

На правах рукописи



СЕНЧЕНКО АРКАДИЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕПАРАЦИИ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩЕГО
СЫРЬЯ В ЦЕНТРОБЕЖНЫХ БЕЗНАПОРНЫХ КОНЦЕНТРАТОРАХ**

Специальность 2.8.9. Обогащение полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Иркутск – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»)

Научный руководитель: **Федотов Константин Вадимович**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»,
заведующий кафедрой обогащения полезных
ископаемых и охраны окружающей среды имени С.Б.
Леонова (г. Иркутск)

**Официальные
оппоненты:** **Морозов Юрий Петрович**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный
университет», профессор кафедры обогащения полезных
ископаемых (г. Екатеринбург)

Алгебраистова Наталья Константиновна
кандидат технических наук, доцент,
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»,
доцент кафедры обогащения полезных ископаемых» (г.
Красноярск)

Ведущая организация: ФГБУН Федеральный исследовательский центр
«Якутский научный центр Сибирского отделения
Российской академии наук» (г. Якутск)

Защита диссертации состоится 19 июня 2025 года в 10.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.307.01 на базе ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83, корпус «К», конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» по адресу <https://www.istu.edu/deyatelnost/nauka/dissertatsii>.

Автореферат разослан 30 апреля 2025 г.

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, подписанные и заверенные печатью организации, просим высылать по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ФГБОУ ВО «ИРНИТУ», ученому секретарю диссертационного совета Вулых Н.В., e-mail: vulix2011@yandex.ru, тел./факс +7-3952-405117.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Н.В. Вулых

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В практике обогащения полезных ископаемых широкое распространение получили аппараты центробежного типа, в которых разделение минеральных частиц происходит в поле действия центробежной силы, в сотни раз превышающей силу тяжести. Это такие аппараты, как центробежные концентраторы, центробежные отсадочные машины, обогатительные центрифуги др. Сочетание в этих аппаратах силы тяжести и центробежной силы позволило существенно снизить предел крупности разделяемых минералов, повысить эффективность работы и улучшить показатели обогащения.

Наибольшее распространение в практике получили центробежные концентраторы с периодической и непрерывной разгрузкой концентрата (Knelson, Falcon, «Итомак» и др.). Их используют при обогащении золотосодержащих руд россыпных и коренных месторождений, текущих и лежалых хвостов обогатительных фабрик, ильменит-цирконовых песков и других полезных ископаемых, ценные минералы которых имеют высокий удельный вес. Данные аппараты часто устанавливают в отделениях гравитационного обогащения фабрик, перерабатывающих руды цветных металлов, для извлечения попутного золота.

Теоретические основы центробежного обогащения развиты в работах Лапланта А. (Laplante A. R.), Нельсона В. (Knelson V. V.), Морса Р. (Morse R. D.), Лопатина А. Г., Кизевальтера Б. В., Богдановича А. В., Леонова С. Б., Федотова К. В., Меринова Н. Ф., Морозова Ю. П., Когана Д. И., Брагина П. А., Афанасенко С. И., Бочарова В. А., Фалей Е. А., Романченко А. А. и других авторов, в которых представлены результаты изучения механизмов разделения частиц в центробежных сепараторах, разработаны численные модели для расчета скоростей потоков пульпы в рабочем конусе сепараторов, предложены формулы для расчета траекторий движения частиц в центробежном поле.

Как показала практика работы сепараторов, наиболее эффективным методом разрыхления минеральной постели является подача флюидизационной воды с постоянным расходом через внешнюю стенку рабочего конуса. Этот способ реализован, в частности, в центробежных концентраторах Knelson, Falcon, «Итомак» и им подобных. Для аппаратов этого типа важной и актуальной задачей являются исследования, направленные на разработку новых способов интенсификации процессов, протекающих в минеральной постели рабочего конуса.

Необходимо отметить, что в настоящее время известно малое количество научных работ, в которых проводится теоретический анализ эффективности различных способов разрыхления минеральной постели в рабочем конусе центробежных концентраторов. При этом один из перспективных способов повышения сепарационных характеристик центробежного обогащения, заключающийся в использовании разных способов подачи флюидизационной воды в центробежный сепаратор, также пока не нашел ни теоретического обоснования, ни практического применения. В этой связи тема настоящего диссертационного исследования представляется важной и актуальной как для теории, так и для практики гравитационного обогащения полезных ископаемых.

Настоящая диссертационная работа направлена на обоснование и разработку нового способа подачи флюидизационной воды в рабочий конус сепаратора. Выполненные теоретические и экспериментальные исследования в этом направлении показали, что новый способ разрыхления минеральной постели, заключающийся в комбинации пульсирующего и постоянного потоков флюидизационной воды, повышает эффективность разделения минеральных частиц и позволяет улучшить показатели обогащения руд. Положительное влияние нового способа регулирования работы центробежной сепарации на содержание и извлечение ценного компонента доказано на примере переработки

золотосодержащей руды и лежалых хвостов месторождения Бадран. Он может быть использован как для вновь разрабатываемых сепараторов, так и для модернизации уже работающих. С этих позиций настоящая диссертационная работа является своевременной, важной и актуальной.

Целью работы является повышение эффективности работы центробежных концентраторов, использующих флюидизационный способ разрыхления минеральной постели в рабочем конусе.

Основная идея работы заключается в применении комбинированного способа подачи флюидизационной воды в центробежный сепаратор, который предусматривает наличие постоянного потока, поддерживающего минеральный слой на грани ожигения, и добавляющегося к нему пульсирующего потока, периодически переводящего слой минеральных частиц во взвешенное состояние и активирующего классифицирующие и сегрегационные процессы. Новый способ подачи флюидизационной воды интенсифицирует перераспределение минеральных частиц в кольцевых ячейках конуса сепаратора и оптимизирует механизм их разделения, что является отличием от обычного режима работы безнапорного центробежного концентратора. За счет этого увеличивается содержание частиц ценного компонента в рабочем конусе сепаратора и повышается их извлечение в концентрат.

Объект исследования – золотосодержащая руда месторождения Бадран (Республика Саха (Якутия)) и лежалые хвосты ее переработки, искусственные минеральные смеси.

Предмет исследования – закономерности разделения частиц обогащаемой руды по размеру, форме и удельному весу в минеральной постели рабочего конуса центробежного концентратора в поле действия центробежной силы при новом способе подачи флюидизационной воды и параметры регулирования этого процесса.

Задачи исследований

1. Теоретический анализ движения минеральных частиц в рабочем конусе центробежного сепаратора: формирование минеральной постели, перераспределение частиц внутри постели по сегрегационному и классифицирующему механизмам.
2. Теоретическое обоснование нового способа активизации процесса перераспределения минеральных частиц в объеме постели кольцевой ячейки сепаратора за счет комбинированной подачи флюидизационной воды.
3. Обоснование параметров разрыхления минеральной постели в кольцевой ячейке центробежного сепаратора при новом способе подачи флюидизационной воды.
4. Разработка технического решения для практической реализации нового способа регулирования режима работы центробежного сепаратора.
5. Проверка эффективности нового способа регулирования работы центробежного сепаратора в лабораторных и промышленных условиях.

Методы исследований

Работа выполнена с использованием принципов и законов гидродинамики, описывающих движение частиц в воде в стесненных условиях. На основе математического аппарата гидродинамики разработаны модели движения частиц от момента подачи с пульпой в рабочий конус и до момента закрепления в минеральной постели.

При изучении распределения частиц в ячейках рабочего конуса применялся метод криогенного замораживания с использованием жидкого азота. Для контроля движения частиц в минеральной постели применялась скоростная киносъемка в инфракрасном свете. Для изучения вещественного состава исходной руды и продуктов обогащения

применялись методы минералогического, ситового, химического, спектрометрического, фазового и пробирного анализов аттестованных лабораторий. Экспериментальная проверка разработанных рекомендаций по управлению работой центробежных сепараторов в промышленных условиях проводилась путем проведения полупромышленных испытаний. Математическую обработку данных и их визуализацию осуществляли с помощью прикладной программы Microsoft Excel программного пакета Microsoft Office.

Положения, выносимые на защиту

1. Новый способ подачи флюидизационной воды в центробежный сепаратор предусматривает сочетание постоянного потока жидкости, поддерживающего минеральную постель на грани ожигения, и пульсирующего потока жидкости, периодически переводящих постель во взвешенное состояние и способствующих продвижению тяжелых частиц внутрь кольцевой ячейки и выносу легких частиц за ее пределы.

2. Добавление пульсирующего потока флюидизационной воды активизирует сегрегационный и классифицирующий механизмы разделения частиц в минеральной постели в зависимости от их удельного веса, формы и размеров, способствует накоплению частиц с высоким удельным весом в минеральной постели рабочего конуса центробежного сепаратора, повышает содержание и извлечение ценных компонентов в гравитационный концентрат.

3. Пульсирующая составляющая потока флюидизационной воды обеспечивает изменение разрыхленности минеральной постели в заданном диапазоне: начиная от порозности 0,4–0,45 (уплотненное состояние) до порозности 0,62–0,65 (взвешенное состояние).

Научная новизна работы

1. Разработана математическая модель, описывающая движение минеральных частиц разной крупности, формы и удельного веса в рабочем конусе центробежного сепаратора при флюидизационном способе разрыхления минеральной постели.

2. Теоретически обоснована и экспериментально доказана возможность повышения эффективности сепарационных процессов в минеральной постели рабочего конуса центробежного сепаратора за счет нового способа подачи флюидизационной воды.

3. В качестве фактора регулирования режима работы центробежного концентратора предложено использовать степень разрыхленности минеральной постели рабочего конуса (порозность) в диапазоне от 0,4–0,45 (уплотненное состояние) до порозности 0,62–0,65 (взвешенное состояние).

Практическая значимость работы

– разработан способ управления режимом работы центробежных сепараторов, заключающийся в новом способе подачи флюидизационной воды, предусматривающем сочетание постоянного и пульсирующего потоков;

– применение нового способа подачи флюидизационной воды позволило при лабораторных испытаниях увеличить извлечение золота из лежалых хвостов прежних лет отработки месторождения Бадран с 33,42 % до 37,04 % (прирост 3,62 %) и серебра с 15,84 % до 20,31 % (прирост 4,47 %) по сравнению с режимом подачи постоянного потока флюидизационной воды;

– полупромышленные испытания нового способа подачи флюидизационной воды в центробежный сепаратор, установленный на золотоизвлекательной фабрике месторождения Бадран, подтвердили, что он позволяет повысить содержание золота в гравитационном концентрате на 16 г/т и увеличить извлечение в него золота на 2,1 % (имеется Акт о проведении полупромышленных испытаний от 15.01.2024);

– предложена новая конфигурация внутренней поверхности рабочего конуса центробежного сепаратора, на конструкцию которого получен патент на изобретение № RU 2 278 735;

– на новый способ подачи флюидизационной воды в рабочий конус центробежного сепаратора получен патент на изобретение № RU 2 321 461.

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на II Всероссийской школе-семинаре молодых ученых, посвященной 75-летию со дня рождения члена-корреспондента РАН Леонова С. Б. (Иркутск, 2006 г.); на Международном совещании «Прогрессивные методы обогащения и технологии глубокой переработки руд цветных, редких и платиновых металлов» (Плаксинские чтения, г. Красноярск, 2006 г.); на IV Международной научной школе молодых ученых и специалистов, посвященной 30-летию ИПКОН РАН (г. Москва, 2007 г.); на Международном совещании «Современные методы комплексной переработки руд и нетрадиционного минерального сырья» (Плаксинские чтения, г. Апатиты, 2007 г.); на Конгрессах обогатителей стран СНГ (V Конгресс, г. Москва, 2005 г.; VI Конгресс, г. Москва, 2007 г.; VIII Конгресс, г. Москва, 2011 г.); на Международном совещании «Современные процессы комплексной и глубокой переработки труднообогатимого минерального сырья» (Плаксинские чтения, г. Иркутск, 2015 г.); на Международном совещании «Современные проблемы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья» (Плаксинские чтения, г. Москва, 2023 г.).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 27 печатных работ, в том числе 2 патента Российской Федерации № 2278735 и № 2321461, подтверждающие техническую новизну конструкторских и технологических работ.

Личный вклад автора состоит в формулировании целей и задач диссертационной работы, создании математической модели, описывающей движение минеральных частиц в рабочем конусе сепаратора, разработке методик изучения минеральной постели с использованием скоростной киносъемки и криогенной заморозки, планировании и проведении лабораторных и полупромышленных испытаний, анализе и обработке полученных результатов, в формулировании выводов и рекомендаций, подготовке публикаций и апробации результатов исследования.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников информации из 102 наименований и трех приложений, изложена на 181 странице машинописного текста, содержит 22 таблицы и 60 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована важность и актуальность темы исследований, сформулированы цель, основная идея и задачи исследований, изложены методы исследований, основные научные положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая ценность работы, приведена информация об апробации работы и личном вкладе автора в ее выполнении.

В первой главе выполнен обзор существующих типов центробежных сепараторов и показан эволюционный путь совершенствования их конструкций в направлении повышения эффективности работы, надежности и удобства эксплуатации, увеличения

единичной мощности. Проведен анализ способов разрыхления минерального слоя в кольцевых ячейках сепараторов, начиная от полного отсутствия его перемешивания (центрифуги) и заканчивая наиболее эффективным, за счет подачи флюидизационной воды через наружную стенку рабочего конуса. Обзор современного состояния выявил необходимость совершенствования процесса центробежной сепарации с учетом гидродинамики. Как итог, сформулирована гипотеза о возможности дальнейшего улучшения показателей центробежной сепарации за счет нового способа подачи флюидизационной воды, и намечены основные направления исследований.

Во второй главе представлено теоретическое обоснование нового комбинированного способа подачи флюидизационной воды через наружную стенку рабочего конуса сепаратора.

В диссертации разработана математическая модель, описывающая траектории движения минеральных частиц на всех этапах перемещения внутри центробежного сепаратора, начиная от выхода из питающего патрубка и заканчивая распределением в минеральной постели кольцевой ячейки конуса сепаратора. В основу положено рассмотрение движения одиночной твердой частицы в потоке жидкости, описываемое уравнением Чена, которое применяется для исследования ламинарного и турбулентного режимов движения:

$$\xi_1 \frac{d\mathbf{u}_\tau}{dt} = \xi_2 (\mathbf{u}_* - \mathbf{u}_\tau) + \xi_3 \left(\frac{\partial \mathbf{u}_*}{\partial t} + \mathbf{u}_* \frac{\partial \mathbf{u}_*}{\partial x_*} - \nu \frac{\partial^2 \mathbf{u}_*}{\partial x_*^2} \right) + \xi_4 (1+k) \frac{d(\mathbf{u}_* - \mathbf{u}_\tau)}{dt} + \xi_5 \int_{t_0}^t \frac{d(\mathbf{u}_* - \mathbf{u}_\tau)}{\partial t} \frac{d\varepsilon}{\sqrt{t-\tau}} + F(t) \quad (1)$$

В левой части уравнения (1) стоит произведение массы частицы ($\xi_1 = \frac{4}{3} \pi \rho_* R^3$) на ее ускорение, а в правой части уравнения – полная сила, действующая на твердую частицу в потоке жидкости. Первый член в правой части представляет вязкую силу Стокса ($\xi_2 = 6\pi \rho_* d\nu$), второй – силу, возникающую вследствие неравномерного распределения давления вокруг частицы ($\xi_3 = \frac{4}{3} \pi \rho_* R^3$). Третий член уравнения характеризует присоединенную массу жидкости ($\xi_4 = \frac{4}{3} \pi \rho_* R^3$), ($k = 0,5$ для сферических частиц, $k = 10$ для диска). Четвертый член представляет силу Бассэ, учитывающую влияние нестационарности течения жидкости на движение твердой частицы. Пятый член в правой части – это внешняя постоянная сила, действующая на твердую частицу и заставляющая изменять направление ее движения. Данное уравнение справедливо, когда скорость движения частицы мала по сравнению со скоростью окружающей ее жидкости, и размер частицы меньше масштаба турбулентных образований.

С использованием выбранного подхода и привлечением классических гидродинамических уравнений, описывающих движение минеральных зерен в жидкой среде, на первом этапе моделирования было выведено уравнение, позволяющее определить силу F_r , действующую на твердую частицу, движущуюся по восходящей спирали вдоль стенки центробежного сепаратора. Уравнение имеет следующий вид:

$$F_r = m \omega^2 \left(\frac{R_0^4}{r^3} + \frac{2R_0^2}{r} + r \right), \quad (2)$$

где m – масса частицы;

ω – угловая скорость вращения конуса сепаратора;

R_0 – начальный радиус вращения в точке выхода частицы из питающего патрубка;

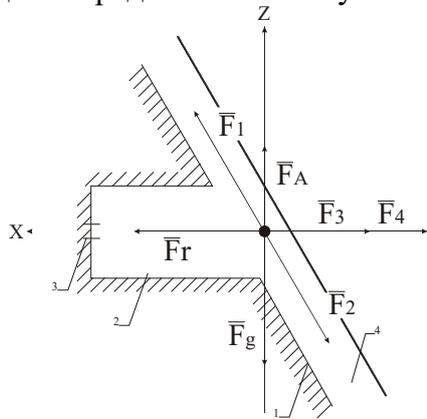
r – текущая координата положения частицы.

С учетом того, что поток частиц на уровне кольцевой ячейки разделяется на составляющие, и часть частиц вместе с жидкостью продолжают двигаться вверх по стенке сепаратора, а часть твердой фазы заходит в ячейку, постепенно ее заполняя, была построена еще одна модель движения твердых частиц, описывающая продвижение частиц внутрь кольцевой ячейки (рисунок 1). В ней были учтены все факторы, влияющие на процесс: сопротивление несущего потока жидкости, давление флюидизационного потока жидкости, выходящего из ячейки в направлении, противоположном движению твердой фазы, центробежная сила, размер частиц, их удельный вес, а также порозность минерального слоя. После подстановки гидродинамических формул, позволяющих рассчитать величину действующих на частицу сил, и выполнения преобразований было получено итоговое уравнение, описывающее траекторию движения частицы внутри кольцевой ячейки и расстояние, на которое сможет продвинуться частица в ячейке (x_1):

$$x_1 = \frac{2\omega^2 d^2 \varepsilon \rho_{0m} \left(\frac{R_0^4}{r^3} + r \right) - \frac{3dP}{\rho_m}}{72(1-\varepsilon)\nu\rho_{0жс}} \left\{ t - \frac{d^2 \varepsilon \rho_{0m} [1 + \rho^0(1+k)] \times \left[\exp\left(\frac{36\nu(1-\varepsilon)\rho_{0жс} t}{d^2 \varepsilon \rho_m [1 + \rho^0(1+k)]} \right) - 1 \right]}{36\nu(1-\varepsilon)\rho_{0жс}} \right\}. \quad (3)$$

Полученное уравнение показывает сложность исследуемого движения, учет отдельных параметров которого в математической модели сразу же усложняет вид решения, делая его не очень простым для применения в практическом использовании. Тем не менее вид полученного решения позволяет сделать качественную оценку влияния наиболее важных параметров (размер и удельный вес частиц, порозность минерального слоя) на характер движения твердых частиц в ячейке сепаратора.

В приведенном виде уравнение (3) учитывает только наличие постоянного потока флюидизационной воды, подаваемой через отверстие в стенке конуса сепаратора. Анализ уравнения показывает, что при балансе всех действующих сил частица в зависимости от размера и массы будет останавливаться на определенной глубине кольцевой ячейки, которая будет во многом зависеть от расхода флюидизационной воды, влияющей на разрыхленность минеральной постели. Повышение расхода флюидизационной воды будет увеличивать ε (порозность) и глубину проникновения частицы вглубь ячейки, но может привести и к выталкиванию частицы за пределы ячейки с уносом в хвосты.



1 – стенка конуса сепаратора; 2 – кольцевая ячейка;

3 – отверстие для подачи флюидизационной воды; 4 – несущий поток пульпы

Рисунок 1 – Силы, действующие на частицу при движении по стенке рабочего конуса сепаратора

Поэтому в уравнение (3) была введена переменная составляющая, учитывающая периодическую подачу дополнительного объема флюидизационной воды, расход которой меняется по гармоническому закону с определенной частотой $A \sin \Omega t$. Периодичность подачи, должна способствовать проникновению тяжелой частицы в глубину минеральной постели, но при этом не приводить к ее выталкиванию из постели вследствие кратковременности действия и наличия инерционной составляющей.

После преобразований были выведены два новых уравнения (4) и (5), описывающие скорость $u(t)$ и траекторию $x(t)$ продвижения частицы вглубь кольцевой ячейки, учитывающие наличие дополнительного пульсирующего потока флюидизационной воды:

$$u(t) = \frac{\omega^2 \left(\frac{R_0^4}{r^3} + r \right) \rho_m d}{36\nu\rho_{жс}} \left(1 - \frac{1}{e^{-k_1 t}} \right) - \frac{P_0 \rho_m \Omega e^{-k_1 t}}{\left[1 + \frac{\Omega^2 \rho_m^2 d^2}{1296\nu^2 \rho_{жс}} \right] 864\nu^2 \rho_{жс}^2} - \frac{P_0 \sin(\Omega t - \arctg \frac{\Omega}{k_1})}{24\nu\rho_{жс} \sqrt{1 + \frac{\Omega^2}{k_1^2}}} \quad (4)$$

$$x(t) = x_0 + \frac{P_0 \Omega (1 - k_1 t)}{24\nu\rho_{жс} (k_1^2 + \Omega^2)} + \frac{3P_0 \cos(\Omega t - \arctg \frac{\Omega}{k_1})}{2\rho_m d \Omega \sqrt{k_1^2 + \Omega^2}} \quad (5)$$

Из анализа этих уравнений видно, что периодическая составляющая флюидизационного потока воды увеличивает расстояние, на которое частица может проникать в глубину минеральной постели. В момент наличия пульсирующего потока воды происходит увеличение ее порозности ε и расширение межзерновых каналов. А при прекращении потока пульсирующей воды происходит скачкообразное продвижение частицы по расширившимся каналам в глубину минерального слоя под действием центробежной силы, возникающей при вращении конуса сепаратора.

Теоретические исследования позволили сделать следующие выводы. Твердая фаза при движении в пульпе по внутренней поверхности конуса сепаратора перераспределяется по крупности и весу. Крупные тяжелые фракции заполняют все пространство около стенки, препятствуя проникновению мелкой фракции (концентрата) в ячейки. Более того, заполнение самой ячейки происходит, в первую очередь, также крупной фракцией, которую затем приходится разрыхлять подачей флюидизирующей воды через отверстие в стенке ячейки, чтобы дать возможность попасть туда тонким частицам ценного компонента. Оставшаяся часть минеральных зерен не попадает в ячейки и уносится вместе с потоком пульпы в хвосты (см. рисунки 2 и 3).

Учитывая, что подача пульсирующего потока воды приводит к увеличению порозности минерального слоя ε в работе обоснован оптимальный диапазон изменения данного параметра, составляющий от 0,4–0,45 и до 0,63–0,65. Минимальное значение 0,4–0,45 соответствует нахождению зернового слоя в неподвижном состоянии, когда частицы не взвешиваются потоком воды и находятся в контакте друг с другом (режим фильтрации). Этот параметр определен многочисленными исследованиями по фильтрации жидкостей через зерновой слой (Тодес О. М. и др.).

Максимальное значение порозности 0,63–0,65 выведено в результате обобщения результатов из разных областей научных исследований. Например, экспериментальными исследованиями процессов массопереноса в химической технологии установлено, что имеется оптимальное значение порозности зернового слоя 0,6–0,7, при которой отмечается максимум пульсационных скоростей частиц и коэффициента диффузии капельных жидкостей. В этом режиме имеет место максимальная скорость перемешивания частиц и капельных жидкостей в объеме взвешенного слоя. Теоретический анализ процессов в

псевдооживленном слое, выполненный с использованием положений гидродинамики, также показал, что максимальное число столкновений частиц (максимальное перемешивание) достигается при порозности 0,63 для турбулентного и 0,65 для переходного режимов существования псевдооживленного слоя.

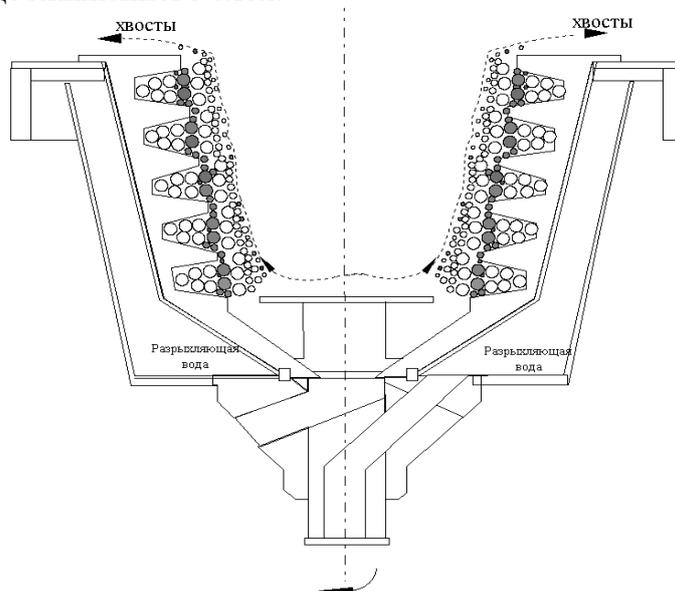


Рисунок 2 – Схема расслоения минеральных частиц в кольцевой ячейке рабочего конуса центробежного сепаратора

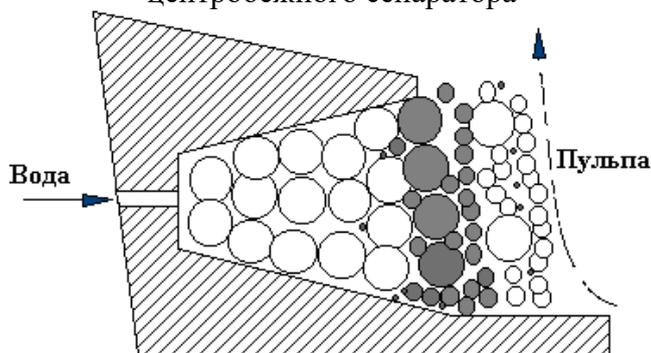


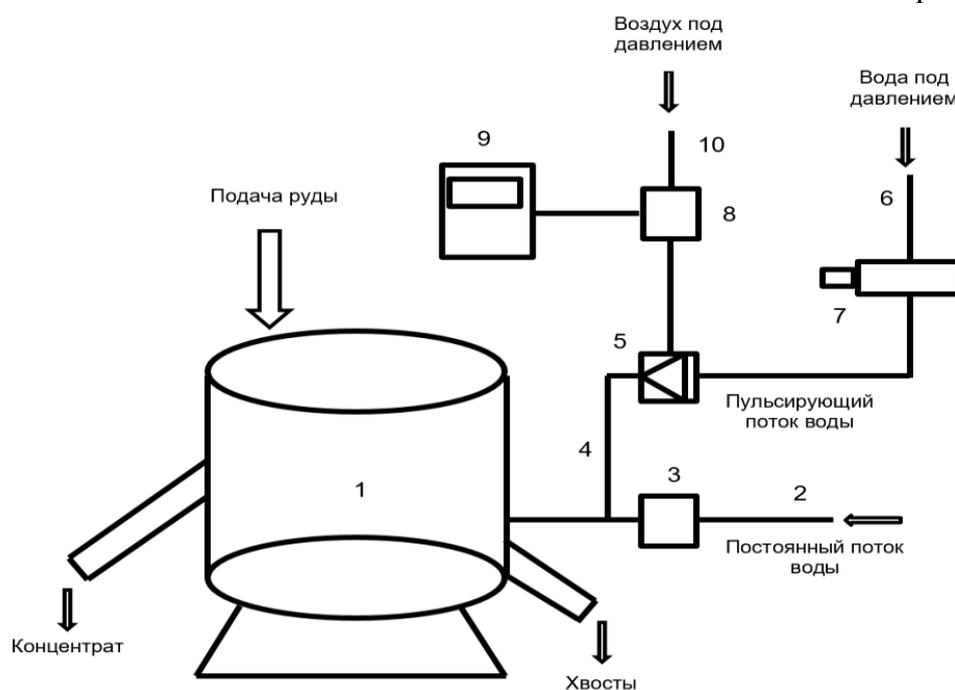
Рисунок 3 – Распределение минеральных частиц в рабочем конусе

Экспериментальными исследованиями пневматической сепарации было установлено, что максимальное разрыхление (порозность) зернового слоя не должно превышать значение 0,65. Для отсадки с естественной постелью максимальная разрыхленность также не должна превышать 0,65. Наличие данного граничного значения порозности минерального слоя объясняется тем, что ее увеличение происходит за счет возрастания скорости продвижения через него жидкой фазы. Превышение оптимального значения данного параметра будет приводить к нарушению сегрегационных процессов, в результате чего вместо интенсификации продвижения частиц ценных компонентов вглубь кольцевой ячейки может возникнуть обратный эффект вследствие противодействия восходящих потоков жидкости продвижению минеральных зерен. При увеличении скорости потока жидкости выше определенного значения минеральные частицы начинают вырываться из зернового слоя и уносятся в направлении движения жидкой фазы. Вместо режима взвешивания и сегрегации будет возникать режим транспорта частиц.

Наличие этого критерия позволяет сделать расчет оптимальных параметров потока пульсирующей воды для центробежного сепаратора любого размера. В диссертации в качестве примера такой расчет приведен для конуса сепаратора Knelson KC MD-3. Он выполнен с помощью критериальных уравнений Рейнольдса и Архимеда по методике,

предложенной автором работы. Применительно к конусу сепаратора КС MD-3 это может быть подача постоянного расхода воды со скоростью 0,025 м/с (4,2 л/мин) с периодическим увеличением этого параметра до 0,075 м/с (12,6 л/мин). При скорости стесненного падения частиц пирита размером порядка 0,05 мм, равной примерно 0,125 м/с, и толщине постели в ячейке сепаратора 12 мм время прохождения через постель под действием центробежной силы 60g составит примерно 0,1 с. Это соответствует полному периоду колебаний подачи промывной воды 0,2 с и частоте примерно 5 Гц. Для более крупных частиц ценных компонентов допустимая частота пульсаций флюидизационной воды может быть выше. При этом создаются оптимальные условия для прохождения самых мелких частиц ценных компонентов вглубь минеральной постели и удержания в ней до момента разгрузки концентрата.

В третьей главе описывается устройство для реализации нового способа подачи флюидизационной воды, разработанное для проведения лабораторных исследований на сепараторах Knelson КС MD-3 и КС MD-7.5. Схематично оно показано на рисунке 4.



1 – центробежный концентратор; 2 – труба постоянного потока; 3 – регулирующий кран; 4 – труба пульсирующего потока; 5 – пневматический клапан; 6 – водопровод; 7 – редуктор; 8 – распределительное устройство; 9 – реле времени; 10 – магистраль

Рисунок 4 – Схема установки для пульсирующей подачи флюидизационной воды в центробежный концентратор

Установка включала центробежный концентратор 1, в который по трубе 2 подавался постоянный поток флюидизационной воды, расход которой регулировался краном 3. По трубе 4 через клапан 5 с пневматическим управлением в концентратор вводился пульсирующий поток флюидизационной воды из водопровода 6, давление которой регулировалось редуктором 7.

Пульсации создавались за счет открытия и закрытия клапана 5 с помощью распределительного устройства 8 с электромеханическим приводом. Оно обеспечивало подачу воздуха высокого давления из магистрали 10 в систему управления клапаном 5 для его закрытия и сброс воздуха – для его открытия. Параметры пульсаций (продолжительность импульса и интервал между импульсами, т.е. скважность) регулировались с помощью реле времени 9 «Овен» УТ24, которое управляло работой распределительного устройства 8.

В процессе исследований было выполнено практическое изучение распределения частиц минералов в постели, которая формируется в кольцевых канавках конуса центробежного сепаратора при подаче флюидизационной воды по традиционному и новому способам. Исследования проводились на концентраторе Knelson KC MD7.5. Для фиксации структуры минеральной постели, формирующейся в процессе обогащения искусственных смесей, состоящих из кварцевого песка и различных тяжелых минералов, в рабочий конус подавался жидкий азот. Замороженная постель вынималась из кольцевых канавок и фотографировалась в разных плоскостях. В качестве тяжелых минералов использовались магнетит крупностью $-0,2+0$ мм и пирит крупностью $-0,5+0,071$ мм. Крупность кварцевого песка, который имитировал пустую породу, составляла $-1+0$ мм.

Фотографии минеральной постели из кольцевой ячейки сепаратора Knelson KC MD-7.5 при подаче постоянного потока флюидизационной воды показаны на рисунке 5. На фотографиях видно, что в этом данном режиме подачи флюидизационной воды частицы магнетита и пирита образовали на поверхности минеральной постели слой толщиной от 3 до 6 мм. Подавляющее количество тяжелых минералов сосредоточено в этом приповерхностном слое, толщина которого составляет 10–20 % от глубины ячейки. Только самые мелкие частицы магнетита в небольшом количестве проникли в глубину минеральной постели (примерно на $2/3$ толщины постели).

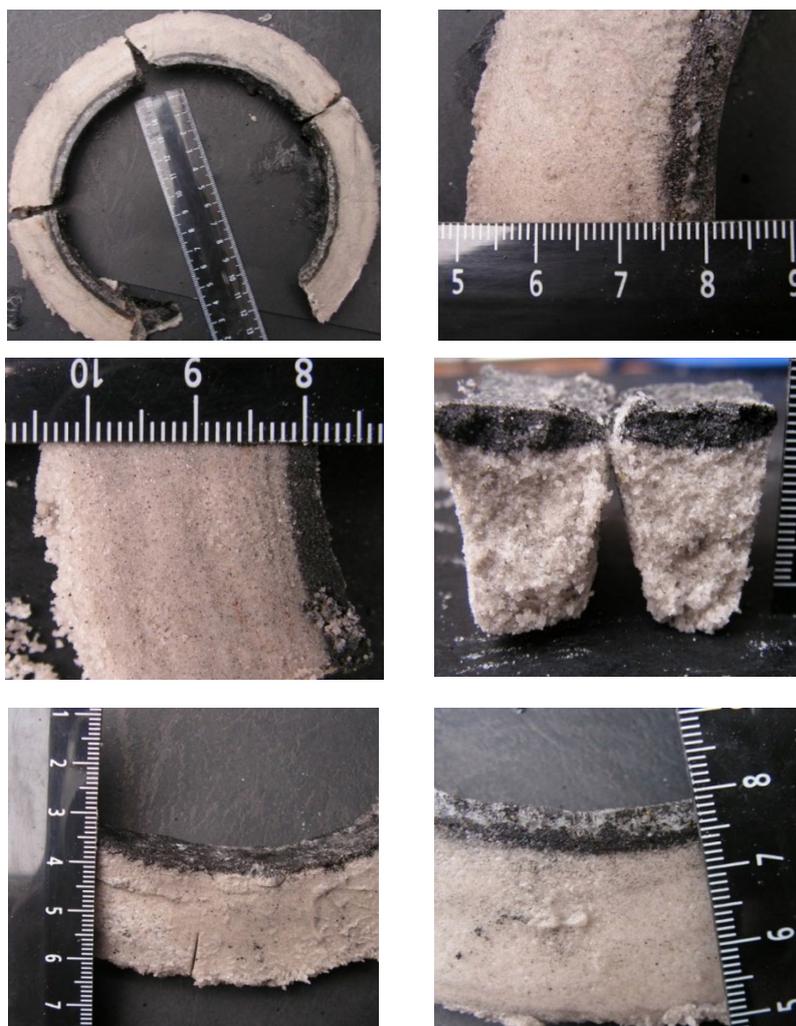


Рисунок 5 – Формирование концентрата в рабочем конусе концентратора при постоянном потоке флюидизационной воды
(темный материал – тяжелые минералы, светлый материал – легкие минералы)

На фотографиях видно распределение частиц по крупности. Ячейка почти на всю глубину заполнена зернами кварца в основном крупного размера. Все пространство между ними заполнено мелкими и средними зернами. В приповерхностном слое концентрируются зерна тяжелых минералов всех размеров, и на них в самом верхнем слое закрепляются крупные зерна кварца. Механизм такой стратификации зерен следующий. При подаче питания в конус сепаратора в пристеночном слое оказываются крупные частицы кварца из-за большой массы. Они первыми попадают в кольцевую ячейку, создавая основу минеральной постели. Промежутки между крупными зернами заполняют средние и мелкие зерна кварца, образуя плотную структуру. Мелкие тяжелые минералы постепенно накапливаются на поверхности минеральной постели. Подобное строение минерального слоя в ячейке сепаратора соответствует результатам моделирования, изложенным во 2-й главе диссертации.

На рисунке 6 показаны фотографии минеральной постели из кольцевой ячейки сепаратора Knelson KC MD-7.5, при новом способе подачи флюидизационной воды. По фотографиям видно, что добавление пульсирующей подачи воды к постоянному флюидизационному потоку изменило вид распределения зерен магнетита по объему минеральной постели в кольцевой ячейке. Если раньше тяжелая фракция концентрировалась на поверхности постели слоем толщиной до 6 мм и не проникала внутрь, то при добавлении пульсирующего потока магнетит заполнил значительный объем кольцевой ячейки, проникнув почти до внешней стенки рабочего конуса. Наиболее глубокое проникновение произошло в зоне расположения отверстия для подачи флюидизационной воды, где образовались своеобразные «язычки».

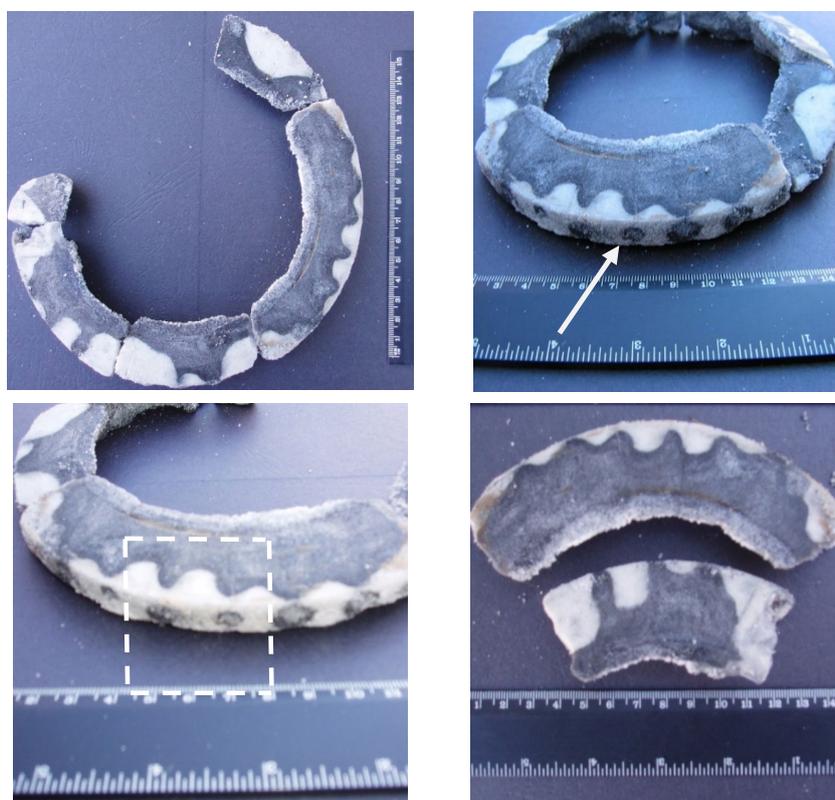


Рисунок 6 – Формирование концентрата в рабочем конусе центробежного сепаратора при комбинированной подаче флюидизационной воды (темный материал – тяжелые минералы, светлый материал – легкие минералы)

По фотографиям видно, что между отверстиями для подачи воды в постели формируются «мертвые зоны», в которые зерна магнетита не попадают (выделено белым штриховым контуром). Эти зоны содержат только пустую породу. В силу законов гидродинамики разрыхление минеральной постели в этих зонах почти не происходит, и проникновения в них частиц ценных компонентов не наблюдается. Материал из этих зон при разгрузке рабочего конуса только разубоживает концентрат, не способствуя повышению извлечения ценного компонента. Эта особенность поведения частиц ценных компонентов в минеральной постели позволила разработать новую форму кольцевой ячейки, которая должна быть разделена на сектора путем выполнения перегородок трапецеидальной формы, расположенных между отверстиями для ввода флюидизационной воды как раз в месте образования «мертвых зон». Эти перегородки уменьшают объем минеральной постели, не содержащей зерен ценных компонентов, и позволяют повысить содержание ценного компонента в гравитационном концентрате. На конус с оптимизированной геометрией получен патент Российской Федерации на изобретение № 2278735. Второй патент Российской Федерации на изобретение № 2321461 был получен на сепаратор, имеющий устройство для разрыхления минеральной постели рабочего конуса с использованием пульсирующих воздействий.

Факт наложения пульсаций на постоянный поток флюидизационной воды, приводящих к активизации продвижения зерен магнетита вглубь минеральной постели, был подтвержден скоростной видеосъемкой. При обогащении тонкозернистой смеси (-0,5+0 мм) зерна магнетита за время эксперимента продвигались почти на всю глубину постели. Для крупнозернистой смеси (-1+0 мм) продвижение было меньше, но тем не менее составило примерно 40 % от толщины постели. Отличие объясняется разной степенью разрыхления минеральной постели (с частицами разной крупности) пульсирующими потоками воды, которая подавалась в одном режиме для обоих опытов. Крупнозернистая смесь разрыхлялась (взвешивалась) в меньшей степени, и поэтому зерна магнетита продвигались менее интенсивно.

Таким образом, с использованием видео- и фотосъемки было экспериментально доказано активизирующее влияние комбинированного способа подачи флюидизационной воды на продвижение тяжелых минералов вглубь минеральной постели рабочего конуса, теоретически обоснованное диссертационной работе. Новый механизм разрыхления существенно повышает «емкость» постели в отношении частиц с большим удельным весом, что улучшает показатели работы центробежных сепараторов. При этом достигается не только лучшее проникновение тяжелых частиц по межзерновым каналам, но и активизируется удаление зерен пустой породы в хвосты за счет выноса их на поверхность постели и удаления с потоком пульпы.

Применение нового способа подачи флюидизационной воды увеличивает продолжительность цикла работы сепаратора за счет расширения зоны накопления и удержания зерен ценных компонентов. Активно работающая часть минеральной постели составляет не 10–20 %, а до 70–80 % ее объема. В совокупности это приводит к сокращению выхода гравитационного концентрата и увеличению содержания в нем ценного компонента без снижения его извлечения.

В четвертой главе приведены результаты практической проверки эффективности нового способа регулирования центробежных концентраторов, выполненной в лаборатории на лежалых хвостах золотосодержащей руды месторождения Бадран. В процессе исследований было определено влияние параметров пульсационной подачи флюидизационной воды (частота подачи импульсов, их скважность, амплитуда) на показатели

обогащения руды, а также сформулированы рекомендации для практического применения данного способа регулирования в центробежных концентраторах промышленного типа-размера.

Результаты исследований подтвердили, что добавление пульсационного потока флюидизационной воды к постоянному потоку приводит к улучшению показателей гравитационного обогащения лежалых хвостов. Обогащение лежалых хвостов на лабораторном сепараторе Knelson KC MD-3 показало, что новый способ подачи флюидизационной воды в оптимальном режиме позволяет увеличить извлечение золота с 33,42 % до 37,04 % (прирост 3,62 %) и серебра с 15,84 % до 20,31 % (прирост 4,47 %). Тем самым получено практическое подтверждение теоретически обоснованного механизма интенсификации процессов, происходящих в минеральной постели рабочего конуса центробежного сепаратора.

Было установлено, что зависимость извлечения золота в концентрат от частоты пульсирующего потока воды носит экстремальный характер. Максимальная эффективность воздействия соответствует частоте 60–80 пульсаций в минуту. Снижение и увеличение частоты пульсаций относительно этого диапазона приводит к снижению положительного влияния пульсаций на показатели обогащения (см. рисунок 7). Увеличение продолжительности паузы между импульсами (увеличение скваженности) приводит к плавному снижению извлечения золота.

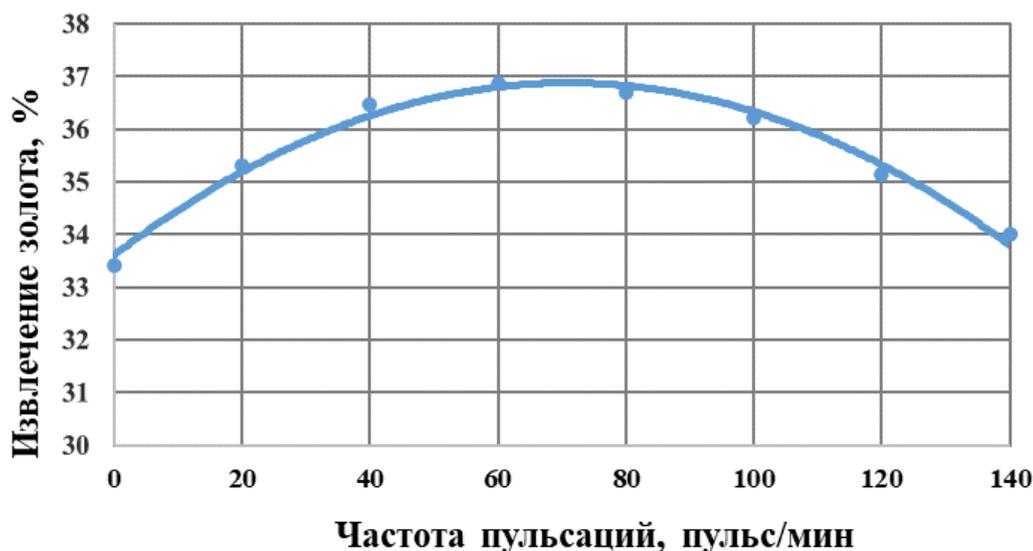


Рисунок 7 – Зависимость извлечения золота в концентрат от частоты пульсаций флюидизационной воды

Далее был выполнен блок тестов, в котором переменным фактором являлся мгновенный расход пульсирующего потока воды (расход воды во время подачи импульса) при частоте 60 пульс/мин. Результаты тестов показали, что максимальное извлечение золота достигается при мгновенном расходе пульсирующей воды в интервале 2–3 л/мин. За пределами данного интервала извлечение золота снижается (см. рисунок 8).

Обогащение лежалых хвостов на лабораторном сепараторе Knelson KC MD-3 показало, что новый способ подачи флюидизационной воды в оптимальном режиме позволяет увеличить извлечение золота с 33,42 % до 37,04 % (прирост 3,62 %) и серебра с 15,84 % до 20,31 % (прирост 4,47 %).

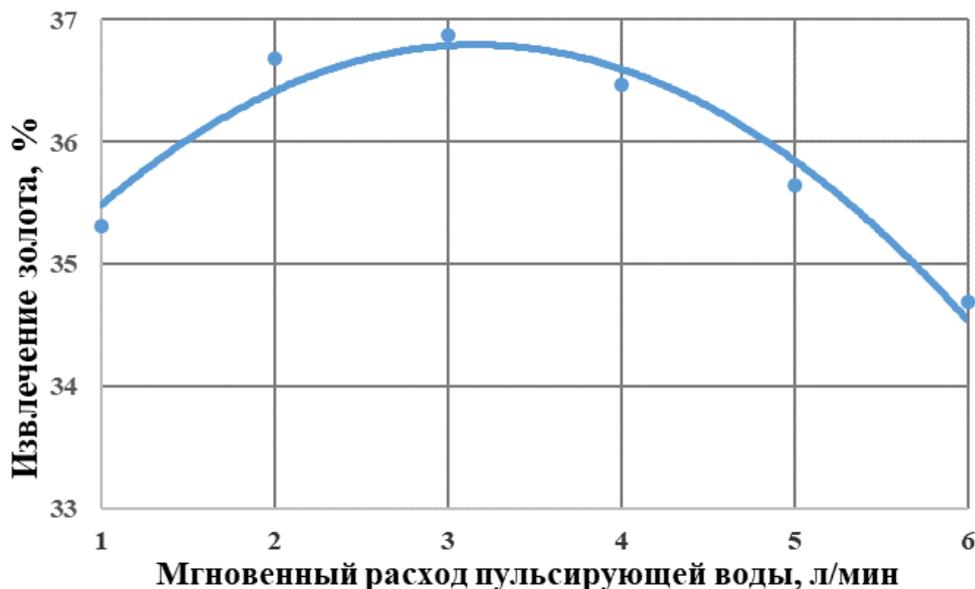


Рисунок 8 – Зависимость извлечения золота в концентрат от мгновенного расхода флюидизационной воды при частоте 60 пульс/мин

В пятой главе приведены результаты полупромышленных испытаний нового способа подачи флюидизационной воды, проведенные на золотоизвлекательной фабрике (ЗИФ) «Бадран», перерабатывающей золотосодержащую руду одноименного месторождения. Для проведения испытаний концентратор Knelson KC XD30, установленный на первой стадии гравитационного обогащения, был оборудован устройством, реализующим новый способ подачи флюидизационной воды.

На сепаратор поступала руда из мельницы полусамоизмельчения, прошедшая через бутару и защитный грохот. Крупность питания сепаратора составляла минус 2 мм. Содержание золота в руде равнялось 6,5 г/т. Для проведения испытаний на концентраторе KC XD30 первой стадии обогащения был выставлен следующий режим работы: расход постоянного потока флюидизационной воды – 30 м³/ч; мгновенный расход пульсирующего потока флюидизационной воды – 20 м³/ч; средний расход пульсирующего потока флюидизационной воды – 10 м³/ч; длительность импульса подачи воды – 0,5 с; длительность паузы между импульсами – 0,5 с; частота пульсаций – 60 пульс/мин; значение центробежного фактора $G = 60g$; длительность цикла работы концентратора – 60 мин.

На данном режиме концентратор отработал 15 смен по 8 час. Для оценки степени влияния нового способа подачи флюидизационной воды на показатели обогащения испытания проводились в сравнительном режиме. При этом одну смену концентратор работал в обычном режиме с постоянным потоком флюидизационной воды. Другую – при использовании комбинированного режима подачи флюидизационной воды.

Испытания показали, что новый способ подачи флюидизационной воды позволил увеличить извлечение золота в гравитационный концентрат на 2,1 % по сравнению с использованием стандартной системы подачи постоянного потока воды. Содержание золота в концентрате выросло с 2 130 г/т до 2 146 г/т (прирост 16 г/т) и с 1,98 г/т до 1,84 г/т снизилось содержание золота в хвостах гравитации. За счет нового способа подачи флюидизационной воды в расчете на год прирост выпуска золота может составить 32,76 кг. Прогнозный (ожидаемый) экономический эффект для ЗИФ «Бадран» может составить 227 млн. руб/год (в ценах 2023 года).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан комбинированный способ подачи флюидизационной воды в центробежный сепаратор, стимулирующий разрыхление минеральной постели в рабочем конусе и перераспределение минеральных частиц в кольцевых ячейках конуса сепаратора, что способствует повышению извлечения и содержания золота в концентрате.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Показан эволюционный путь развития конструкций аппаратов для центробежного обогащения минерального сырья, направленный на совершенствование способов разрыхления минеральной постели в рабочем конусе центробежных сепараторов, на оптимизацию сегрегационного механизма перераспределения частиц ценных минералов и пустой породы. На основании критического анализа имеющихся технических решений сделан вывод, что наилучшие условия для обогащения руды созданы в сепараторах, у которых разрыхление минеральной постели осуществляется путем подачи флюидизационной воды через отверстия в наружной стенке рабочего конуса.

2. Создана теоретическая модель процесса движения минеральных частиц из потока пульпы в ячейки (рифли) рабочего конуса центробежного сепаратора. Разработан комплекс уравнений, описывающих траектории движения частиц разного размера и удельного веса внутри конуса сепаратора, а также механизм формирования в нем гравитационного концентрата. Показана роль в этих процессах постоянного потока флюидизационной воды, интенсифицирующей сегрегационные процессы за счет разрыхления минеральной постели. Теоретически обоснована возможность дополнительной активизации сепарационных процессов в зерновом слое за счет подачи в рабочий конус пульсирующего потока флюидизационной воды, расширяющей зону накопления частиц ценных компонентов в ячейках рабочего конуса центробежного сепаратора.

3. На основании анализа существующих моделей поведения частиц в псевдооживленном двухфазном зерновом слое обоснован оптимальный диапазон регулирования порозности минеральной постели в конусе сепаратора (0,4–0,65), который необходимо создавать за счет подачи дополнительного пульсирующего потока флюидизационной воды. С использованием критериальных гидродинамических уравнений разработан алгоритм расчета параметров пульсирующего потока воды в зависимости от крупности, формы и удельного веса минеральных частиц.

4. Предложен новый комбинированный способ регулирования режима работы центробежных сепараторов, заключающийся в совместной подаче постоянного и пульсирующего потоков флюидизационной воды через отверстия в наружной стенке рабочего конуса. Исследования на искусственных смесях из кварца, магнетита и пирита подтвердили активизацию процессов накопления тяжелых минералов в зерновом слое при наличии пульсирующей составляющей флюидизационной воды. Активно работающая часть минеральной постели увеличилась с 10–20 % до 70–80 % от ее объема.

5. Разработана конструкция блока управления, реализующая новый способ подачи флюидизационной воды в центробежный сепаратор. Работоспособность устройства проверена в лабораторных условиях с сепараторами Knelson KC MD-7.5 и KC MD-3.

6. В лабораторных условиях изучено влияние параметров пульсирующего потока флюидизационной воды (частота пульсаций, скважность импульсов, мгновенный расход воды) на показатели обогащения лежалых хвостов от переработки золотосодержащей руды месторождения Бадран. Экспериментально установлено, что новый способ подачи флюидизационной воды в оптимальном режиме позволяет увеличить извлечение золота с 33,42 % до 37,04 % (прирост 3,62 %) и серебра с 15,84 % до 20,31 % (прирост 4,47 %).

7. На конструкцию центробежного сепаратора, реализующего новый способ подачи флюидизационной воды для разрыхления постели в рабочем конусе, а также на модуль центробежного обогащения получены два патента: патенты на изобретение РФ № 2278735, № 2321461.

8. Результаты испытаний нового способа подачи флюидизационной воды в центробежный сепаратор на ЗИФ «Бадран» подтвердили работоспособность и эффективность использования устройства, разработанного для комбинированной подачи флюидизационной воды, которое было установлено на сепаратор Knelson KC XD30 первой стадии отделения гравитационного обогащения. Достигнуто повышение извлечения золота в гравитационный концентрат на 2,1 %. В пересчете на год выпуск золота может быть увеличен на 32,76 кг. Ожидаемый эффект составил 227 млн руб/год.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы. Дальнейшие исследования в рамках тематики могут быть направлены на уточнение условий применения данного способа регулирования подачи флюидизационной воды в центробежных концентраторах промышленного типоразмера.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из Перечня изданий, рекомендованных ВАК РФ

1. Федотов, К. В. Расчет скоростей гидродинамических потоков в центробежном концентраторе / К. В. Федотов, А. А. Романченко, **А. Е. Сенченко** // Горный журнал. – 1998. – № 5. – С. 23-25.

2. Федотов, К. В. Численное определение составляющих скорости потока жидкости в центробежных аппаратах / К. В. Федотов, В. В. Дудкин, А. А. Романченко, **А. Е. Сенченко** // Обогащение руд. – 1998. – № 4. – С. 34-48.

3. Федотов, К. В. Практика извлечения труднообогатимого золота из россыпных месторождений / К. В. Федотов, С. Б. Леонов, **А. Е. Сенченко** // Горный журнал. – 1998. – № 5. – С. 56.

4. Федотов, К. В. Отдельные закономерности динамики твердых частиц в центробежных сепараторах / К. В. Федотов, В. Д. Казаков, **А. Е. Сенченко** // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. Специальный выпуск. – 2003. – С. 86-88.

5. Федотов, К. В. Центробежное обогащение при переработке отходов углеобогатительных фабрик / К. В. Федотов, **А. Е. Сенченко**, Ю. В. Куликов // Уголь. – 2007. – № 12(980). – С. 76-77.

6. Федотов, П. К. Гравитационно-флотационное обогащение золотосодержащей руды / П. К. Федотов, **А. Е. Сенченко**, К. В. Федотов, А. Е. Бурдонов // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2021. – Т. 27. – № 1. – С. 4-15.

7. **Сенченко, А. Е.** Обоснование комбинированного способа подачи воды в центробежный концентрат / А. Е. Сенченко // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2024. – Т. 30. – № 4. – С. 80-88.

Статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международных реферативных базах данных Scopus, GeoRef

8. Федотов, П. К. Анализ технологических исследований золотосодержащих руд месторождения Чукотки / П. К. Федотов, **А. Е. Сенченко**, К. В. Федотов, А. Е. Бурдонов // Обогащение руд. – 2018. – № 2(374). – С. 23-29.

9. Федотов, К. В. Моделирование движения двухфазного потока пульпы в центробежном сепараторе / К. В. Федотов, **А. Е. Сенченко** // Экология и промышленность России. – 2017. – Т. 21. – № 11. – С. 30-35.

10. Федотов, П. К. Результаты исследования руды золоторудного месторождения на обогатимость гравитационными методами / П. К. Федотов, **А. Е. Сенченко**, К. В. Федотов, А. Е. Бурдонов // Цветные металлы. – 2021. – № 2. – С. 8-16.

11. Федотов, П. К. Технологические исследования золотосодержащей руды с использованием методов центробежной концентрации / П. К. Федотов, **А. Е. Сенченко**, К. В. Федотов, А. Е. Бурдонов // Известия УГГУ. – 2023. – Вып. 3 (71). – С. 77-86.

Патенты на изобретения

12. Пат. № 2321461, Российская Федерация, МПК В03В 5/32. Способ центробежной сепарации / Федотов К. В., **Сенченко А. Е.**, Куликов Ю. В., Макух Д. Г., Потемкин А. А.; заявитель и патентообладатель Федотов Константин Вадимович. – № заявки 2006132251/03, заявл. 08.09.2006; опубл. 10.04.2008. Бюл. № 10.

13. Пат. № 2278735, Российская Федерация, МПК В03В 5/32. Центробежный сепаратор / Казаков В. Д., **Сенченко А. Е.**, Толстой М. Ю., Федотов К. В.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Иркутский государственный технический университет. – № заявки 2005100402/03; заявл. 13.01.2005; опубл. 27.06.2006. Бюл. № 18.

Другие публикации

14. Федотов, К. В. Повышение сепарационных характеристик безнапорных центробежных концентраторов при обогащении золотосодержащего сырья / К. В. Федотов, **А. Е. Сенченко**, Ю. В. Куликов // Золотодобывающая промышленность. – 2008. – № 2 (26), апрель. – С. 6-7.

15. Леонов, С. Б. Мобильная обогатительная установка для извлечения золота из эфельных отвалов промывочных приборов / С. Б. Леонов, К. В. Федотов, **А. Е. Сенченко**, А. А. Романченко // II Конгресс обогатителей стран СНГ: сборник материалов (Москва, 16-18 марта 1999 г.). – М.: МИСиС-Альтекс, 1999. – С.71-72.

16. Федотов, К. В. Попутное извлечение благородных металлов на полиметаллических обогатительных фабриках / К. В. Федотов, А. А. Романченко, **А. Е. Сенченко** // II Конгресс обогатителей стран СНГ: сборник материалов (Москва, 16-18 марта 1999 г.). – М.: МИСиС-Альтекс, 1999. – С.116.

17. Леонов, С. Б. Создание технологий для извлечения тонких фракций тяжелых минералов на основе определения механизма сепарации в центробежных концентраторах / С. Б. Леонов, К. В. Федотов, **А. Е. Сенченко**, А. А. Романченко // Проблемы комплексной переработки минерального сырья и охраны окружающей среды (Плаксинские чтения -1999): сборник докладов Международного совещания (Иркутск, 14-17 сентября 1999 г.). Москва, Изд-во ННЦ ГП-ИГД. – С. 22-23.

18. Федотов, К. В. Изучение моделей движения двухфазного потока в центробежном сепараторе / К. В. Федотов, **А. Е. Сенченко**, Д. Г. Макух, Ю. В. Куликов // V Конгресс обогатителей стран СНГ: сборник материалов (Москва, 23-25 марта 2005 г.), Т. II. – М.: Изд-во «Альтекс», 2005. – С. 90-92.

19. Федотов, К. В. Применение центробежных методов обогащения в технологии переработки отходов углеобогатительных фабрик / К. В. Федотов, **А. Е. Сенченко**, М. А. Киселева, Ю. В. Куликов, С. А. Шевцова // Обогащение руд: материалы II Всероссийской школы-семинар молодых ученых с международным участием, посвященной 75-летию со дня рождения члена-корреспондента РАН С. Б. Леонова (специальный выпуск) (Иркутск, 25-27 апреля 2006 г.). – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2006. – С. 93-95.

20. Федотов, К. В. Модуль обогащения для извлечения труднообогатимого золота из песков целиковых и техногенных рассыпных месторождений / К. В. Федотов, **А. Е. Сенченко**, Ю. В. Куликов // Обогащение руд: материалы II Всероссийской школы-семинар молодых ученых с международным участием, посвященной 75-летию со дня рождения члена-

корреспондента РАН С. Б. Леонова (специальный выпуск) (Иркутск, 25-27 апреля 2006 г.). – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2006. – С. 105-109.

21. Федотов, К. В. Современные методы центробежного обогащения и перспективные направления совершенствования центробежного оборудования для переработки труднообогащаемого сырья / К. В. Федотов, **А. Е. Сенченко**, А. А. Романченко, Ю. В. Куликов // Обогащение руд: материалы II Всероссийской школы-семинар молодых ученых с международным участием, посвященной 75-летию со дня рождения члена-корреспондента РАН С. Б. Леонова (специальный выпуск) (Иркутск, 25-27 апреля 2006 г.). – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2006. – С. 118-122.

22. Федотов, К. В. Расширение области применения центробежной сепарации при обогащении труднообогащаемого золотосодержащего сырья / К. В. Федотов, **А. Е. Сенченко**, Ю. В. Куликов // Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых: материалы IV Международной научной школы молодых ученых и специалистов (Москва, 6-9 ноября 2007 г.). – М.: ИПКОН РАН, 2007. – С. 173-175.

23. Fedotov, P. K. Prospects of centrifugal concentration use and improvement for complex minerals processing / P. K. Fedotov, **A. Ye. Senchenko**, Yu. V. Kulikov, V. V. Tyutyunin // XXIV International Mineral Processing Congress (IMPC): Proceedings of the Congress (Beijing, 24-28 September, 2008). – Volume 1. – Beijing: Published by Science Press, 2008. – P. 1678-1685.

24. **Сенченко, А. Е.** Флюидизация в пульсирующем режиме при центробежном обогащении минерального сырья / А. Е. Сенченко // VIII Конгресс обогатителей стран СНГ: сборник материалов (Москва, 28 февраля - 02 марта 2011 г.), Т. I. – М.: МИСиС, 2011. – С. 188-192.

25. Федотов, К. В. Эффективные технологии гравитационного обогащения для комплексной переработки исходного и техногенного минерального сырья / К. В. Федотов, **А. Е. Сенченко**, Ю. В. Куликов // VIII Конгресс обогатителей стран СНГ: сборник материалов (Москва, 28 февраля - 02 марта 2011 г.), Т. I. – М.: МИСиС, 2011. – С. 193-197.

26. **Senchenko, A.** Improvement of centrifugal gravity concentrators performance for gold-containing minerals processing // XXVI International Mineral Processing Congress (IMPC): Proceedings of the Congress (New Delhi, 24-28 September 2012). – 2012. – P. 4846-4850

27. **Сенченко, А. Е.** Центробежная сепарация с пульсирующим давлением флюидизационной воды и воздуха / А. Е. Сенченко, К. В. Федотов // Современные проблемы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья (Плаксинские чтения – 2023): материалы Международной конференции (Москва, 02–05 октября 2023 г.) – М.: Изд-во Спутник, 2023. – С. 326-329.

Подписано в печать 15.04.2025. Формат 60 x 90 / 16.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 1,25.
Тираж 100 экз. Заказ 31к.

Отпечатано в типографии Издательства
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова 83