

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
**ЯКУТСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР**  
**СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ**  
**РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**  
**(ЯНЦ СО РАН)**

ул. Петровского, д. 2, Якутск, 677980 Для телеграмм:  
Якутск, НАУКА Факс (4112) 350263, 390525  
Телефон (4112) 390500, 390503

E-mail: [prezidium@prez.vsn.ru](mailto:prezidium@prez.vsn.ru)

26.05.2025 № 297-01-2115/192

**УТВЕРЖДАЮ**

Зам. генерального директора по  
науке ЯНЦ СО РАН, д.т.н.

«*26*» *мая* 2025 г. *Шиц Е.Ю.*



**ОТЗЫВ**  
**ведущей организации**

Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр  
Сибирского отделения Российской академии наук»  
на диссертационную работу **Сенченко Аркадия Евгеньевича**  
«Повышение эффективности сепарации золотосодержащего сырья в  
центробежных безнапорных концентраторах», представленную на соискание  
ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 2.8.9. «Обогащение полезных ископаемых»

**Актуальность для науки и практики.**

Эффективное применение гравитационных методов обогащения для различных типов сырья, в том числе золоторудного, требует в настоящее время совершенствования работы аппаратов в направлении повышения сепарационных характеристик и реализации возможности снижения предела крупности разделяемых минералов. Это связано с усложнением состава руд, необходимостью вовлечения в процессы переработки труднообогатимых руд и песков, а также текущих и лежалых хвостов обогатительных фабрик.

Теоретическое обоснование процессов разделения в аппаратах гравитационного обогащения позволит подобрать оптимальные режимные параметры и усовершенствовать конструкции самих аппаратов.

Особенно значимой данная задача представляется для центробежных концентраторов. Центробежные концентраторы в последние годы стали широко применяться на обогатительных фабриках при переработке различных типов сырья. В настоящее время теоретические разработки ученых позволили обосновать классифицирующий и сегрегационный механизмы разделения частиц в центробежных сепараторах, предложить формулы для расчета

траекторий движения частиц в центробежном поле, что в конечном счете привело к разработке различных конструкций сепараторов. Однако остается значительный ряд вопросов, в части объяснения механизма, происходящих в конусе сепаратора процессов разделения и влияния на их эффективность, которые требуют теоретического обоснования.

Так, известно малое количество работ, в которых проводится теоретический анализ эффективности различных способов разрыхления минеральной постели в рабочем конусе центробежных концентраторов. Теоретически не обоснована эффективность повышения сепарационных характеристик центробежного обогащения за счет использования разных способов подачи флюидизационной воды в сепаратор.

В связи с этим, данная диссертационная работа, в которой представлены результаты исследований в области изучения механизма разделения частиц в центробежном поле, доказывающие, 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, является весьма актуальной.

### **Содержание диссертационной 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.

Во введении рассмотрена актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна, теоретическая значимость, представлены выносимые на защиту положения.

В первой главе приведен обзор и анализ современного состояния теории и практики центробежного обогащения. Проведен анализ способов разрыхления минерального слоя в кольцевых ячейках сепараторов. Анализ выявил необходимость и показал возможность совершенствования процесса центробежной сепарации с учетом гидродинамики. Предложен новый способ подачи флюидизационной воды в рабочую камеру концентратора. Намечены основные направления исследований.

Во второй главе представлено теоретическое обоснование нового комбинированного способа подачи флюидизационной воды через наружную стенку рабочего конуса сепаратора и на этой основе определены оптимальные параметры потока пульсирующей воды для центробежного сепаратора.

В третьей главе описано устройство для реализации нового способа подачи флюидизационной воды, разработанное для проведения лабораторных исследований на сепараторах Knelson KC MD-3 и KC MD-7.5 и представлены результаты, подтверждающие активизирующее влияние комбинированного

способа подачи флюидизационной воды на перемещение тяжелых минералов вглубь минеральной постели рабочего конуса, теоретически обоснованное ранее в диссертации.

В четвертой главе приведены результаты практической проверки эффективности нового способа, а именно организации дополнительного пульсационного потока флюидизационной воды к постоянно подаваемому потоку. Работа приведена на примере лабораторных исследований на пробах лежалых хвостах золотосодержащей руды месторождения Бадран.

В пятой главе приведены результаты полупромышленных испытаний нового способа подачи флюидизационной воды, проведенные на золотоизвлекательной фабрике «Бадран».

**Заключение** содержит краткие результаты проведенных исследований.

### **Новизна исследований, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.**

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

Теоретически обоснована и экспериментально доказана возможность повышения эффективности сепарационных процессов в минеральной постели рабочего конуса центробежного сепаратора за счет нового способа подачи флюидизационной воды в центробежный сепаратор, который предусматривает сочетание постоянного потока жидкости, поддерживающего минеральную постель на грани ожигения, и пульсирующего потока жидкости, периодически переводящих постель во взвешенное состояние и способствующих перемещению и накоплению тяжелых частиц внутри кольцевой ячейки разделительного конуса и выносу легких частиц за ее пределы (перечистки). Таким образом, 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 эффективному накоплению частиц с высоким удельным весом в минеральной постели рабочего конуса центробежного сепаратора, повышает содержание и извлечение ценных компонентов в гравитационный концентрат.

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). Пульсирующая составляющая потока флюидизационной воды обеспечивает изменение разрыхленности минеральной постели в заданном диапазоне.

### **Достоверность и обоснованность результатов исследований.**

Достоверность и обоснованность результатов подтверждается корректностью постановки задач, использованием современных методов исследования, в том числе в аккредитованных лабораториях, сходимостью результатов лабораторных и опытно-промышленных исследований с результатами теоретического исследования и математического моделирования.

### **Значимость для науки и производства (практики) полученных автором диссертации результатов.**

Значимость полученных автором диссертации результатов для развития соответствующей отрасли науки заключается в возможности значительного повышения эффективности центробежного обогащения руд, в том числе, труднообогащаемых, текущих и лежалых хвостов обогатительных фабрик за счет разработанного теоретически обоснованного и подтвержденного на практике автором диссертации способа управления подачей флюидизационной воды в центробежный концентратор, предусматривающего сочетание постоянного и пульсирующего потоков.

На новый способ подачи флюидизационной воды в рабочий конус центробежного сепаратора получен патент Российской Федерации на изобретение № RU 2321461.

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 % (Акт о проведении полупромышленных испытаний от 15.01.2024).

Разработана, изготовлена и защищена патентом Российской Федерации на изобретение № RU 2278735 новая конфигурация внутренней поверхности рабочего конуса центробежного сепаратора.

### **Личный вклад автора.**

Следует отметить личный вклад автора на протяжении всего периода работы над диссертацией, заключающийся 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

### **Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.**

Результаты диссертационной работы могут быть использованы:

- при проектировании, реконструкции и строительстве обогатительных фабрик для широкого спектра руд (включая руды благородных металлов), в том числе для вовлечения в переработку хвостов обогащения на действующих обогатительных, в том числе золотоизвлекательных фабриках;
- при подготовке специалистов в области обогащения полезных ископаемых (в учебном процессе);
- при выполнении научных исследований по совершенствованию и разработке гравитационных процессов обогащения минерального сырья.

### **Апробация результатов исследования.**

Основные положения диссертационной работы достаточно широко апробированы на Всероссийских и международных научно-технических конференциях, на протяжении длительного периода времени: 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.).

### **Замечания по диссертационной работе:**

1. Приведенные и выведенные формулы расчетов траектории движения частиц не учитывают сегрегационный механизм взаимодействия (глава 2, стр. 58) частиц друг с другом, и возможности переориентации частиц

неправильной формы на потоках при разных фазах разрыхления, что является очень сложным процессом. Сложность процесса существенно выше для деления частиц чешуйчатой (пластинчатой) формы, на примере золота. Скорость витания ( $W$  вит) на странице 94, скорей всего верна только для частиц с условной средней крупностью.

## 2. Отсутствие повторяемости лабораторных экспериментов.

Во всех лабораторных исследованиях (глава 4, стр. 128–141) при варьировании режимов подачи флюидизационной воды (частота пульсаций, мгновенный и средний расход) приводится только один результат на каждую точку. Например, в таблицах 4.5 и 4.6 для каждой частоты (20, 60, 100, 140 пульс/мин) или расхода (1–5 л/мин) приведены значения содержания и извлечения золота, полученные, по всей видимости, из одного опыта. Какова статистика экспериментальных исследований и уровень воспроизводимости получаемых результатов, что связано с их надежностью.

3. Оценка эффективности полупромышленных испытаний производится не на конкретных результатах испытания аппарата (вход и выход), а по общим фабричным данным.

На страницах 153–154 автор прямо указывает, что отбор проб концентрата не проводился непосредственно на выходе экспериментального концентратора, работавшего в режиме комбинированной подачи флюидизационной воды, из-за технических ограничений. Вместо этого эффективность оценивалась по данным ОТК всей золотоизвлекательной фабрики, при этом второй концентратор работал в обычном режиме. Это значит, что оценка результатов происходила по объединённому продукту обоих вариантов гравитационного обогащения, без уточнения эффекта реализованного режима пульсации. Это напрямую связано надежностью экспериментального подтверждения повышения извлечения золота в полупромышленных условиях, поскольку изменение в результатах может быть связано какими-то другими факторами.

## 4. Не исследовано влияние крупности руды на эффективность процесса.

Несмотря на то, что в таблицах 2.1–2.4 (стр. 91–93) приводятся данные о гранулометрическом составе различных проб руды (с разной крупностью – до 2 мм, 0,5 мм, 0,071 мм и др.), в основной экспериментальной части (глава 4) не рассматривается как именно влияет изменение крупности питания на эффективность сепарации. Все ключевые эксперименты выполнены при одной и той же степени измельчения ( $R_{80} = 320$  мкм), и не проводится сравнение результатов при других классах крупности. Это снижает доказательную часть работы по эффективности действия пульсационной подачи воды, поскольку это может сильно зависеть от размера частиц, где поведение мелких и крупных фракций в потоке существенно различаются.

Отмеченные замечания имеют частично дискуссионный характер и не снижают общую положительную оценку теоретических и практических

результатов диссертационной работы.

Полученные автором результаты и выводы полностью приведены в тексте диссертационной работы и в автореферате, который отражает основные положения диссертации.

Основные положения исследований отражены в 27 печатных трудах, в том числе в 11 статьях в журналах из Перечня изданий, рекомендованных ВАК Российской Федерации, имеется 2 патента Российской Федерации, а также публикации в сборниках научных трудов и материалах международных и Всероссийских научно-практических конференций.

### **Заключение.**

Диссертационная работа «Повышение эффективности сепарации золотосодержащего сырья в центробежных безнапорных концентраторах» является законченной научно-квалификационной работой, содержащей новые научно обоснованные технические и технологические решения актуальной научно-практической задачи повышения эффективности работы центробежных концентраторов, заключающиеся в теоретическом обосновании и разработке нового флюидизационного способа разрыхления минеральной постели в рабочем конусе центробежного концентратора.

Диссертация соответствует критериям, установленным пунктами 9-14 Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842 (в действующей редакции), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, и паспорту специальности 2.8.9 «Обогащение полезных ископаемых», а ее автор Сенченко Аркадий Евгеньевич заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.8.9 «Обогащение полезных ископаемых».

Диссертационная работа Сенченко Аркадия Евгеньевича «Повышение эффективности сепарации золотосодержащего сырья в центробежных безнапорных концентраторах», представленная на соискание ученой степени кандидата наук по специальности 2.8.9 «Обогащение полезных ископаемых», рассмотрена и коллективно обсуждена на расширенном заседании ученого совета Института горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленного подразделения ЯНЦ СО РАН с участием сотрудников лаборатории обогащения полезных ископаемых, одно из основных направлений научно-исследовательской деятельности которой соответствует тематике диссертационной работы Сенченко А.Е. (Протокол расширенного заседания ученого совета ИГДС СО РАН № 6 от 23.05.2025 г.).

Подготовленный отзыв на диссертационную работу Сенченко А.Е. доктором технических наук, заведующим лабораторией обогащения полезных ископаемых ИГДС СО РАН Матвеевым Андреем Иннокентьевичем утвержден

в качестве официального отзыва ведущей организации.

Я, Матвеев Андрей Иннокентьевич, даю свое согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Заведующий лабораторией  
обогащения полезных ископаемых ИГДС СО РАН,  
доктор технических наук  
по специальности

2.8.9. «Обогащение полезных ископаемых»

E-mail: [mail@andreimati.ru](mailto:mail@andreimati.ru)

Тел.: +7(4112)39-00-55



Матвеев Андрей Иннокентьевич

**Сведения об организации:** Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ИГДС СО РАН), 677980, Россия, г. Якутск, пр. Ленина 43, тел. +7(4112)335930, e-mail: [igds@ysn.ru](mailto:igds@ysn.ru)

Подпись А.И. Матвеева заверяю:

Ученый секретарь ИГДС СО РАН, к.т.н.



С.И. Саломатова