движения частиц золота в пристеночном слое центробежного сепаратора. На рисунке 5 изображены траектории движения частиц золота крупностью 10 мкм находящихся в исходном состоянии на поверхности и в середине пристеночного слоя, при турбулизации водой и сжатым воздухом.

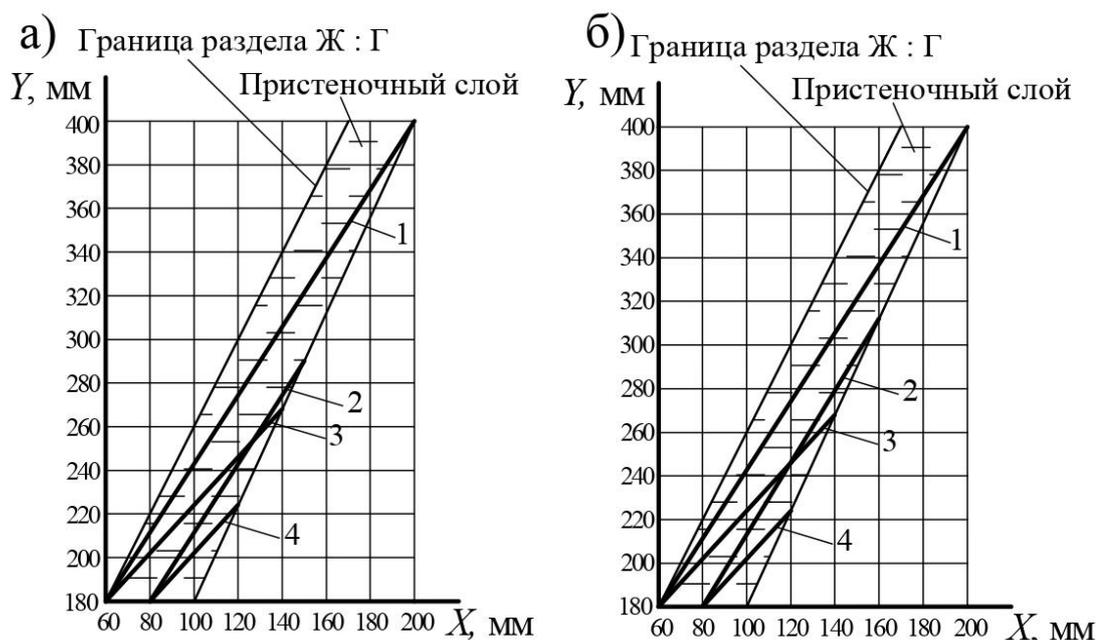


Рисунок 5 – Траектории движения частиц золота крупностью 10 мкм при турбулизации пристеночного слоя (а) водой при давлении 0,1 МПа: 1,2 – при скорости вращения конуса 450  $\text{мин}^{-1}$ ; 3,4 – при скорости вращения конуса 900  $\text{мин}^{-1}$ ; (б) воздухом при давлении 0,5 МПа: 1,2 – при скорости вращения конуса 450  $\text{мин}^{-1}$ ; 3,4 – при скорости вращения конуса 900  $\text{мин}^{-1}$

Моделированием получены идентичные результаты улавливания золота из пристеночного слоя конуса при турбулизации водой при давлении 0,1 МПа и сжатым воздухом при давлении 0,5 МПа.

Установлено, что при турбулизации как водой, так и воздухом, частицы золота крупностью 10 мкм, находящиеся на поверхности пристеночного слоя при заданной скорости вращения конуса, практически выносятся восходящими потоками и теряются с легкой фракцией. Частицы данной крупности, находящиеся в глубине пристеночного слоя, будут улавливаться в пазах конуса.

В связи с использованием воздушной турбулизации в работе на основе рассмотренных сил, действующих на частицу, закрепившуюся на пузырьке, выполнен теоретический анализ возможности флотационного выноса частиц из пристеночного слоя конуса пузырьками воздуха. На рисунке 6 показана схема сил, действующих на закрепившуюся на пузырьке частицу в пристеночном слое.



Рисунок 6 – Схема сил, действующих на закрепившуюся на пузырьке частицу в пристеночном слое:  $\vec{F}_T$  – сила тяжести;  $\vec{F}_A$  – сила Архимеда;  $\vec{F}_{кап}$  – сила капиллярного давления;  $\vec{F}_{доп}$  – дополнительные силы отрыва;  $\vec{F}_{цб}$  – центробежная сила;  $\vec{F}_{фл}$  – флотационная

В связи с высокой скоростью вращения конуса центробежная сила существенно преобладает над флотационными силами и является основной отрывающей силой, обеспечивающей маловероятное флотационное выделение частицы из пристеночного слоя.

В работе выполнено моделирование процесса центробежной сепарации по обычной технологии и по технологии с циркуляцией легкой фракции. Циркуляция легкой фракции осуществляется в течение заданного времени с последующим удалением её в хвосты. Разгрузку накопленной тяжелой

фракции в концентрат осуществляют с помощью смывной воды после переработки порции исходного питания. Сравнительный анализ показателей обычной и циркуляционной технологии центробежной сепарации выполнен при одинаковых исходных данных. Установлено, что при одних и тех же условиях циркуляционная технология приводит к повышению содержания золота в тяжелой фракции при высоком извлечении в нее золота (таблица 1,2).

Таблица 1 – Результаты моделирования переработки одной порции исходного сырья по обычной технологии

Наименование показателя	Значение показателя		
	Режим 1	Режим 2	Режим 3
Масса порции, кг	10	50	100
Массовая доля золота в порции, г/т	10	10	10
Продолжительность переработки, минут	10	5	2
Продолжительность разгрузки, минут	5	5	5
Суммарная продолжительность цикла, минут	15	10	7
Масса накопленного золота, г	0,08	0,36	0,60
<b>Массовая доля золота в тяжелой фракции, г/т</b>	<b>133</b>	<b>600</b>	<b>1000</b>
<b>Извлечение золота в тяжелую фракцию, %</b>	<b>80</b>	<b>72</b>	<b>60</b>

Таблица 2 – Результаты моделирования переработки одной порций исходного сырья по технологии с циркуляцией легкой фракции

Наименование показателя	Значение показателя		
	Режим 1	Режим 2	Режим 3
Масса порции, кг	10	50	100
Массовая доля золота в порции, г/т	10	10	10
Продолжительность переработки, минут	30	15	6
Продолжительность разгрузки, минут	5	5	5
Суммарная продолжительность цикла, минут	35	20	11
Масса накопленного золота, г	0,099	0,48	0,93
<b>Массовая доля золота в тяжелой фракции, г/т</b>	<b>165</b>	<b>800</b>	<b>1550</b>
<b>Извлечение золота в тяжелую фракцию, %</b>	<b>99</b>	<b>96</b>	<b>93</b>

Выполнен сравнительный анализ показателей циркуляционно-накопительной технологии центробежной сепарации при переработке от 5 до 100 порций. Циркуляция легкой фракции осуществляется в течение заданного времени с последующим удалением её в хвосты, одновременную разгрузку накопленной тяжелой

Таблица 3 – Результаты моделирования переработки 5 и 100 порций исходного сырья по обычной и циркуляционно – накопительной технологиям

Наименование показателя	Значение показателя			
	5 порций		100 порций	
	По обычной технологии	По предлагаемой технологии	По обычной технологии	По предлагаемой технологии
Суммарная масса порций, кг	500	500	10 000	10 000
Массовая доля золота в исходном сырье, г/т	10	10	10	10
Продолжительность переработки, минут	10	30	200	600
Продолжительность разгрузки, минут	25	5	500	5
<b>Суммарная продолжительность, минут</b>	<b>35</b>	<b>35</b>	<b>700</b>	<b>605</b>
Масса накопленного золота, г	3,00	4,65	60,00	93,00
<b>Массовая доля золота в тяжелой фракции, г/т</b>	<b>1 000</b>	<b>7 750</b>	<b>1 000</b>	<b>155 000</b>
Извлечение золота в тяжелую фракцию, %	60	93	60	93

фракции в концентрат с помощью смывной воды после переработки заданного количества порций исходного питания. Результаты, приведенные в таблице 3, показывают, что реализация циркуляционно-накопительной технологии с увеличением количества перерабатываемых порций приводит к росту содержания золота в тяжелой фракции при высоком извлечении в нее золота.

За счет перехода к циркуляционно-накопительной технологии на однократную разгрузку тяжелой фракции после переработки всех порций разница в суммарной продолжительности времени по сравнению с суммарной продолжительностью по

обычной технологии нивелируется уменьшением продолжительности разгрузки. Реализация циркуляционно-накопительной технологии значительно упрощается за счет исключения разгрузки тяжелой фракции после переработки каждой порции исходного сырья.

Проведены эксперименты с гидравлической и воздушной турбулизацией пристеночного слоя по циркуляционно-накопительной технологии. В качестве объекта для экспериментального моделирования использовалась искусственная смесь порошка металлического вольфрама крупностью (-20 +10 мкм) и кварца крупностью (-100 +10 мкм) при содержании вольфрама в навеске 1 %. Реализованы эксперименты при переработке 1, 5, 10, 15 порций исходного питания. Показатели исследуемых режимов центробежной сепарации приведены в таблице 4.

Полученные результаты экспериментального моделирования процесса центробежной сепарации подтверждают результаты теоретического анализа возможностей циркуляционно-накопительной технологии. Повышается качество концентрата при его высоком извлечении. Массовая доля вольфрама при переработке 10 порций исходного питания составила 31,7 % при извлечении вольфрама в концентрат 97,6 %.

Таблица 4 – Результаты центробежной сепарации с гидравлической и воздушной турбулизацией пристеночного слоя конуса при переработке заданного количества порций

Наименование показателя	Количество порций исходного питания			
	1	5	10	15
С гидравлической турбулизацией пристеночного слоя				
Массовая доля вольфрама в концентрате, %	4,08	17,70	29,58	32,47
Извлечение вольфрама в концентрат, %	92,21	92,22	88,74	82,15
С воздушной турбулизацией пристеночного слоя				
Массовая доля вольфрама в концентрате, %	4,25	18,50	31,71	36,29
Извлечение вольфрама в концентрат, %	97,79	97,75	97,67	94,35

В третьей главе с целью повышения эффективности улавливания тонкодисперсных частиц золота разработан способ центробежной сепарации, заключающийся в том, что исходное питание подвергается гидроциклонированию, пески направляются на центробежную сепарацию, а слив гидроциклонирования – на турбулизацию пристеночного слоя. Реализована технологическая схема по циркуляционно-накопительной технологии. Схема цепей аппаратов проведения опытов представлена на рисунке 7.



Рисунок 7 – Схема цепей аппаратов для реализации центробежной сепарации с гидроциклонированием исходного питания: 1 – зумпф; 2 – насос; 3 – гидроциклон; 4 – центробежный сепаратор; 5 – переключатель потоков; 6 – обезвоживающий гидроциклон

Результаты сравнения показателей центробежной сепарации без гидроциклонирования по известному способу и с гидроциклонированием по циркуляционно-накопительной технологии приведены в таблице 5.

Установлено, что циркуляционно-накопительная технология позволяет по сравнению с известной технологией повысить массовую долю золота в концентрате с 480 до 4050 г/т при повышении извлечения золота в концентрат с 76 до 92 %. Предлагаемое техническое решение защищено патентом РФ на изобретение №2690590.

Развитием турбулизационной центробежной сепарации является турбулизация пристеночного слоя конуса сжатым воздухом.

Таблица 5 – Результаты разделения золотосодержащего продукта без гидроциклонирования по известному способу и с гидроциклонированием по циркуляционно-накопительной технологии

Наименование показателя	Значение показателя	
	без гидроциклонирования	с гидроциклонированием
Массовая доля золота в тяжёлой фракции, г/т	480	4050
Извлечение золота в тяжёлую фракцию, %	75,8	92,2

Для снижения удельного расхода воды разработан способ центробежной сепарации с турбулизацией пристеночного слоя конуса смесью слива гидроциклонирования со сжатым воздухом, получаемой путем подачи слива гидроциклонирования в поток сжатого воздуха из сопла пневматического турбулизатора при объемном соотношении «слив-воздух» не более 1:30.

Предлагаемое решение повышает проникновение сконцентрированных в сливе гидроциклонирования тонкодисперсных частиц

повышенной плотности вглубь пристеночного слоя и в пазы конуса центробежного сепаратора, снижая тем самым потери этих частиц с хвостами.

Схема подачи слива гидроциклонирования в поток сжатого воздуха, выходящего из сопла пневматического турбулизатора приведена на рисунке 8.

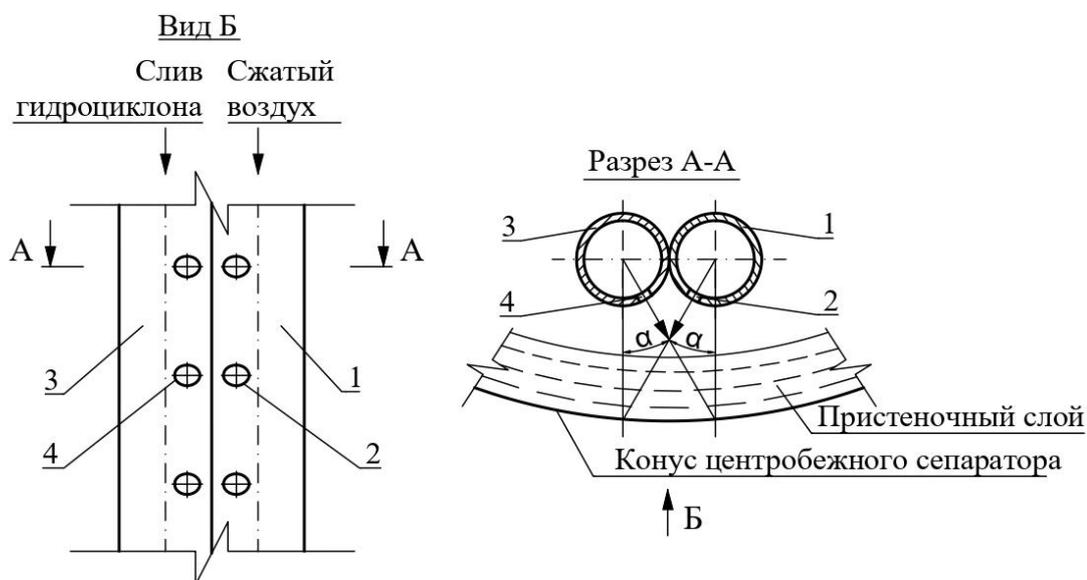


Рисунок 8 – Схема подачи слива гидроциклонирования в поток сжатого воздуха, выходящего из сопла пневматического турбулизатора: 1 – пневматический турбулизатор; 2 – сопло пневматического турбулизатора; 3 – гидравлический турбулизатор; 4 – сопло гидравлического турбулизатора; α – угол сдвига сопел гидравлического и пневматического турбулизаторов

Смешивание слива гидроциклонирования со сжатым воздухом обеспечивается за счет подачи слива и сжатого воздуха под углом друг к другу. Экспериментально показано, что для эффективного смешивания оптимальный угол сдвига α составляет 30°.

Выполнено сравнение способа центробежной сепарации с гидравлической турбулизацией с гидроциклонированием по полученному патенту и по предлагаемому способу с воздушной турбулизацией пристеночного слоя при одинаковых

Таблица 6 – Результаты разделения золотосодержащего продукта с гидроциклонированием и с гидроциклонированием и воздушной турбулизацией по циркуляционно-накопительной технологии

Наименование показателя	Значения показателей	
	с гидроциклонированием	с гидроциклонированием и воздушной турбулизацией
Массовая доля золота в тяжелой фракции, г/т	4050	4250
Извлечение золота в тяжелую фракцию, %	92,2	95,5
Расход дополнительной воды, м <sup>3</sup> /т	3,6	0,1

параметрах центробежной сепарации.

Результаты разделения золотосодержащего продукта с гидроциклонированием и с гидроциклонированием и воздушной турбулизацией по циркуляционно-накопительной технологии приведены в таблице 6.

Установлено, что подача слива гидроциклонирования на турбулизацию пристеночного слоя в смеси со сжатым воздухом приводит к повышению массовой доли золота в тяжелой фракции на 200 г/т при повышении извлечения золота в тяжелую фракцию

на 3 %. При этом исключается расход воды на турбулизацию. Предлагаемое техническое решение защищено патентом РФ №2799681.

В четвертой главе предложенные технические решения по циркуляционно-накопительной технологии с воздушной турбулизацией пристеночного слоя исследованы при переработке золотосодержащей руды месторождения «Ашалы» по комбинированной технологии, включающей дробление и измельчение, предварительное обогащение методом рентгенофлуоресцентной сепарации (РФС),

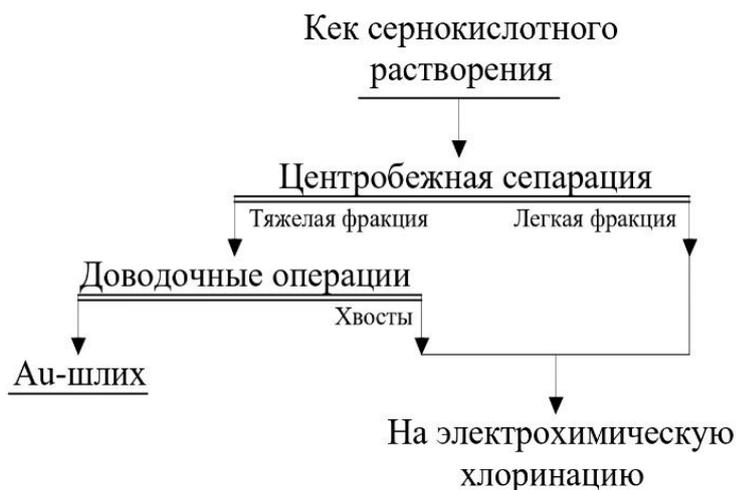


Рисунок 9 – Схема центробежной сепарации кека сернокислотного растворения руды месторождения «Ашалы»

сернокислотное растворение окисленных минералов, турбулизационную центробежную сепарацию и электрохимическую хлоринацию, сорбцию золота на уголь, озоление насыщенного угольного сорбента и плавку с получением золотосодержащего сплава. Центробежной сепарации подвергался кек сернокислотного выщелачивания. Схема переработки кека сернокислотного растворения центробежной сепарацией представлена на рисунке 9.

Результаты экспериментов центробежной сепарации кека сернокислотного растворения приведены в таблице 7.

денны в таблице 7.

Установлено повышение извлечения золота в шлиховой концентрат на 5 %.

Таблица 7 – Результаты центробежной сепарации кека сернокислотного растворения руды месторождения «Ашалы» с гидравлической турбулизацией и по циркуляционно-накопительной технологии с воздушной турбулизацией

Режим переработки	Наименование показателя	Au содержащий шлик	Хвосты
С гидравлической турбулизацией пристеночного слоя	Массовая доля золота	82 %	6,80 г/т
	Извлечение золота, %	20,44	15,56
По циркуляционно-накопительной технологии с воздушной турбулизацией пристеночного слоя	Массовая доля золота	82 %	6,80 г/т
	Извлечение золота, %	25,50	10,50

Экономическими расчетами в таблице 8 показано что, при одинаковых исходных данных предлагаемая циркуляционно-накопительная технология с воздушной турбулизацией пристеночного слоя за счет повышения извлечения золота в гравитационный концентрат на 5 % обеспечивает увеличение чистой прибыли на 79,3 млн. руб./год при снижении срока окупаемости с 4 до 3 лет.

Таблица 8 – Таблица сравнения показателей переработки золотосодержащей руды месторождения «Ашалы» по известной и предлагаемой технологии

№	Наименование показателя	По известной технологии с гидравлической турбулизацией	По циркуляционно-накопительной технологии с воздушной турбулизацией
1	Производительность по руде, т/год	816 000	
2	Содержание в руде, г/т	1,45	
3	Количество концентрата шлихового, т/год	0,291	0,364
4	Количество концентрата после плавки, т/год	1,041	1,010
5	Капитальные затраты, руб.	663 200 000	743 200 000
6	Чистая прибыль, руб./год	168 444 560,30	247 753 755,23
7	Окупаемость, год	3,94	3,0

Разработанная технология внедрена в технологический регламент обогатительной фабрики по переработке золотосодержащей руды месторождения «Ашалы».

**В пятой главе** приведены результаты опытно-промышленных испытаний разработанной технологии на хвостах цианирования руды месторождения «Мизек». Выполнены работы по разработке и компоновке опытно-промышленной установки.

На установке проведены испытания на измельченных до 92,5 % класса минус 0,071 мм хвостах кучного цианирования по известной технологии с гидравлической турбулизацией и по циркуляционно-накопительной технологии с воздушной турбулизацией. По результатам экспериментов рассчитаны баланс по конечным продуктам, который представлен в таблице 9.

Таблица 9 – Результаты центробежной сепарации переработки измельченных хвостов кучного цианирования руды месторождения «Мизек» с гидравлической турбулизацией и по циркуляционно-накопительной технологии с воздушной турбулизацией

Наименование показателя	Значение показателя	
	при гидравлической турбулизации	При воздушной турбулизации по циркуляционно-накопительной технологии
Массовая доля золота в Au содержащем шлихе, г/т	5825,06	9570,97
Извлечение золота в Au содержащий шлик, %	48,54	79,76

Установлено повышения качества конечного продукта на 3745 г/т, при повышении извлечения с 48 до 79 %.

В таблице 10 приведены результаты экономических расчетов для известной и для предлагаемой технологии центробежной сепарации.

Таблица 10 – Сводная таблица показателей переработки измельченных хвостов цианирования руды месторождения «Мизек»

№	Наименование показателя	Единицы измерения	Значение показателя	
			По известной технологии при гидравлической турбулизации	При воздушной турбулизации по циркуляционно-накопительной технологии
1	Производительность по хвостам	т/год	408 000	
2	Содержание золота в хвостах	г/т	1,2	
3	Содержание золота в концентрате шлиховом	%	0,58	0,96
4	Капитальные затраты	руб.	307 600 000	408 400 000
5	Чистая прибыль	руб./год	84 775 318,40	432 918 017,60
6	Окупаемость	год	3,62	0,94

Установлено что, при одинаковых исходных данных предлагаемая циркуляционно-накопительная технология с воздушной турбулизацией пристеночного слоя обеспечивает увеличения чистой прибыли на 348 млн. руб./год и снижение срока окупаемости с 3,5 до 1 года.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований изложены новые научно обоснованные технические решения по совершенствованию технологии переработки золотосодержащего сырья методом центробежной сепарации с воздушной турбулизацией пристеночного слоя конуса и циркуляционно-накопительной технологией, внедрение которых обеспечит высокое качество золотосодержащего концентрата при максимальном извлечении в него золота.

Основные научные и практические результаты заключаются в следующем:

1. На основе теоретического анализа и экспериментальных исследований гидродинамики потоков пульпы во вращающемся конусе предложен механизм турбулизации в режиме псевдооживленного пульсирующего состояния пристеночного слоя без периодического уплотнения твердой фазы, обеспечивающий эффективное постоянное движение частиц золота к пазам конуса.

2. С целью снижения расхода турбулизирующей воды предложено использование турбулизации пристеночного слоя струями сжатого воздуха. Экспериментальным сравнением гидравлической и воздушной турбулизации установлено, что одинаковые результаты турбулизации сжатым воздухом достигаются при увеличении давления по сравнению с давлением воды всего лишь в 4-5 раз выше за счет эффекта аэрационного уменьшения плотности турбулизируемого материала.

3. Показано, что турбулизация пристеночного слоя сжатым воздухом характеризуется образованием аэрированной пузырьками воздуха пульпы, которые активно выдавливаются движущимся под действием центробежной силы материалом и обеспечивают интенсивное его перемешивание.

4. Анализ сил, действующих на частицу, закрепившуюся на пузырьке в центробежном поле, показал, что флотационное выделение из пристеночного слоя частиц золота крупностью 10 мкм маловероятно.

5. Теоретически обосновано и экспериментально доказано, что циркуляционно-накопительная технология с воздушной турбулизацией пристеночного слоя обеспечивает получение в турбулизационной центробежной сепарации высококачественного золотосодержащего концентрата при максимальном извлечении в него золота.

6. На уровне изобретений разработаны и защищены патентами РФ два способа центробежной сепарации, реализующие воздушную турбулизацию пристеночного слоя и циркуляционно-накопительную технологию извлечения золота.

7. Экспериментальными исследованиями турбулизационной центробежной сепарации золотосодержащей руды месторождения «Ашалы» установлено, что циркуляционно-накопительная технология с воздушной турбулизацией пристеночного слоя позволяет повысить извлечение золота в шлиховой концентрат по сравнению с известной технологией на 5 %, что обеспечивает увеличение чистой прибыли на 79 млн рублей в год.

8. Опытными промышленными испытаниями турбулизационной центробежной сепарации хвостов кучного выщелачивания руды месторождения «Мизек» установлено, что циркуляционно-накопительная технология с воздушной турбулизацией пристеночного слоя позволила получить золотосодержащий шлик с массовой долей золота 9570 г/т при извлечении в него золота 79,76 %. Технология обеспечивает при производительности 50 т/ч получение чистой прибыли 433 млн рублей в год.

9. Разработанная технология внедрена в технологический регламент обогатительной фабрики по переработке золотосодержащей руды месторождения «Ашалы».

## **Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах**

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

1. Морозов, Ю. П. Изучение возможностей повышения эффективности центробежной сепарации / Ю. П. Морозов, **П. М. Пеньков** // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2020. – № 3. – С. 80-86.

2. Морозов, Ю. П. Исследование способа повышения технологических показателей центробежной сепарации с пневматической турбулизацией / Ю. П. Морозов, **П. М. Пеньков**, В. Т. Дмитриев // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2020. – № 4. – С. 62-69.

3. **Пеньков, П. М.** Влияние вязкостного сопротивления на конечные скорости стесненного движения частиц / П. М. Пеньков, Ю. П. Морозов, С. А. Прокопьев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2022. – № 11-1. – С. 119-126.

4. **Пеньков, П. М.** Совершенствование центробежной сепарации на основе пневматической турбулизации пристеночного слоя конуса сепаратора / П. М. Пеньков, Ю. П. Морозов, И. Х. Хамидулин // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 12-1. — С. 120—133.

### ***Патенты на изобретение***

1. Патент РФ № 2690590, Способ центробежной сепарации / Ю. П. Морозов, В. З. Козин, **П. М. Пеньков** [и др.] // заявл. 09.08.2018. - № 2018129278 - Опубликовано. 04.06.2019 – Бюл. №16.

2. Патент РФ № 2799681, Способ центробежной сепарации / Ю. П. Морозов, **П. М. Пеньков**, В. З. Козин, И. Х. Хамидулин. // заявл. 18.11.2022. - № 2022129893 - Опубликовано. 10.07.2023 – Бюл. №19.

### ***Публикации в других изданиях***

1. Те, И. А. Опытные промышленные испытания центробежной сепарации хвостов кучного выщелачивания золотосодержащих руд / И. А. Те, Ю. П. Морозов, С. С. Завьялов, **П. М. Пеньков** // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: Материалы XXI Международной научно-технической конференции. Екатеринбург, 06–07 апреля 2016 года. – Екатеринбург: Изд-во "Форт Диалог-Исеть", 2016. – С. 130-134.

2. **Пеньков, П. М.** Исследования работы центробежного сепаратора при циркуляции легкой фракции / П. М. Пеньков, И. Х. Хамидулин // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: материалы XXII Международной научно-технической конференции, Екатеринбург, 19–20 апреля 2017 года. – Екатеринбург: Изд-во "Форт Диалог-Исеть", 2017. – С. 148-150.

3. **Пеньков, П. М.** Исследование центробежной сепарации на искусственной смеси магнетита и кварца / П. М. Пеньков // Инновационные технологии обогащения минерального и техногенного сырья: материалы научно-технической конференции. Екатеринбург, 17–19 октября 2017 года. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2017. – С. 184-185.

4. Морозов, Ю. П. Закономерности промывки с использованием циркуляционной концентрации / Ю. П. Морозов, И. Х. Хамидулин, **П. М. Пеньков** // Инновационные технологии обогащения минерального и техногенного сырья: материалы научно-технической конференции. Екатеринбург, 17–19 октября 2017 года. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2017. – С. 180-183.

5. Валиев, Н. Г. Разработка и реализация технологии извлечения тонкого золота из замкнутого цикла измельчения / Н. Г. Валиев, Ю. П. Морозов, И. Х. Хамидулин, **П. М. Пеньков** // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: Материалы XXIII Международной научно-технической конференции. Екатеринбург, 10–13 апреля 2018 года. – Екатеринбург: Изд-во "Форт Диалог-Исеть", 2018. – С. 240-245.

6. **Пеньков, П. М.** Кинетика накопления минералов повышенной плотности в пазах центробежного сепаратора / П. М. Пеньков // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: Материалы XXIII Международной научно-технической конференции. Екатеринбург, 10–13 апреля 2018 года. – Екатеринбург: Изд-во "Форт Диалог-Исеть", 2018. – С. 283-285.

7. **Пеньков, П. М.** Особенности разделения минералов в центробежном поле / П. М. Пеньков // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: материалы XXIV Международной научно-технической конференции. Екатеринбург, 09–12 апреля 2019 года. – Екатеринбург: Изд-во "Форт Диалог-Исеть", 2019. – С. 431-433.

8. **Пеньков, П. М.** Исследование центробежной сепарации на искусственной смеси магнетита, вольфрама и кварца / П. М. Пеньков // Современные тенденции в области теории и практики добычи и переработки минерального и техногенного сырья: Материалы международной научно-практической конференции, приуроченной к 90-летию со дня основания института "Уралмеханобр", Екатеринбург, 06–08 ноября 2019 года. – Екатеринбург: ОАО "Уралмеханобр", 2019. – С. 189-191.

9. Морозов, Ю. П. Извлечение золота, потерянного в замкнутых циклах измельчения / Ю. П. Морозов, И. Х. Хамидулин, **П. М. Пеньков** // Современные тенденции в области теории и практики добычи и переработки минерального и техногенного сырья: Материалы международной научно-практической конференции, приуроченной к 90-летию со дня основания института "Уралмеханобр", Екатеринбург, 06–08 ноября 2019 года. – Екатеринбург: ОАО "Уралмеханобр", 2019. – С. 326-329.

10. **Пеньков, П. М.** Исследование центробежной сепарации с использованием циркуляционной концентрации / П. М. Пеньков // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: Материалы XXV Международной научно-технической конференции. Екатеринбург, 07–10 апреля 2020 года. – Екатеринбург: Изд-во "Форт Диалог-Исеть", 2020. – С. 213-217.

11. **Penkov, P.** Separation of minerals in a centrifugal field using circulating concentration / P. Penkov, Y. Morozov // E3S Web of Conferences: 18, Ekaterinburg, 02–11 апреля 2020 года. – Ekaterinburg, 2020. – P. 01005. – DOI 10.1051/e3sconf/202017701005.

12. Морозов, Ю. П. Гидродинамика потоков пульпы в пристеночном слое турбулизационного центробежного сепаратора / Ю. П. Морозов, **П. М. Пеньков**, Е. А. Бекчурина, И. Х. Хамидулин // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: Материалы XXVI Национальной научно-технической конференции. Екатеринбург, 26–27 мая 2021 года. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2021. – С. 263-269.

13. **Пеньков, П. М.** Использование накопительной технологии центробежной сепарации при переработке золотосодержащих продуктов / П. М. Пеньков // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: Материалы XXVII Международной научно-технической конференции. Екатеринбург, 07–08 апреля 2022 года. – Екатеринбург: Изд-во ИП Русских А.В., 2022. – С. 233-237.

14. Морозов, Ю. П. Особенности пневматической турбулизации пристеночного слоя в центробежном сепараторе / Ю. П. Морозов, Е. А. Бекчурина, **П. М. Пеньков** // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: Материалы XXVII Международной научно-технической конференции. Екатеринбург, 07–08 апреля 2022 года. – Екатеринбург: Изд-во ИП Русских А.В., 2022. – С. 8-12.

15. **Пеньков, П. М.** Сравнение гидравлической и пневматической турбулизации пристеночного слоя центробежного сепаратора / П. М. Пеньков // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: материалы XXVIII Международной научно-технической конференции. Екатеринбург, 06–07 апреля 2023 года / Уральский государственный горный университет; Горно-металлургическая секция РАЕН; ООО «Таилс КО». – Екатеринбург: Изд-во ООО «Типография ФортДиалог», 2023. – С. 410-413.

16. **Пеньков, П. М.** Использование турбулизационной центробежной сепарации при переработке хвостов цианирования / П. М. Пеньков // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: материалы XXIX Международной научно-технической конференции. Екатеринбург, 04–05 апреля 2024 года / Уральский государственный горный университет; Горно-металлургическая секция РАЕН; ООО «Таилс КО». – Екатеринбург: Изд-во ИП Русских А.В., 2024. – С. 246-251

Подписано в печать 18.09.2024. Формат 60x84 1/16  
Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 43  
Копировальный центр «Университетский»  
г. Екатеринбург, Университетский пер., д. 3, тел. 8-343-257-90-50