



004812

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования

**«Магнитогорский государственный
технический университет**

им. Г. И. Носова»

(ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»)

пр. Ленина, д. 38, г. Магнитогорск, Челябинская обл., 455000

Тел.: 8 (3519) 29-84-02; Факс: 8 (3519) 23-57-59, 29-84-26

E-mail: mgtu@magtu.ru; <http://www.magtu.ru>

ОКПО 02069384, ОГРН 1027402065437,

ИНН/КПП 7414002238/745601001

Ministry of Science and Higher Education
of the Russian Federation

Federal State Budgetary
Educational Institution of Higher Education

**«Nosov Magnitogorsk State
Technical University»**

(FSBEIHE «NMSTU»)

38, Lenin Street, Magnitogorsk, Chelyabinsk Region, 455000
Tel.: +7 3519 298 402; Fax: +7 3519 235 759, +7 3519 298 426

E-mail: mgtu@magtu.ru; <http://www.magtu.ru>

ОКПО 02069384, ОГРН 1027402065437

INN/KPP 7414002238/745601001

05.11.2024

№ 6604-3679

На/To № _____ от/dated _____

УТВЕРЖДАЮ:

Ректор

ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

~~Д.В. Терентьев~~

Д.В. Терентьев

2024 г.

О Т З Ы В

ведущей организации на диссертацию *Пенькова Павла Михайловича*
на тему: «Повышение эффективности процесса центробежной сепарации на основе
воздушной турбулизации пристеночного слоя
и циркуляционно-накопительной технологии»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.8.9 Обогащение полезных ископаемых

Представленная на рассмотрение работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников информации из 130 наименований, 6 приложений, содержит 164 страницы машинописного текста, 39 рисунков, 62 таблицы.

1. Актуальность темы диссертации

Актуальность выполнения данного диссертационного исследования продиктована широким и успешным применением центробежных сепараторов при обогащении золото-содержащих руд россыпных и коренных месторождений, лежалых хвостов обогатительных фабрик и необходимостью дальнейшего совершенствования данной технологии. Развитию процессов турбуляционной центробежной сепарации, циркуляционно-накопительной технологии, разрабатываемых научной школой профессора Ю.П. Морозова, посвящена и диссертационная работа П.М. Пенькова. Разработка теоретических и практических положений в части совершенствования способов турбулизации пристеночного слоя и, в частности, нового технического решения с использованием воздушной турбулизации пристеночного слоя, и в целом

развитие циркуляционно-накопительной технологии будут способствовать более эффективному использованию центробежной сепарации в практике переработки золотосодержащего и другого сложного сырья, повышению качества получаемых продуктов.

2. Научная новизна диссертации

Автором диссертации П. М. Пеньковым поставленная цель повышения технологических показателей переработки золотосодержащего сырья решается за счет разработанного нового технического решения – использования эффекта воздушной турбулизации пристеночного слоя конуса в центробежном сепараторе и циркуляционно-накопительной технологии.

Поставленная цель достигается путём проведения комплекса исследований: теоретического анализа, математического и экспериментального моделирования турбулизационной центробежной сепарации с гидравлической и воздушной турбулизацией пристеночного слоя конуса центробежного сепаратора, циркуляционно-накопительной технологии, с применением методов гидродинамики, прикладной математики; лабораторных экспериментальных исследований; опытно-промышленных испытаний предлагаемых технических решений турбулизационной центробежной сепарации. Ведущим методологическим основанием данного исследования выбран структурный подход, обусловленный необходимостью разработки комплексной технологии с учетом многообразия свойств золотосодержащего сырья. Это позволило получить достоверные результаты, обладающие научной новизной, и разработать новые технические и технологические решения для практического использования.

Научную новизну работы составляют следующие положения:

– теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что воздушная турбулизация пристеночного слоя центробежной сепарации за счет лучшего прохождения частиц повышенной плотности через аэрированный пристеночный слой при уменьшении плотности турбулизируемого слоя материала позволяет значительно повысить технологические показатели;

– моделированием показано и экспериментально подтверждено, что центробежная сепарация с использованием циркуляционно-накопительной технологии за счет циркуляции исходного питания через сепаратор и единовременной разгрузки после переработки заданного количества порций обеспечивает высокое содержание частиц повышенной плотности при максимальном их извлечении в тяжелую фракцию.

3. Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций

Обоснованность и достоверность защищаемых научных положений подтверждается достаточным объемом проведенных экспериментальных исследований, их представительностью и сходимостью теоретических выводов с экспериментальными данными, положительными результатами испытаний процесса воздушной турбулизационной центробежной сепарации и накопительно-циркуляционной технологии на различных золотосодержащих продуктах и полученными по ним высокими качественно-количественными показателями.

Работа выполнена с применением методов прикладной математики, механики, математического и экспериментального моделирования, методов химического, пробирного и минералогических анализов. Экспериментальная проверка результатов теоретических исследований выполнялась в лабораторных и опытно-промышленных условиях.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных научно-технических конференциях «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья» (г. Екатеринбург, 2017 - 2024 г.); на межрегиональной выставке «Рудник Урала» (г. Екатеринбург, 2022 г.); на международной конференции «Инновационные процессы комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья»

Плаксинские чтения (г. Апатиты, 2020 г.); на международной научно-практической конференции «Современные тенденции в области теории и практики добычи и переработки минерального и техногенного сырья» (г. Екатеринбург, 2019 г.).

Основные положения работы опубликованы в 20 работах, в том числе в 4 работах в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК. Получены 2 патента РФ на изобретения.

Таким образом, все полученные автором результаты и выводы имеют теоретическое обоснование, хорошее подтверждение в процессе лабораторных и опытно-промышленных испытаний, взаимосвязаны между собой и экономически обоснованы. Использование широкой номенклатуры методов исследований, апробированных стандартных методик и поверенного оборудования, удовлетворительная сходимость результатов теоретических выводов с данными, полученными в лабораторных и опытно-промышленных условиях, позволяют говорить об обоснованности и достоверности полученных результатов.

4. Соответствие содержания диссертации указанной специальности

Тема диссертации, направленность проведенных исследований и полученных результатов соответствуют паспорту научной специальности 2.8.9. Обогащение полезных ископаемых по пунктам:

3. Повышение контрастности технологических свойств разделяемых минералов. Физические, физико-химические и химические процессы разделения, концентрации и переработки минералов, руд, промежуточных продуктов переработки природного и техногенного минерального сырья

5. Технологии и аппараты физико-механической, физико-химической, химической, биохимической, химико-металлургической переработки и обогащения полезных ископаемых.

5. Научные результаты, их ценность

Основную научную ценность работы составляет теоретическое обоснование и разработка новых технических решений турбулизационной центробежной сепарации и циркуляционно-накопительной технологии для материалов с частицами повышенной плотности, внедрение которых позволит существенно расширить переработку золотосодержащих руд и техногенного сырья с мелким и тонким золотом.

Определены условия эффективного использования циркуляции легкой фракции центробежного сепаратора в турбулизационной центробежной сепарации.

Математическим и экспериментальным моделированием показана высокая эффективность использования воздушной турбулизации пристеночного слоя и циркуляционно-накопительной технологии.

Предложенные новые научно обоснованные технические решения турбулизационной центробежной сепарации с использованием воздушной турбулизации пристеночного слоя и циркуляционно-накопительной технологией обеспечивают высокое качество золотосодержащего концентрата при максимальном извлечении в него золота и представляют ценность для дальнейшего совершенствования технологии переработки золотосодержащего сырья методом центробежной сепарации.

Полученные новые научные результаты расширяют и углубляют знания в области циркуляционной центробежной концентрации и представляют ценность для дальнейшего развития способов турбулизации пристеночного слоя и совершенствования конструкций сепараторов.

6. Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации

К наиболее значимым теоретическим и практическим результатам работы, на наш взгляд, относятся следующие.

Предложен механизм турбулизации в режиме псевдооживленного пульсирующего состояния пристеночного слоя без периодического уплотнения твердой фазы, обеспечивающий эффективное постоянное движение частиц золота к пазам конуса.

Экспериментальным сравнением гидравлической и воздушной турбулизации установлено, что одинаковые результаты турбулизации сжатым воздухом достигаются при увеличении давления по сравнению с давлением воды всего лишь в 4-5 раз выше за счет эффекта аэрационного уменьшения плотности турбулизируемого материала.

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

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

Теоретически обосновано и экспериментально доказано, что циркуляционно-накопительная технология с воздушной турбулизацией пристеночного слоя обеспечивает получение в турбулизационной центробежной сепарации высококачественных золотосодержащих концентратов при максимальном извлечении в них золота.

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

Первое техническое решение реализует циркуляционно-накопительную технологию с гидроциклонированием исходного питания. Слив гидроциклонирования вместе с турбулизационной водой используется для турбулизации пристеночного слоя конуса центробежного сепаратора. Данное решение позволяет по сравнению с известной технологией повысить массовую долю золота в концентрате с 480 до 4050 г/т при повышении извлечения золота в концентрат с 76 до 92 %.

Второе техническое решение реализует циркуляционно-накопительную технологию с гидроциклонированием исходной пульпы и с турбулизацией пристеночного слоя смесью слива гидроциклонирования со сжатым воздухом при объемном соотношении «слив-воздух» не более 1:30. Данное решение по сравнению с известным способом приводит к повышению массовой доли золота в тяжелой фракции с 4050 до 4250 г/т при повышении извлечения золота в тяжелую фракцию с 92 % до 95 % при снижении расхода используемой воды.

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

Разработанная циркуляционно-накопительная технология внедрена в технологический регламент обогатительной фабрики по переработке золотосодержащей руды месторождения «Ашаль».

Опытно-промышленными испытаниями турбулизационной центробежной сепарации хвостов кучного выщелачивания руды месторождения «Мизек» установлено, что циркуляционно-накопительная технология с воздушной турбулизацией пристеночного слоя позволила получить золотосодержащий шлик с массовой долей золота 9570 г/т при высоком извлечении в него золота

79, 76 %. Технология обеспечивает при производительности 50 т/ч получение чистой прибыли 433 млн рублей в год.

7. Рекомендации по использованию результатов работы

Результаты диссертационной работы в виде разработанных и эффективных технических решений по циркуляционно-накопительной центробежной сепарации могут быть с высокой результативностью использованы в деятельности научно-исследовательских и проектных институтов при разработке технологических регламентов по переработке золотосодержащих руд россыпных и коренных месторождений, лежалых хвостов обогатительных фабрик, в деятельности научно-исследовательских и инжиниринговых центров при разработке новых технологических решений гравитационного обогащения руд, в том числе техногенного золотосодержащего сырья и других видов сложного сырья, при модернизации действующих переделов гравитационного обогащения, в том числе опытно-промышленных установок, при совершенствовании технологических режимов действующих предприятий и оптимизации параметров их работы.

Также рекомендуется широкое использование результатов диссертационного исследования в научно-исследовательской и образовательной деятельности высших учебных заведений при подготовке специалистов, аспирантов.

8. Замечания и вопросы по работе

По диссертации и автореферату возникли следующие вопросы и замечания:

1. В п. 2.1 уравнение (2.1) не является уравнением параболоида вращения, а скорее – уравнением параболы. Что за коэффициент a в формуле (2.2) и как получены его значения в формулах (2.6) – (2.8).

2. На стр. 31 сказано, что выполнено фотографирование сформировавшейся границы разделения пульпы в пристеночном слое с воздухом, определены значения расстояний от вершины параболоида вращения до днища конуса ΔH и радиусов сечения ($R_{сеч\ i}$) границы раздела «жидкое – газ» на i -ых уровнях по высоте конуса. Целесообразно было бы привести эти фотографии, по которым были получены такие важные параметры.

3. На рис. 2.13 (План скоростей движения частиц в пристеночном слое конуса центробежного сепаратора) не учтена скорость от силы действия турбулизирующего агента. Разве она не будет влиять на траекторию движения частиц в пристеночном слое? В формуле (2.15) для скорости перемещения частиц по оси Y почему вычитается $\vartheta_{исст}$, ведь ее проекция на ось Y равна нулю?

4. В п. 2.4 приводится зависимость суммарного извлечения золота в пазы конуса от количества циклов циркуляции (формула 2.26), в которую входит k – коэффициент улавливания золота. Из текста диссертации не ясно кем получена эта зависимость и как определены значения этого коэффициента для оптимальных режимов в пределах от 0,92 до 1,61. И, соответственно, кем получены кинетические зависимости извлечения золота в пазы центробежного сепаратора, приведенные на рис. 2.17.

5. В табл. 2.4 (Результаты моделирования переработки одной порции исходного сырья по обычной технологии) для расчета массовой доли золота в тяжелой фракции требуется масса тяжелой фракции. Как она была получена? Видится некоторое противоречие в том, что в режиме 3 при самой большой производительности по твердому питанию $Q_{исх} = 50$ кг/мин и при самой маленькой продолжительности пропускания материала – всего 2 мин – массовая доля золота в тяжелой фракции была самой высокой и составила 1000 г/т.

6. В табл. 2.5 приведены результаты расчета показателей центробежной сепарации по циркуляционной технологии. Не указано на основании чего были приняты такие значения извлечения золота по режимам 1, 2, 3. Кроме того, если производить расчет массы накопленного

золота по формуле (2.28) при указанных значениях продолжительности переработки получаются другие значения.

7. Не понятно, почему по циркуляционно-накопительной технологии так резко уменьшается выход концентрата по сравнению с просто циркуляционной технологией. Из табл. 2.22 следует, что при переработке одной порции исходного питания выход концентрата составлял 22,60%. А если в таком же режиме переработать 5 порций, то выход концентрата будет только 5,21%, и далее будет уменьшаться с увеличением числа переработанных порций. Из этой же таблицы следует, что в режиме с воздушной турбулизацией пристеночного слоя количество порций исходного питания N не влияет на извлечение вольфрама и при количестве переработанных порций 1, 5, 10 оно остается на одном уровне и снижается при количестве порций 15. Как это можно объяснить?

8. В п. 3.1 (Совершенствование системы турбулизации пристеночного слоя конуса) как такового совершенствования нет, кроме результатов с воздушной турбулизацией пристеночного слоя при различном диаметре сопел. В диссертации мало внимания уделено конструкционным параметрам турбулизаторов, как гидравлического, так и воздушного.

9. В п. 3.2, 3.3, касающихся циркуляционно-накопительной технологии с гидроциклонированием, исходное питание должно быть с массовой долей твердого 20 %. Продукты, приходящие на центробежную сепарацию, наверняка будут иметь больший процент твердого, поэтому будет ли целесообразно гидроциклонирование?. Не указано, какая массовая доля твердого будет в песках гидроциклона, поступающих уже непосредственно в сепаратор. Говорится, что подача слива гидроциклонирования в поток сжатого воздуха из сопла пневматического турбулизатора должна производиться при объемном соотношении «слив-воздух» не более 1:30. Нигде ранее в теоретической части исследования использование гидровоздушной смеси не было обосновано и это соотношение не изучено. При таком соотношении (1:30) слива гидроциклонирования наверняка будет больше образовываться. Куда будет поступать излишек? Расчеты баланса воды, твердого, воздуха не представлены. Кроме того, в сливе гидроциклона будут содержаться частицы твердого, что будет приводить к забиванию, зарастанию сопел гидравлического турбулизатора.

10. При исследовании турбулизационной центробежной сепарации на руде месторождения «Ашалы» в режимах и с гидравлической, и с воздушной турбулизацией при циркуляционно-накопительной технологии результаты приведены по Au-содержащему шлиху с содержанием золота 82% после доводочных операций в обоих случаях (табл. 4.4 и 4.5). Как при этом оценить за счет чего получено повышение извлечения золота на 5% в случае воздушной турбулизации – за счет эффективности предлагаемых решений в основной сепарации, в доводочной или при ручной сортировке? Целесообразно было бы привести качественно-количественные показатели разделения непосредственно в турбулизационной центробежной сепарации с указанием выходов продуктов. Там же приводятся фотографии частиц золота в шлихах, но при этом никакой анализ по размеру, форме частиц золота, которые переходили в шлих, и т.п. не проведен. Приведено мало параметров циркуляционно-накопительной технологии – сколько было циклов циркуляции, сколько порций переработано, какое было заданное время работы в замкнутом цикле, по какой технологии осуществлялась доводочная операция на сепараторах К-210ВЛ? Почему не использовалась в качестве турбулизатора смесь воздуха и слива, если было доказано, что извлечение золота при этом будет выше?

Также в диссертации встречается дублирование одних и тех же результатов в таблицах, графиках. Это относится к табл. 2.10 - 2.13, результаты которых затем сведены в табл. 2.14, и еще представлены в виде зависимости извлечения вольфрама в концентрат от количества циклов

переработки на рис 2.19. Результаты опытов, приведенные в табл. 2.15 – 2.18, затем продублированы в виде сводных показателей в табл. 2.24 и еще на рис. 2.20.

Вышесказанные замечания не снижают общей ценности диссертации, её научной и практической значимости и не влияют на общую положительную оценку работы. Диссертационное исследование Пенькова Павла Михайловича характеризуется внутренним единством, аргументированным изложением материала, содержит новые научные положения и практические результаты, свидетельствующие о личном вкладе автора в разработке новых технико-экономических решений центробежной сепарации.

9. Заключение по диссертации

В целом, представленная диссертационная работа по своему содержанию соответствует паспорту научной специальности 2.8.9. Обогащение полезных ископаемых; требованиям пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней» (постановление Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г., №842, с дополнениями и изменениями), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор – Пеньков Павел Михайлович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.9. Обогащение полезных ископаемых.

Диссертация, автореферат и отзыв были рассмотрены и одобрены на заседании кафедры геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», протокол № 2 от 9 октября 2024 г.

Председатель заседания

Заведующий кафедрой геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Магнитогорский государственный технический университет
им. Г.И. Носова»

кандидат технических наук, доцент

Гришин Игорь Анатольевич

Секретарь заседания

Профессор кафедры геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Магнитогорский государственный технический университет
им. Г.И. Носова»

доктор технических наук, доцент

Горлова Ольга Евгеньевна

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38.

Официальный сайт в сети Интернет: <https://www.magtu.ru/>

эл. почта: mgtu@magtu.ru телефон: +7 (800) 100-1087