

На правах рукописи



ЛУЧКО Максим Сергеевич

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ОБОГАЩЕНИЯ
ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ МЕТОДОМ ОТСАДКИ В
ЦЕНТРОБЕЖНОМ ПОЛЕ**

Специальность 2.8.9. Обогащение полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Иркутск – 2024

Работа выполнена
в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования
«Иркутский национальный исследовательский технический университет»

- Научный руководитель:** **Федотов Павел Константинович**,
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»,
профессор кафедры обогащения полезных
ископаемых и охраны окружающей среды
им. С.Б. Леонова
- 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» Институт горного
дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского
отделения Российской академии наук (г. Якутск)

Защита состоится «06» июня 2024 года в 13.00 на заседании диссертационного совета 24.2.307.01 в ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, корпус «К», конференц-зал.

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

Автореферат разослан «15» апреля 2024 г.

Отзывы на автореферат (в 2-х экземплярах, заверенные печатью организации) просьба высылать по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ИРНТУ; ученому секретарю диссертационного совета 24.2.307.01 Вулых Н.В.

E-mail: vulix2011@yandex.ru Тел./факс: (3952) 40-51-17.

Ученый секретарь диссертационного
совета, к.т.н., доцент

Н.В. Вулых

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Обработка большей части вкрапленных месторождений золота сравнительно дешёвыми и экологичными гравитационными методами требует повышения эффективности извлечения золота в концентрат из предварительно измельчённого менее 0,1 мм сырья.

В отечественной и зарубежной золотодобыче широкое применение получили отсадочный и центробежные гравитационные методы обогащения, позволяющие эффективно извлекать в концентрат золото средних и мелких классов крупности. Применение на тонкоизмельчённом продукте отсадочных машин ограничено недостаточно высоким извлечением в концентрат ценного компонента мелких классов крупности, а центробежные концентраторы имеют низкую эффективность обогащения при сепарации золотовкрапленных руд.

Учитывая, что большую долю всех золоторудных месторождений составляют тонковкрапленные руды, становится актуальным поиск новых и оптимизация известных гравитационных методов обогащения, такого как центробежно-отсадочный, позволяющий с необходимым для дальнейших переработок извлечением выводить свободное и связанное золото в концентрат.

Применение центробежно-отсадочного метода обогащения может быть целесообразно при обработке рудных месторождений в циклах предварительного обогащения, для наработки богатого концентрата для процессов флотации или цианирования и в качестве контрольного обогащения.

Эффективность обогащения центробежно-отсадочным методом в значительной мере зависит от вещественного состава и крупности сепарируемого материала, формы нахождения золота. При этом управлять качеством получаемых продуктов обогащения при центробежно-отсадочном методе возможно лишь при знании закономерностей влияния технических параметров на показатели процесса, а именно правильности выбора значений технических параметров (частоты вращения отсадочной камеры, амплитуды и частоты пульсации подвижного конуса, расхода подрешётной воды) обогатительного аппарата (центробежной отсадочной машины – ЦОМ).

Вопросами обогащения золотосодержащего сырья и других полезных ископаемых методом отсадки в центробежном поле занимались и занимаются многие отечественные и зарубежные исследователи: Маньков В. М., Лодейщиков В. В., Федотов К. В., Kelsey C. G., Cross D. J., Campbell T. P и другие.

Цель работы

Целью работы является определение оптимальных технических параметров центробежно-отсадочного метода обогащения для достижения максимальных показателей извлечения полезных ископаемых в концентрат без проведения натурного эксперимента.

Задачи работы:

– анализ современных тенденций в отсадочном и центробежном методах обогащения;

- теоретическое обоснование возможности интенсификации процесса обогащения золотосодержащей руды и песков методом отсадки в центробежном поле;
- разработка конструкции центробежной отсадочной машины;
- разработка математических моделей с целью выявления влияния параметров процессов отсадки в центробежном поле на технические показатели;
- прогнозирование показателей обогащения при изменении регулируемых технических параметров ЦОМ;
- проведение опытно-промышленных испытаний промышленного образца ЦОМ на продуктах обогащения действующих золотоизвлекательных фабриках (ЗИФ) и разработка рекомендаций для усовершенствования существующих технологических схем обогащения золота;
- разработка предложений по применению технологии обогащения золотосодержащих руд с применением отсадочного метода обогащения в центробежном поле в схеме обогащения ЗИФ с оптимизацией регулируемых технических параметров ЦОМ. Расчёт экономического эффекта от внедрения центробежно-отсадочного обогащения.

Объект исследований

Центробежно-отсадочный метод обогащения.

Предмет исследований

Регулируемые технические параметры центробежной отсадочной машины, такие как длина хода подвижного конуса, частота колебаний подвижного конуса, частота вращения отсадочной камеры, расход подрешётной воды; их взаимозависимость и влияние на показатели обогащения.

Методология и методы исследования

Методология исследований опирается на выявление и использование различий в скоростях свободного падения минералов в стеснённых условиях при увеличении контрастности их удельных весов за счёт наложения центробежных сил. В работе использованы данные лабораторных и полупромышленных исследований на отвальных хвостах обогащения ЗИФ «Покровский рудник» и ЗИФ «Высочайший» с последующей разработкой математических моделей на основе полученных данных, позволяющих прогнозировать значения содержания и извлечения ценного компонента в продуктах обогащения центробежной отсадочной машины при изменении регулируемых технических параметров.

Методы исследований основывались на изучении влияния регулируемых технических параметров на процесс обогащения в центробежной отсадочной машине. Для решения поставленных задач применён метод регрессионного анализа, позволяющий ранжировать регулируемые технические параметры ЦОМ по степени влияния на процесс обогащения.

Содержание золота в продуктах обогащения ЦОМ определялось пробирно-гравиметрическим и пробирно-атомно-абсорбционными методами.

Достоверность и обоснованность результатов исследований подтверждается использованием аттестованных методов анализа, современных программ и средств измерения, методов статистической обработки данных, сходимость опытно-промышленных исследований с результатами математического моделирования.

Научная новизна

1. Установлено, что оптимальные условия сепарации в центробежной отсадочной машине достигаются регулированием значений: центробежной силы (F_c), которая зависит от скорости вращения отсадочной камеры и направлена перпендикулярно к оси вращения отсадочной камеры; противодействующей силы динамического сопротивления среды при стеснённом движении (P), которая возникает посредством создаваемых пульсаций и складывается из частоты (N) и амплитуды (A) возвратно-поступательных колебаний; расхода подрешётной воды (q).

При этом с увеличением центробежной силы извлечение тонких классов золоторудного материала возрастает до определенного предела, после которого происходит избыточное уплотнение отсадочной постели и снижение извлечения золота в концентрат. Для сохранения отсадочной постели в разрыхлённом состоянии необходимо одновременно с увеличением или уменьшением значения F_c соответственно уменьшать или увеличивать значение P .

2. Разработаны регрессионные математические модели, позволившие определить и ранжировать по степени влияния на процесс обогащения регулируемые технические параметры ЦОМ, выявить корреляционные зависимости между ними и прогнозировать значения извлечения золота в концентрат и хвосты ЦОМ при изменении значений технических параметров.

Практическая значимость

1. Расширена область применения гравитационного способа извлечения золота. Показана возможность вовлечения хвостовых продуктов золотоизвлекательных фабрик в технологический процесс. Испытания опытно-промышленной модели центробежной отсадочной машины для обогащения хвостов были проведены на ОАО «Высочайший» и ОАО «Покровский рудник».

2. Доказана высокая эффективность и технологичность центробежно-отсадочного метода извлечения золота из отвальных хвостов в концентрат ЦОМ. Для ЗИФ ОАО «Покровский рудник» извлечение золота в концентрат составило 34,5 % при выходе концентрата 26 % и степени концентрации золота 1,3, а для ЗИФ ОАО «Высочайший» извлечение золота в концентрат составило 35,4 % при выходе концентрата 10,2 % и степени концентрации золота 3,48, что зафиксировано в актах о проведении опытно-промышленных испытаний. Экономически обоснованно применение центробежно-отсадочного метода обогащения при доизвлечении золота из отвальных хвостов действующей ЗИФ «Высочайший» с получением до 35 кг золота в год. Снижение золота в отвальных хвостах составило 0,08 г/т. Расчётный экономический эффект в виде чистой прибыли составит около 80 млн руб. в год.

Разработана, изготовлена и защищена патентом на изобретение модель центробежной отсадочной машины (Патент РФ от 10.10.2011 № 2430784 «Центробежно-отсадочный концентратор»).

Положения, выносимые на защиту

1. Наложение центробежной силы на процесс отсадки увеличивает контрастность между удельными весами зёрен ценного компонента и пустой породы, а возвратно-поступательные движения подвижного днища позволяют поддерживать постель в разрыхлённом состоянии и осуществлять постоянный и ре-

гулируемый вывод в концентрат зёрен ценного компонента мелких классов крупности (менее 0,1 мм).

2. Разработанные математические модели процесса центробежно-отсадочного обогащения в ЦОМ позволяют прогнозировать выход и извлечение золота в концентрат при изменении регулируемых технических параметров ЦОМ.

3. Возможность экономически эффективного дополнительного извлечения золота (до 0,8 %) из хвостовых продуктов золотосульфидных ЗИФ при применении центробежно-отсадочного метода обогащения.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследования, обзоре и анализе патентных и научно-технических литературных источников, организации и проведении каждого этапа исследований, разработке промышленного образца центробежной отсадочной машины и её испытаний на действующей фабрике в промышленных условиях, отборе и обработке проб для анализа, выполнении расчётов, анализе и обобщении полученных результатов, и подготовке публикаций и патента на изобретение (в соавторстве).

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных научно-технических конференциях: «Оборудование и технологии для обогащения рудных и нерудных материалов» (г. Новосибирск, 11-я международная научно-практическая конференция: международное совещание – 2015 г.), «Россыпная добыча. Проблемы и достижения» (г. Иркутск, Технико-экономическое совещание – 2017 г.), «Технико-экономическое совещание по добыче драгоценных и редких металлов и алмазов» (г. Иркутск, Недра Сибири – 2018 г.), «Инновационные процессы комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья» (г. Апатиты, Плаксинские чтения – 2020 г.), международное совещание «Проблемы комплексной и экологически безопасной переработки природного и техногенного минерального сырья» (г. Владикавказ, Плаксинские чтения – 2021 г.), «Технико-экономическое совещание по добыче драгоценных и редких металлов и алмазов» (г. Иркутск, Недра Сибири – 2022 г.), в АО «Иргиредмет» (2024 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 печатных трудов, в том числе 3 статьи в журналах из Перечня изданий, рекомендованных ВАК РФ; имеется 1 патент РФ (№ 2430784 от 10.10.2011), а также публикации в сборниках научных трудов и материалах международных и Всероссийской научно-практических конференций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 102 наименований. Работа изложена на 129 страницах машинописного текста, включает 24 таблицы и 32 рисунка; имеется 3 приложения.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность научному руководителю, доктору технических наук, профессору Федотову Павлу Константиновичу, а также доктору технических наук, профессору Тальгамеру Борису Леонидовичу, главному обогатителю ОАО «Высочайший» Серебренникову Дмитрию Анатольевичу.

Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность диссертации, сформулированы идея работ, цель и задачи исследований, предмет и объект исследований, методология и методы исследований, научная новизна и практическая значимость, представлены защищаемые научные положения, изложены методы исследований, обоснована достоверность научных результатов и приведены данные по их апробации.

В главе 1 проведён анализ литературных источников по теме диссертационной работы. Изучены современное состояние и проблемы теории и практики гравитационного обогащения золотосодержащих руд и песков. Проведён обзор перспективных технологий гравитационных методов обогащения золотосодержащего сырья.

В главе 2 обоснована возможность повышения извлечения золота при применении центробежно-отсадочного метода обогащения, приведены конструкция и принцип действия созданной центробежной отсадочной машины, представлены результаты исследования обогащения золотосодержащих руд методом отсадки в центробежном поле на действующих ЗИФ.

В главе 3 представлены разработанные с применением методов регрессионного анализа математические модели, позволяющие прогнозировать технологические результаты обогащения в ЦОМ при изменении технических параметров работы.

В главе 4 представлены предложения по применению центробежно-отсадочного метода обогащения, в том числе на действующих ЗИФ; на основе полученных данных при проведении исследований на действующих ЗИФ спрогнозированы результаты доизвлечения золота из хвостов ЗИФ «Высочайший» на ЦОМ; экономически обоснована эффективность доизвлечения золота.

В заключении приведены основные выводы и результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы.

Первое защищаемое положение. *Наложение центробежной силы на процесс отсадки увеличивает контрастность между удельными весами зёрен ценного компонента и пустой породы, а возвратно-поступательные движения подвижного днища позволяют осуществлять постоянный и регулируемый вывод в концентрат зёрен ценного компонента мелких классов крупности (менее 0,1 мм).*

Предположено, что на обогащаемый центробежно-отсадочным методом материал будут действовать силы, возникающие в центробежном поле и при стеснённом падении (рисунок 1). Центробежные силы, псевдоповышая массу зёрен, увеличивают контрастность между зёрнами пустой породы и ценного компонента, а сила динамического сопротивления среды при стеснённом падении, которая возникает за счёт создаваемых пульсаций, разрыхляет отсадочную постель до состояния сепарации обогащаемого материала. Для проверки утверждения была разработана, изготовлена, защищена патентом и испытана в промышленных условиях центробежная отсадочная машина. Обогащение материала в ЦОМ происходит по принципам разделения материала в классических диафрагмовых отсадочных машинах. Тяжёлая часть обогащаемого материала проходит через слой искусственной и естественной постели и через сетчатый корпус чаши

выводится из процесса, а лёгкая часть по поверхности постели выводится в сливной жёлоб. Разрыхление естественной и искусственной постели происходит при воздействии на сепарируемую минеральную смесь восходящих и нисходящих пульсаций, создаваемых подвижным конусом машины.

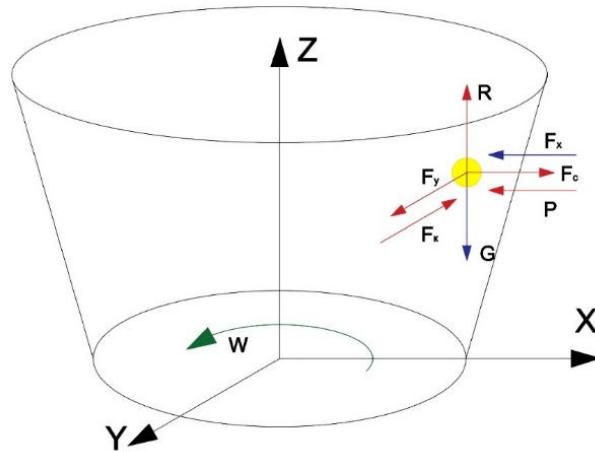


Рисунок 1 – Силы, действующие на зерно, сепарируемое методом отсадки в центробежном поле

Задачей исследования являлось установление влияния режимов работы разработанной центробежно-отсадочной машины на показатели обогащения золотосодержащих руд, песков и хвостов с целью выявления наиболее значимых факторов, установления возможности повышения эффективности обогащения и дальнейшей оптимизации процесса. Выявление указанных зависимостей производилось в опытно-промышленных условиях на действующих предприятиях с одновременным испытанием экспериментального образца центробежно-отсадочной машины (рисунок 2).

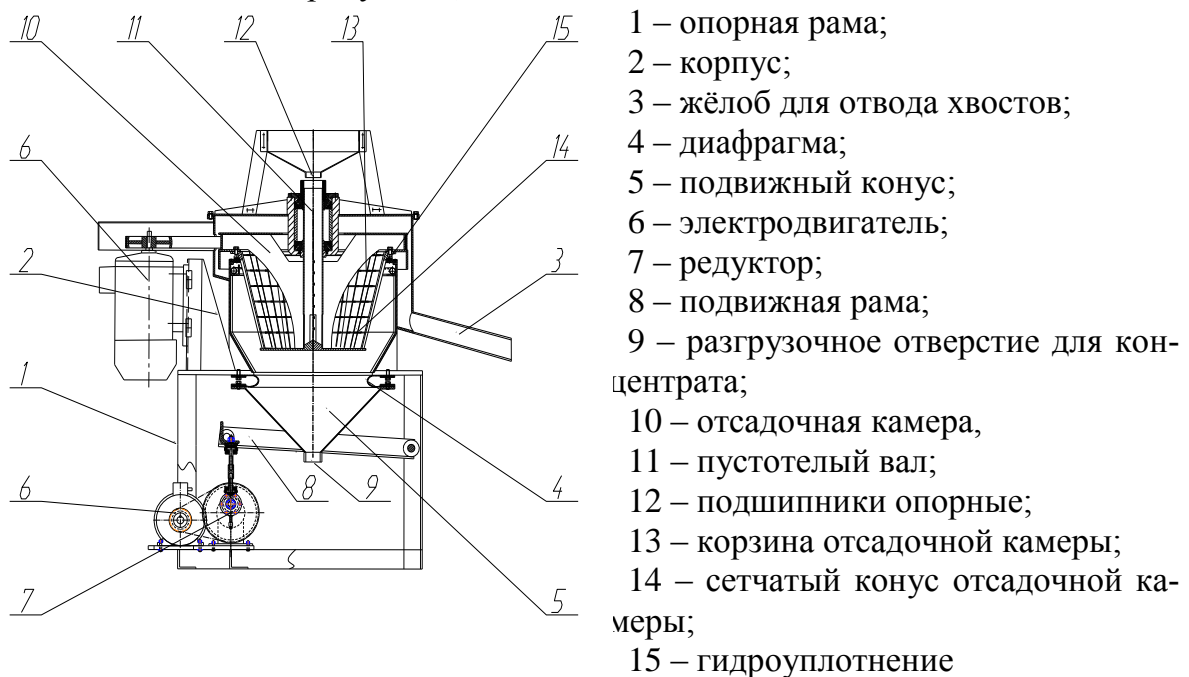


Рисунок 2 – Конструкция ЦОМ

Выявлены и обоснованы значимые факторы, влияющие на процесс обогащения в центробежной отсадочной машине, которые сгруппированы по следующим признакам:

- факторы, учитывающие конструктивные особенности ЦОМ, а именно: отношение Т: Ж в питании; производительность по питанию; удельный расход технологической воды, подаваемой в зону гидроуплотнения;
- факторы, характерные для центробежных концентраторов, а именно: частота вращения отсадочной камеры; центробежная сила;
- факторы, характерные для отсадочных машин, а именно: амплитуда колебаний подвижного конуса; частота хода подвижного конуса; удельный расход подрешётной воды; характеристики искусственной постели (удельный вес, крупность, высота слоя постели).

Установлено, что эффективность сепарации в ЦОМ зависит от регулируемых технических параметров, наиболее значимыми из которых являются: скорость вращения отсадочной камеры, зависящая от величины центробежной силы; амплитуда и частота пульсации подвижного днища.

Для достаточно полного и надёжного извлечения золота крупностью 0,15–0,1 мм должны быть выполнены ряд условий: узкая классификация исходного продукта, оптимальный водный режим, невысокая удельная нагрузка по твёрдому, амплитуда пульсаций подвижного днища 6–10 мм, частота пульсаций не менее 200 раз в минуту.

При сопоставлении результатов обогащения отвальных хвостов ЗИФ № 1 ОАО «Покровский рудник» на центробежном концентраторе СТС-20 (Итомак) и ЦОМ-5 максимальное извлечение золота в концентрат составило 4,1 и 34,5 %, соответственно. Таким образом, можно сделать вывод, что комбинированный центробежно-отсадочный метод обогащения за счёт применения пульсаций при установлении оптимальных настраиваемых технических параметров позволяет более полно извлекать золото в концентрат из отвальных хвостов, чем центробежный метод.

Второе защищаемое положение. *Разработанные математические модели процесса центробежно-отсадочного обогащения в ЦОМ позволяют прогнозировать выход и извлечение золота в концентрат при изменении регулируемых технических параметров ЦОМ.*

Эффективность процесса центробежно-отсадочного обогащения зависит, в том числе, от оптимизации технических параметров ЦОМ, к которым относятся частота вращения отсадочной камеры, амплитуда и частота возвратно-поступательных колебаний подвижного днища и расход подрешётной воды. Ввиду скоротечности физических процессов, возникающих в центробежном поле при сепарации минеральных частиц, считается, что оптимизация параметров обогащения в центробежных аппаратах является одной из самых сложных задач. Одним из основных способов исследования подобного рода результатов наблюдений является построение регрессионных моделей и поиск возможных зависимостей между настраиваемыми параметрами ЦОМ, значениями содержания ценного компонента, выхода концентрата и хвостов обогащения (характеристиками выходных сигналов). Таким образом, для решения данных задач вполне естественным представляется использование метода наименьших

квадратов для поиска функциональных зависимостей между исследуемыми параметрами аппарата и значениями содержания и выхода концентрата и хвостов.

Наличие математической модели для обогатительного аппарата или процесса играет особую роль не только на стадии эксплуатации, но и при проведении научно-исследовательских и проектных работ и позволяет прогнозировать наилучшие показатели обогащения (содержание и извлечение ценного компонента в продукты обогащения) путём определения оптимальных регулируемых параметров оборудования без проведения большого числа натуральных экспериментов.

В разработанных и сравниваемых математических моделях основными показателями процесса обогащения являются содержание и извлечение ценного компонента в концентрат, которые определяются в зависимости от изменения регулируемых параметров ЦОМ.

При обогащении материала в ЦОМ на получаемые значения содержания и извлечения золота в концентрат и хвосты (y_1 и y_2) кроме регулируемых технологических параметров (x_{1-4}) влияют и другие факторы, например, характеристики исходного питания, крупность и высота искусственной постели ЦОМ, удельная нагрузка по твёрдому и пульпе и др. В данном случае в уравнения регрессий включают только основные регулируемые технологические параметры ЦОМ, остальные принимаются как постоянные.

В таблице 1 приведены результаты исследований, принятые для построения математических моделей.

Таблица 1 – Результаты испытаний ЦОМ на ЗИФ «Покровский рудник (1) и ЗИФ «Высочайший» (2).

| ЗИФ | Модель по содержанию ценного компонента | | Модель по извлечению ценного компонента | | Частота вращения отсасывочной камеры, мин ⁻¹ , x_1 | Частота колебаний подвижного конуса, мин ⁻¹ , x_2 | Длина хода подвижного конуса, мм, x_3 | Расход подрешётной воды, м ³ /ч, x_4 |
|-----|--|--|---|-------------------------------------|---|--|---|---|
| | Содержание Au в концентрате (y_1), г/т | Содержание Au в хвостах (y_2), г/т | Извлечение Au в концентрат (y_1), % | Извлечение Au в хвосты (y_2), % | | | | |
| 1 | 0,68 | 0,63 | 12,5 | 87,5 | 95 | 200 | 18 | 10 |
| | 0,78 | 0,7 | 5,9 | 94,1 | 85 | 200 | 24 | 10 |
| | 0,88 | 0,63 | 15,9 | 84,1 | 115 | 200 | 12 | 10 |
| | 0,92 | 0,65 | 25,9 | 74,1 | 125 | 200 | 12 | 10 |
| | 2,2 | 1,3 | 19,3 | 80,7 | 150 | 200 | 9 | 5 |
| | 1,04 | 0,71 | 20,4 | 79,6 | 150 | 200 | 12 | 10 |
| | 0,9 | 0,6 | 20,1 | 79,9 | 150 | 240 | 12 | 7 |
| | 1,21 | 0,82 | 29,9 | 70,1 | 150 | 300 | 14 | 10 |

Окончание таблицы 1

| ЗИФ | Модель по содержанию ценного компонента | | Модель по извлечению ценного компонента | | Частота вращения отсадочной камеры, мин ⁻¹ , X ₁ | Частота колебаний подвижного конуса, мин ⁻¹ , X ₂ | Длина хода подвижного конуса, мм, X ₃ | Расход подрешётной воды, м ³ /ч, X ₄ |
|-----|--|--|---|---|--|---|--|--|
| | Содержание Au в концентрате (y ₁), г/т | Содержание Au в хвостах (y ₂), г/т | Извлечение Au в концентрат (y ₁), % | Извлечение Au в хвосты (y ₂), % | | | | |
| | 1,23 | 0,86 | 31,1 | 68,9 | 150 | 300 | 14 | 10 |
| | 0,9 | 0,6 | 17,5 | 82,5 | 175 | 200 | 12 | 7 |
| | 2,2 | 0,8 | 20,1 | 79,9 | 175 | 250 | 9 | 5 |
| | 1,07 | 0,72 | 28,6 | 71,4 | 200 | 240 | 14 | 10 |
| | 1,3 | 0,5 | 26,5 | 73,5 | 200 | 280 | 9 | 5 |
| | 2,56 | 1,72 | 18,1 | 81,9 | 220 | 240 | 12 | 7 |
| | 2,64 | 1,3 | 22,3 | 77,7 | 220 | 240 | 12 | 7 |
| 2 | 0,78 | 0,7 | 5,54 | 94,46 | 85 | 200 | 24 | 10 |
| | 0,68 | 0,63 | 12,83 | 87,17 | 95 | 200 | 18 | 10 |
| | 0,73 | 0,68 | 12,77 | 87,23 | 105 | 200 | 12 | 10 |
| | 0,88 | 0,63 | 16 | 84 | 115 | 200 | 12 | 10 |
| | 0,92 | 0,86 | 21,1 | 78,9 | 125 | 200 | 12 | 10 |
| | 1,04 | 0,71 | 27,55 | 72,45 | 150 | 240 | 12 | 10 |
| | 1,21 | 0,82 | 29,76 | 70,24 | 150 | 300 | 12 | 14 |
| | 0,98 | 0,86 | 26,64 | 73,36 | 150 | 300 | 12 | 14 |
| | 1,07 | 0,72 | 34,3 | 65,7 | 200 | 240 | 12 | 14 |

Для большей адаптивности линейной регрессии и минимизации средне-квадратичной ошибки целесообразно включение в уравнения максимального количества экспериментальных данных из таблицы 1. Однако в этом случае модели будут идеально определять y_1 и y_2 только для указанного в таблице массива данных. При получении новых данных содержания и извлечения могут существенно отличаться от прогнозируемых значений.

Исходя из этого, исходный массив случайным образом разделен на две части. На одной из них осуществлялось построение модели, на второй – проверка на адекватность.

Конструирование регрессионной модели осуществлялось в виде упрощённого ряда Винера, общая формула которого может быть представлена в виде:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^4 b_i x_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=i}^l b_{ij} x_i x_j, \quad (1)$$

где k , l определяют порядок модели.

Обработка результатов испытаний осуществлялась по представленному следующему алгоритму (рисунок 3).

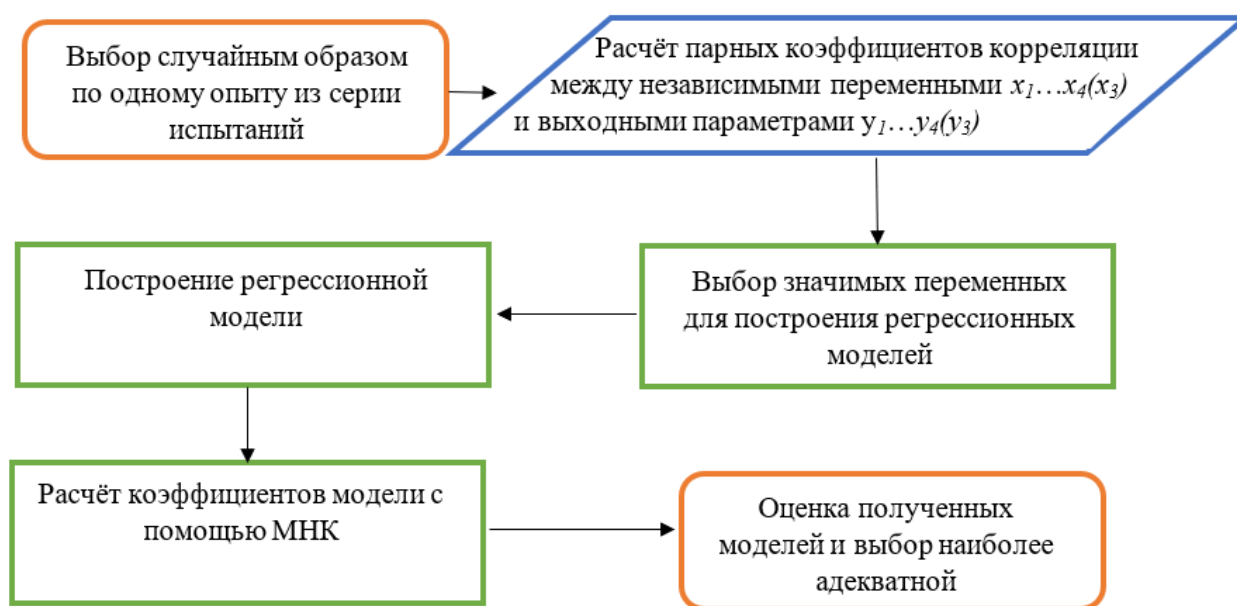


Рисунок 3 – Алгоритм обработки результатов испытаний

Конечный результат представленного алгоритма – уравнение регрессии для модели по содержанию с минимальным значением критерия $I = 0,92$:

$$y_1 = 1,18 + 12,49x_1 + 3x_2 - 17,8x_3 + 1,25x_4 - 2,68x_1x_2 - 1,64x_1x_3 - 8,72x_1x_4 + 15,53x_2x_3 - 3,0x_2x_4 + 6,75x_3x_4 - 1,66x_1^2 - 10,15x_2^2 - 0,51x_3^2 + 5,21x_4^2 \quad (2)$$

При этом $R^2 = 0,99$, что говорит о высоком качестве полученной модели.

Уравнение регрессии для модели по извлечению:

$$y_1 = 0,74 + 1,38x_1 + 0,27x_2 + 1,14x_3 - 1,24x_1^2 + 1,94x_1x_2 - 0,27x_2^2 - 0,47x_1x_3 + 1,31x_2x_3 - 0,26x_3^2 \quad (3)$$

При этом $R^2 = 0,92$, что говорит о высоком качестве полученной модели.

Из итогового уравнения регрессии по извлечению видно, что процесс эффективности обогащения в ЦОМ не зависит от переменной x_4 (расход подрешётной воды), что соответствует данным корреляционного анализа (коэффициент $r_{x_4y_1} = 0,274$).

Определено, что значения большей части вероятностей меньше 0,05, что говорит о значимости полученных коэффициентов уравнения регрессии.

В процессе конструирования регрессионных моделей удалось определить и ранжировать регулируемые технические параметры по степени влияния на процесс обогащения в ЦОМ от 1 до 3. Так, в модели по содержанию настраиваемые параметры распределились следующим образом:

1 – длина хода подвижного конуса, при этом данная зависимость носит обратно пропорциональный характер: чем больше длина хода подвижного конуса, тем меньше степень концентрации;

2 – произведение частоты колебаний подвижного конуса и длины хода подвижного конуса, что говорит о взаимозависимости данных параметров;

3 – частота вращения отсадочной камеры, которая входит в уравнение регрессии с положительным коэффициентом.

В модели по извлечению:

1 – частота вращения отсадочной камеры, при этом данная зависимость носит прямо пропорциональный характер;

2 – произведение частоты колебаний подвижного конуса и частоты вращения отсадочной камеры;

3 – длина хода подвижного конуса, которая входит в уравнение регрессии с положительным коэффициентом.

В обеих математических моделях расход подрешётной воды не оказывает влияние на процесс обогащения в ЦОМ.

Парные коэффициенты корреляции – менее 0,5, что свидетельствует о нелинейности зависимостей между исследуемыми регулируемые техническими параметрами.

Прогнозируются следующие оптимальные регулируемые параметры ЦОМ: частота вращения отсадочной камеры – 240 мин⁻¹, частота колебаний подвижного днища – 300 мин⁻¹, амплитуда колебаний подвижного днища – 7,2 мм, извлечение золота в концентрат из отвальных хвостов – 39,2 %.

Третье защищаемое положение. *Возможность экономически эффективного дополнительного извлечения золота из хвостовых продуктов золото-сульфидных ЗИФ при применении центробежно-отсадочного метода обогащения.*

На основании проведённого математического моделирования, показавшего оптимальные условия применения ЦОМ, включая требования к исходному питанию и условиям эксплуатации, а также на основе результатов комплекса исследований разработанной ЦОМ в условиях действующих фабрик, установлено, что центробежная отсадочная машина может быть применена в различных технологических переделах на обогатительных фабриках, шлиходоводочных установках, драгах, при извлечении платины, олова, никеля, а также железной руды, неблагородных металлов, хромитов, циркона, ильменита, угля и др. Наиболее рациональными технологическими переделами для применения ЦОМ являются:

1 – на золотоизвлекательных фабриках: контрольное обогащение сливов и пересортировка песков гидроциклонов и спиральных классификаторов, предварительное обогащение исходного питания флотации, концентрационных столов и материала разгрузки мельниц крупностью 10 мм;

2 – на береговых обогатительных фабриках и драгах: доводка золотосодержащих концентратов, пересортировка концентратов отсадочных машины;

3 – при обогащении угля, переработке титаносодержащих песков, железной руды: обогащение мелких классов.

На опытно-промышленном образце ЦОМ были проведены натурные испытания на ЗИФ.

При испытаниях в промышленных условиях на ЗИФ исходным питанием являлся труднообогащаемый материал с неблагоприятным вещественным составом – отвальные хвосты технологической схемы ЗИФ крупностью 79–83 % фракции минус 0,074 мм. Среднее содержание золота за время проведения исследований составило 0,38 г/т. Учитывая, что исходная руда проходит многостадийное дробление и обогащение, а также процесс цианирования, можно утверждать, что в хвостах ЗИФ свободного золота нет.

При помощи математической модели прогнозируются следующие оптимальные регулируемые параметры ЦОМ: частота вращения отсадочной камеры – 240 мин⁻¹, частота колебаний подвижного днища – 300 мин⁻¹, амплитуда колебаний подвижного днища – 7,2 мм, извлечение золота в концентрат из отвальных хвостов – 35,2 %.

Используя полученные при помощи математического моделирования технологические показатели, произведены расчёты балансов выходов продуктов обогащения и извлечения золота из отвальных хвостовых продуктов ЗИФ «Высочайший» по двум технологическим схемам (рисунок 4).

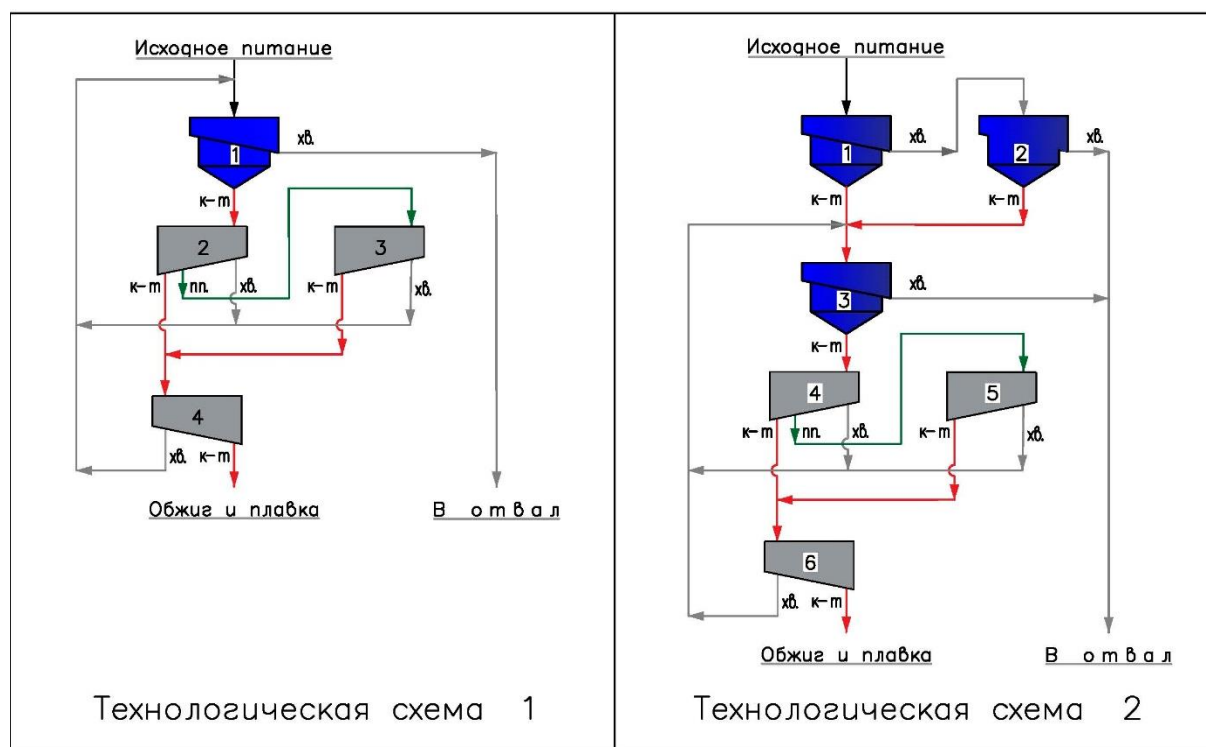


Рисунок 4 – Варианты технологических схем применения ЦОМ на ЗИФ «Высочайший»

Вариант 1 подразумевает применение ЦОМ только в основной операции доизвлечения золота. Для его реализации необходимо следующее оборудование:

- центробежная отсадочная машина ЦОМ-5 – 10 шт.;

- стол концентрационный ВУ 4500x1800 – 35 шт.;
- стол концентрационный ВУ 2100x1050 – 2 шт.;
- стол концентрационный ВУ 1050x500 – 1 шт.;
- строительный объём дополнительного цеха гравитационного обогащения – 5400 м³.

В варианте 2 ЦОМ применяется в качестве основного и перечистного аппарата. Перечень оборудования для варианта 2:

- центробежная отсадочная машина основного обогащения ЦОМ-5 – 10 шт.;
- центробежная отсадочная контрольного обогащения машина ЦОМ-5 – 9 шт.;
- перечистная центробежная отсадочная машина ЦОМ-5 – 2 шт.;
- стол концентрационный ВУ 4500x1800 – 8 шт.;
- стол концентрационный ВУ 2100x1050 – 1 шт.;
- стол концентрационный ВУ 1050x500 – 1 шт.;
- строительный объём дополнительного цеха гравитационного обогащения – 1500 м³.

В расчёт принято спрогнозированное извлечение золота в концентрат ЦОМ 39,2 %.

В таблицах 2 и 3 приведены расчёты притока реальных денежных средств за период освоения и эксплуатации нового, вновь возводимого, гравитационного цеха.

Таблица 2 – Техничко-экономические показатели внедрения ЦОМ

| Показатель | Вариант схемы | |
|---|----------------|----------------|
| | I | II |
| Питание ЦОМ, т/год | 912 518,10 | 912 518,10 |
| Среднее содержание Au в руде, г/т | 0,38 | 0,38 |
| Сквозное доизвлечение Au, % | 9,39 | 9,17 |
| Товарное Au, г | 32 560,47 | 31 797,61 |
| Цена товарного Au, руб/г. | 4 254,90 | 4 254,90 |
| Выручка от реализации Au, руб. | 138 541 547,39 | 135 295 632,55 |
| Эксплуатационные затраты (без амортизации), руб | 43 205 540,19 | 36 490 128,28 |
| - ФОТ рабочих по переделу | 9 600 000,00 | 4 800 000,00 |
| - страховые взносы (30 % от ФОТ) | 2 880 000,00 | 1 440 000,00 |
| - электроэнергия | 4 865 526,09 | 7 486 838,10 |
| - содержание и ремонт оборудования | 12 599 575,30 | 10 332 000,00 |
| - прочие цеховые и прочие | 2 994 510,14 | 2 405 883,81 |
| - затраты на аффинаж | 2 078 123,21 | 2 029 434,49 |

Окончание таблицы 2

| Показатель | Вариант схемы | |
|---|---------------|---------------|
| | I | II |
| - НДСИ | 8 187 805,45 | 7 995 971,88 |
| Амортизация ОС, руб. | 7 897 939,10 | 4 484 084,67 |
| Полные эксплуатационные затраты, руб. | 51 103 479,29 | 40 974 212,95 |
| Валовая прибыль | 87 438 068,10 | 94 321 419,60 |
| Налог на имущество (2,2 %) | 1 220 366,62 | 343 227,94 |
| Налог на прибыль (20 %) | 17 243 540,30 | 18 795 638,33 |
| Чистая прибыль | 68 974 161,19 | 75 182 553,33 |
| Сальдо от операционной деятельности, руб. | 76 872 100,29 | 79 666 637,99 |

Таблица 3 – Показатели инвестиционной деятельности

| Показатель | Вариант схемы | |
|------------------------------------|---------------|---------------|
| | I | II |
| Капитальные вложения, руб, в т. ч: | 97 469 794,33 | 50 041 270,00 |
| - строительство корпуса | 55 471 210,00 | 15 601 270,00 |
| - оборудование | 41 998 584,33 | 34 440 000,00 |
| Окупаемость, лет | 1,41 | 0,67 |

Как видно из данных таблицы 3, несмотря на более полное извлечение золота при применении ЦОМ, только в основной операции обогащения с перечисткой его концентратов на концентрационном столе (вариант 1), экономически целесообразно осуществлять доизвлечение золота из хвостовых продуктов ЗИФ с применением ЦОМ в основной, контрольной и перечистой операциях (вариант 2) с плавкой конечного концентрата в существующей плавильне ЗИФ.

Применение центробежно-отсадочного метода обогащения при извлечении золота, в том числе в сростках, может быть целесообразно даже на отвальных хвостах гравитации ЗИФ. Расчётное доизвлечение золота на ЗИФ «Высочайший» может составить 92,12 г в сутки. Окупаемость вновь возводимого цеха гравитационного обогащения – менее 9 месяцев.

Центробежно-отсадочный метод экономически эффективен при извлечении золота как средних и мелких классов крупности, так и золота в сульфидах для наработки концентрата для последующего цианирования или флотации, при обогащении полезного ископаемого, переработка которого возможна гравитационными методами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе предложено новое решение актуальной научно-практической задачи повышения полноты извлечения золота, заключающееся в научном обосновании и разработке эффективных технологических режимов извлечения золота методом отсадки в центробежном поле. Основные научные и практические результаты заключаются в следующем:

1. Расширена область применения метода отсадки в центробежном поле для извлечения золота, который позволяет за счёт комбинации сил, действующих на обогащаемый материал в условиях стеснённого падения, и наложения центробежного поля эффективно извлекать в концентрат частицы полезного ископаемого средних и мелких классов крупности с возможностью постоянного его вывода.

2. Разработана, изготовлена и защищена патентом на изобретение модель центробежного отсадочного концентратора (Патент РФ от 10.10.2011 № 2430784).

3. Теоретически обоснована и экспериментально доказана эффективность применения обогащения методом отсадки в центробежном поле при переработке хвостовых продуктов ЗИФ.

4. Наложением на центробежное поле возвратно-поступательных колебаний позволяет осуществлять непрерывный и регулируемый выход концентрата.

5. Выявлены значимые конструктивные и регулируемые технические параметры работы ЦОМ. Теоретически обоснованы степени влияния настраиваемых технических параметров (частота вращения отсадочной камеры, амплитуда и частоты пульсации подвижного днища, расход подрешётной воды) на показатели извлечения золота и его содержания в концентрате.

6. Проведён комплекс исследовательских работ и испытаний центробежной отсадочной машины в заводских условиях, на ЗИФ «Покровский рудник» и ЗИФ «Высочайший». Опытно-промышленные исследования, проведённые на ЗИФ ОАО «Покровский рудник», показали наибольшее извлечение золота в концентрат ЦОМ на уровне 34,5 % при выходе концентрата 26 % и степени концентрации золота 1,3. Исследования на ЗИФ ОАО «Высочайший» проводились после модернизации конструкции аппарата ЦОМ. Наиболее важные изменения были внесены в устройство подачи подрешётной воды в корпус аппарата. Была внедрена шеститочная, тангенциальная подача в зону гидроуплотнения. При этом максимальное извлечение золота в концентрат ЦОМ составило 35,4 % при выходе концентрата 10,2 % и степени концентрации золота 3,48.

7. Разработаны две математические модели, позволяющие спрогнозировать содержание и извлечение золота в концентрат центробежной отсадочной машины за счёт оптимизации регулируемых технических режимов работы ЦОМ.

8. Определены и ранжированы регулируемые технические параметры по степени влияния на процесс обогащения в ЦОМ. Для модели по содержанию это:

— длина хода подвижного конуса, при этом данная зависимость носит обратно пропорциональный характер: чем больше длина хода подвижного конуса, тем меньше степень концентрации;

- произведение частоты колебаний подвижного конуса и длины хода подвижного конуса, что говорит о взаимозависимости данных параметров;
- частота вращения отсадочной камеры, которая входит в уравнение регрессии с положительным коэффициентом.

В модели по извлечению:

- частота вращения отсадочной камеры, при этом данная зависимость носит прямо пропорциональный характер;
- произведение частоты колебаний подвижного конуса и частоты вращения отсадочной камеры;
- длина хода подвижного конуса, которая входит в уравнение регрессии с положительным коэффициентом.

В обеих математических моделях расход подрешётной воды не оказывает влияние на процесс обогащения в ЦОМ.

В результате выполненных опытно-промышленных исследований и по спрогнозированному значению извлечения золота в концентрат при обогащении хвостовых продуктов ЗИФ «Высочайший» показана эффективность применения отсадочного метода обогащения в центробежном поле с получением дополнительно до 35 кг золота в год и снижением золота в отвальных хвостах до 0,3 г/т.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы. Разработанные математические модели и варианты технологических схем применения ЦОМ на ЗИФ, после определенной адаптации, возможно использовать при проектировании новых и реконструкции действующих ЗИФ обогащение сырья которых возможно центробежно-отсадочным методом. Дальнейшие исследования в рамках этой тематики могут быть направлены на изучения влияния и свойств отсадочной постели ЦОМ на технологические показатели обогащения.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи из Перечня изданий, рекомендованных ВАК РФ

1. **Лучко, М.С.** Исследование влияния технологических параметров на обогащение золотосодержащего сырья в центробежной отсадочной машине / **М.С. Лучко, П.К. Федотов** // Обогащение руд. – 2022. – № 1. – С. 21–26.
2. **Лучко, М.С.** Применение центробежной отсадочной машины для контрольного обогащения золотосодержащего сырья на ЗИФ / **М.С. Лучко** // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2022. – № 4. – С. 67–75.
3. **Лучко, М.С.** Построение и сравнение регрессионных моделей обогащения золотосодержащего сырья в центробежной отсадочной машине / **М.С. Лучко, П.К. Федотов, Н.Д. Лукьянов** // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2022. – № 1. – С. 31–39.

Патент

4. Пат. № 2430784. Российская Федерация, В03В 5/32, В03В 5/10 (2006.00). Центробежно-отсадочный концентратор / Маньков В.М., **Лучко М.С.**, Патрин С.А.; заявитель и патентообладатель ОАО «Иргиредмет», № заявки 2009149427/03, заявл. 29.12.2009; опубл. 10.10.2011. Бюл. № 28.

Статьи в других изданиях

5. **Лучко, М.С.** Новое оборудование для золотодобывающей промышленности / **М.С. Лучко, С.А. Патрин** // Золотодобыча. – 2014. – № 6. – С. 16–19.
6. **Лучко, М.С.** Испытания в промышленных условиях центробежной отсадочной машины для гравитационного обогащения руд цветных и благородных металлов / **М.С. Лучко, П.К. Федотов** // Науки о Земле. – 2019. – № 3. – С. 349–357.
7. **Лучко, М.С.** Определение технологических параметров, влияющих на интенсификацию обогащения золотосодержащих руд методом отсадки в центробежном поле / **М.С. Лучко, П.К. Федотов** // Инновационные процессы комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья: материалы междунар. совещ. «Плаксинские чтения-2020» (г. Апатиты, 21–26 сентября 2020 г.). – Апатиты, 2020. – С. 250–252.
8. **Лучко, М.С.** Применение инструментов статистического анализа для обработки данных обогащения золотосодержащего сырья методом отсадки в центробежном поле / **М.С. Лучко, П.К. Федотов, Н.Д. Лукьянов** // Проблемы комплексной и экологически безопасной переработки природного и техногенного минерального сырья: материалы междунар. совещ. «Плаксинские чтения-2021» (г. Владикавказ, 04–08 октября 2021 г.). – Владикавказ, 2021. – С. 250–252.
9. **Лучко, М.С.** Применение центробежной отсадочной машины для обогащения минерального сырья на ЗИФ / **М.С. Лучко** // Развитие горнодобывающей промышленности в современных условиях: материалы технико-экономического совещания «Недра Сибири-2022» (г. Иркутск, 30 ноября – 01 декабря 2022 г.). – Иркутск, 2022. – С. 196–200.
10. **Лучко, М.С.** Обогащение полезных ископаемых методом отсадки в центробежном поле. Центробежно-отсадочная машина конструкции АО «Иргиредмет» / **М.С. Лучко** // Сборник научных трудов «Анализ, добыча и переработка полезных ископаемых» (посвящен 150-летию института Иргиредмет). – 2022. – С. 110–119.

Подписано в печать 21.03.2024. Формат 60 x 90 / 16.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 1,25.
Тираж 100 экз. Зак.18. Поз. плана 2н.
Отпечатано в типографии Издательства
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83