

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Иркутский национальный исследовательский технический университет»**

На правах рукописи



Лучко Максим Сергеевич

**Оптимизация процесса обогащения золотосодержащего сырья методом
отсадки в центробежном поле**

Специальность 2.8.9 – Обогащение полезных ископаемых

ДИССЕРТАЦИЯ

**на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

**Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Федотов Павел Константинович**

Иркутск - 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ГРАВИТАЦИОННОГО ОБОГАЩЕНИЯ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ РУД И ПЕСКОВ	12
1.1 Анализ современных гравитационных методов обогащения золота.....	12
1.2 Основные гравитационные методы извлечения рудного золота	16
1.2.1 Обзор теорий отсадочного обогащения золотосодержащих руд и песков	17
1.2.2 Обзор теорий центробежного обогащения золотосодержащих руд и песков	23
1.2.3 Центробежно-отсадочное обогащение золотосодержащих руд и песков.....	32
1.3 Научные исследования в области моделирования процессов центробежного и отсадочного обогащения	35
1.4 Выводы по главе. Постановка задачи исследования обогащения золотосодержащих руд методом отсадки в центробежном поле	37
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ОБОГАЩЕНИЯ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ РУД И ПЕСКОВ МЕТОДОМ ОТСАДКИ В ЦЕНТРОБЕЖНОМ ПОЛЕ.....	40
2.1 Обоснование возможности повышения уровня извлечения золота методом отсадки в центробежном поле. Обоснование необходимости конструирования нового центробежного аппарата - центробежной отсадочной машины.....	40
2.2 Исследования влияния режимов работы ЦОМ на показатели обогащения	44
2.3 Программа и методика опытно-промышленных испытаний ЦОМ	47
2.4 Проведение заводских испытаний в замкнутом цикле. Исследование конструктивной надежности разработанной конструкции ЦОМ	51
2.5 Исследование возможности эффективности обогащения хвостов цианирования центробежно-отсадочным методом	52
2.5.1 Размещение ЦОМ на золотоизвлекательной фабрике	52
2.5.2 Краткая характеристика обогащаемого материала.....	55
2.5.3 Результаты опытно-промышленных исследований ЦОМ на ЗИФ ОАО «Покровский рудник»	57

2.6 Совершенствование конструкции экспериментального образца ЦОМ. Стендовые испытания модернизированной ЦОМ.....	64
2.7 Проведение опытно-промышленных исследования на ЗИФ ОАО «Высочайший».....	69
2.8 Выводы по главе.....	77
ГЛАВА 3. ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РАБОТЫ ЦОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА.....	78
3.1 Прогнозирование технологических результатов обогащения в ЦОМ	78
3.2. Математическая модель по содержанию.....	80
3.3. Математическая модель по извлечению.....	89
3.4. Выводы по главе.....	94
ГЛАВА 4. ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ЦЕНТРОБЕЖНО-ОТСАДОЧНОГО МЕТОДА ОБОГАЩЕНИЯ.....	96
4.1 Дополнительное извлечение золота из отвальных хвостов ЗИФ.....	97
4.2 Выбор и экономическое обоснование варианта доизвлечения золота из хвостов ЗИФ.....	103
4.3 Выводы по главе.....	105
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	106
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	109
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	110
ПРИЛОЖЕНИЕ А	120
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	122
ПРИЛОЖЕНИЕ В	126

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Экономическое благосостояние России зависит от добычи и переработки полезных ископаемых. Ежегодное увеличение объёма добычи золота в Российской Федерации наблюдается с 2008 года [1]. Так, в 2007 году было добыто 144,8 т, а в 2022 г. – 371 т [1].

Увеличение золотодобычи в Российской Федерации, прежде всего, можно объяснить за счёт ввода в эксплуатацию новых золотоизвлекательных фабрик и увеличения объёма переработки на действующих разрабатываемых месторождениях. Кроме того, растущая потребность в ресурсах вызывает необходимость переработки полезных ископаемых и извлечения ценных компонентов из бедных и технологически сложных для обогащения месторождений.

Во многих золоторудных районах России весьма высок потенциал разведанных и открытых новых золотосульфидных месторождений, при извлечении золота из которых могут быть применены гравитационные методы обогащения [2, 3].

На современном этапе развития науки и техники важно не только эффективно извлекать золото из руд, но и сделать это с максимальной безопасностью для экологии [4, 5].

Наиболее эффективными в этом смысле являются гравитационные способы обогащения полезных ископаемых [6, 7]. По сложившейся практике в отечественной и зарубежной золотодобыче широкое применение получили отсадочный и центробежные гравитационные методы обогащения, позволяющие эффективно выводить в целевой продукт золото средних и мелких классов крупности.

Центробежные концентраторы и отсадочные машины наряду со своими достоинствами (экологичность и высокая степень извлечения ценных компонентов средних и мелких классов крупности) имеют и недостатки, к которым можно отнести: для отсадочных машин – недостаточно высокое извлечение золота мелких классов крупности, ограничивающее их применение

на тонкоизмельченном продукте; для центробежных концентраторов – низкая эффективность обогащения при сепарации вкрапленных руд.

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

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

На эффективность обогащения центробежно-отсадочным методом влияет вещественный состав и крупность сепарируемого материала, форма нахождения золота и правильность выбора значений технических параметров (частоты вращения отсадочной камеры, амплитуды и частоты пульсации подвижного конуса, расход подрешетной воды) обогатительного аппарата (центробежной отсадочной машины – ЦОМ).

Знание закономерностей влияния регулируемых технических параметров центробежной отсадочной машины, использующей для разрыхления постели с целью разделения минералов по удельному весу в центробежном поле возвратно-поступательные колебания, позволит осознанно управлять качеством получаемых продуктов обогащения.

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.

Идея работы – применение комбинации отсадочного и центробежного методов обогащения позволит доизвлекать золото из хвостовых тонкодисперстных золотосульфидных продуктов за счет повышения

контрастности свойств сырья и обеспечит его постоянное (непрерывное) и регулируемое извлечение в концентрат.

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

Для успешной реализации поставленной цели решались следующие основные задачи:

1. Анализ современных тенденций в отсадочном и центробежном методах обогащения.
2. Теоретическое обоснование возможности интенсификации процесса обогащения золотосодержащей руды и песков методом отсадки в центробежном поле.
3. Разработка конструкции центробежной отсадочной машины.
4. Разработка математических моделей с целью выявления влияния параметров процессов отсадки в центробежном поле на технические показатели.
5. Прогнозирование показателей обогащения при изменении регулируемых технических параметров ЦОМ.
6. Проведение опытно-промышленных испытаний промышленного образца ЦОМ на продуктах обогащения действующих ЗИФ и разработка рекомендаций для усовершенствования существующих технологических схем обогащения золота.
7. 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. Расчет 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, позволяющие прогнозировать значения содержания и извлечения ценного компонента в продуктах обогащения центробежной отсадочной машины (ЦОМ) 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,

сходимостью опытно-промышленных исследований с результатами математического моделирования.

Научная новизна работы:

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 силе динамического сопротивления среды при стеснённом движении (P), которая возникает посредством создаваемых пульсаций и складывается из частоты (N) и амплитуды (A) возвратно-поступательных колебаний; расхода подрешетной 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 работы:

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 ЦОМ для обогащения хвостов были проведены на ОАО «Высочайший» и ОАО «Покровский рудник».

2. Доказана высокая эффективность и технологичность центробежно-отсадочного способа 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 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 гр/т. Рассчитано получение экономического эффекта в виде чистой прибыли до 80 млн руб в год.

Разработана, изготовлена и защищена патентом на изобретение модель центробежной отсадочной машины (Патент РФ №2430784 10.10.2011 «Центробежно-отсадочный концентратор») [8].

Установлены (выявлены, определены) на основании разработанных регрессионных математических моделей и ранжированы по степени влияния на показатели процесса обогащения, регулируемые технические параметры ЦОМ (длина хода подвижного конуса, произведение частоты колебаний подвижного конуса и длины хода подвижного конуса, частота вращения отсадочной камеры), выявлены корреляционные зависимости между ними, что позволяет прогнозировать значения извлечения золота в концентрат и хвосты при изменении значений технических параметров работы ЦОМ.

Основные защищаемые положения, выносимые на защиту

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

регулируемый вывод в концентрат зерен 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.

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, Техничко-экономическое совещание – 2017 г.), «Техничко-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.), «Техничко-экономическое совещание по добыче драгоценных и редких металлов и алмазов» (г. Иркутск, Недра Сибири – 2022 г.).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 9 работах, в том числе: три статьи – в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, получен патент РФ № 2430784 на изобретение «Центробежно-отсадочный концентратор» [8].

Структура и объем работы. Диссертация содержит введение, четыре главы, заключение, список сокращений и условных обозначений, список литературы и приложения. Основной раздел работы изложен на 109 страницах

машинописного текста (без учета приложений и списка литературы). Общий объём составил 129 страниц, в том числе 24 таблицы и 32 рисунка, список литературы включает 102 наименования.

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

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследования, обзоре и анализе патентных и научно-технических литературных источников, организации и проведения 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).

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ГРАВИТАЦИОННОГО ОБОГАЩЕНИЯ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ РУД И ПЕСКОВ

1.1 Анализ современных гравитационных методов обогащения золота

Гравитационное обогащение – широко применяемый способ обогащения различного минерального сырья, в т.ч. золотосодержащих руд и песков. В основе способа лежит различие в плотностях, крупности и форме обогащаемых минералов, что в свою очередь влияет на их движение в среде (воде, воздухе и тяжёлых жидкостях) и распределение минералов в потоке. Также важными параметрами, влияющими на эффективность гравитационного обогащения, являются взаиморасположение и соотношение сил, действующих на частицы минералов: архимедова сила, силы сопротивления и трения, центробежные силы [9].

Гравитационные методы обогащения на современном этапе развития науки и техники можно классифицировать по следующим признакам [9]:

Таблица 1.1 – Современная классификация гравитационных методов обогащения

Признак классификации	Вид гравитационного обогащения
Среда разделения	Гидравлическое, пневматическое, тяжелосредное, суспензионное гидравлическое и пневматическое) магнитогидростатическое, магнитогидродинамическое и феррогидростатическое
Способ псевдоожижения (образования взвеси) дисперсного материала	Отсадка (гидравлическая и пневматическая), обогащение в пульсаторах, в виброжелобах, пневматическая сепарация
Средства обогащения минералов в жидкости, текущей по наклонной плоскости	В струйных концентраторах, в желобах, на концентрационных столах, на винтовых сепараторах и шлюзах
Силовые поля	В гравитационном поле, в гидроциклонах, в центрифугах
Комбинации разделительных признаков (свойств) частиц	Флотогравитация, отсадка в центробежном поле
Соотношение капиллярных связей и инерционных сил частиц	Капиллярно-инерционная сепарация
Классификация по гидравлической крупности	Промывка, классификация по гидравлической крупности

Принято различать гидравлическое и сегрегационное гравитационное обогащение, происходящее под действием силы тяжести.

При гидравлическом обогащении частицы разделяются по законам свободного и стеснённого падения. При этом силы взаимодействия между частицами малы по сравнению с гидродинамическими силами.

Законом Стокса можно описать падение шарообразных частиц при ламинарном режиме движения:

$$F_{\text{ср}} = 3\pi\mu d v, \quad (1.1)$$

где $F_{\text{ср}}$ – сопротивление среды;

μ – вязкость среды, н*сек/м²;

d – диаметр падающей частицы, мм;

v – скорость движения частицы, м/сек.

Скорость падения частицы относительно жидкости определяется соотношением действующих на частицу сил тяжести, подъёмной силы, гидродинамического сопротивления жидкости и сил механического воздействия частиц при их соприкосновении [10].

В зависимости от значения критерия Рейнольдса для расчета скорости осаждения частицы используются следующие уравнения [11]:

- в области применимости закона Стокса ($Re < 1$):

$$W_o = \frac{1}{18} d^2 \frac{\rho_1 - \rho_2}{\mu} g, \quad (1.2)$$

где ρ_1 – плотность частицы, кг/м³;

ρ_2 – плотность среды, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/сек²;

- в переходной области ($1 < Re < 103$)

$$W_o = 0,151 \frac{g^{0,42} d^{1,14}}{\mu^{0,43} \rho^{0,29}} (\rho_1 - \rho_2)^{0,72} \quad (1.3)$$

- в области применимости закона Ньютона ($103 < Re < 105$)

$$W_o = 0,174 \sqrt{d \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_2} g} \quad (1.4)$$

В свою очередь сегрегационным называется разделение частиц в условиях их соприкосновения, при которых силы взаимодействия между ними преобладают над гидродинамическими. Сегрегация может происходить под влиянием возмущающих сил переменного направления, например в отсадочных машинах, или при колебаниях рабочей поверхности аппарата. Экспериментально установлено, что в процессе сегрегации частицы одинаковой плотности мелких классов располагаются ниже крупных. При сегрегации частиц различной плотности в нижнем слое располагаются мелкие тяжёлые частицы, а над ними – слой крупных тяжёлых частиц с мелкими легкими частицами, в самом верхнем слое – крупные лёгкие частицы.

Разделение частиц в вертикальном потоке жидкости характеризуется следующими закономерностями. Взвешенные в вертикальном восходящем потоке жидкости слои, каждый из которых состоит из частиц одинаковых размеров и плотности, располагаются снизу вверх по уменьшению их плотности, определяемой из соотношения:

$$\delta_{\Pi} = \rho_{\text{ж}} \cdot m + \delta_{\text{т}}(1 - m) \quad (1.5)$$

где δ_{Π} и $\delta_{\text{т}}$ – соответственно, плотности пульпы и твёрдого, кг/м³;

$\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости, кг/м³;

m – коэффициент разрыхления взвеси.

Гравитационный метод обогащения, применяется несколько сотен лет и постоянно совершенствуется. Гравитация особенно широко зарекомендовала себя при обогащении золота из россыпных месторождений. Преимущественно на россыпях применяется одностадийная шлюзовая технология, эффективная при определенных условиях. Её широкое применение обусловлено простым и дешёвым аппаратным оформлением, высокой степенью концентрации, отсутствием необходимости применения иного источника энергии, кроме транспортирующего водного потока, низкими капитальными вложениями и эксплуатационными расходами, простоте в обслуживании оборудования [8]. Недостатком являются высокие потери золота из средних и мелких классов. Для увеличения показателей извлечения на шлюзах применяют различные маты и

трафареты в конструкции шлюзов, а также рекомендуют более узкую классификацию исходного питания с отдельным обогащением каждого класса в максимально благоприятных для него условиях (см. таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Рекомендуемые к применению шлюзовые аппараты в зависимости от крупности песков

Наименование шлюзового аппарата	Классификация по крупности, мм
Самородкоулавливающий шлюз (СМШ)	+ 100 (120)
Шлюз глубокого наполнения (ШГН)	Минус 100 (120) +30 (0)
Шлюз мелкого наполнения (ШМН)	Минус 30

Кроме того, существенно ухудшает процесс обогащения на шлюзах повышение содержания глины в песках, что требует применения специальных способов её разрушения и удаления.

Вторым по популярности способе гравитационного обогащения на россыпных месторождениях является отсадочный [12, 13]. Исследованиями, ранее выполненными институтом «Иргиредмет», установлено, что потери золота, особенно мелких классов, можно существенно снизить за счет использования более эффективного, по сравнению со шлюзами, обоганительного оборудования, например, отсадочных машин, центробежных концентраторов, концентрационных столов [12, 13]. Разработанная институтом «Иргиредмет» отсадочная технология и ее промышленная эксплуатация на россыпных золотодобывающих предприятиях Якутии, Забайкалья, Урала, Амура подтверждает высокую технологическую эффективность улавливания мелкого и особо мелкого золота, повышая общий уровень извлечения золота на 15-25 % [14].

Как правило, отсадочная технология обогащения применяется на драгах, высокопроизводительных обоганительных комплексах и береговых обоганительных фабриках (БОФ), что вызвано истощением целиковых дражных запасов и необходимостью повторной (неоднократной) переработки техногенных месторождений. Однако, эксплуатация отсадочных машин требует

определённой квалификации от обслуживающего персонала и ИТР предприятия, капитальных и эксплуатационных затрат при эксплуатации драг, высокопроизводительных комплексов и БОФ.

Обогащение на концентрационных столах широко используется на россыпных месторождениях золота в доводочных операциях и при перечистке концентратов отсадочных машин, но из-за экономических характеристик концентрация на столах не нашла применения в основных операциях обогащения песков, ввиду необходимости узкой классификации исходного питания и низкой удельной производительности на 1 м² деки концентрационного стола.

Обогащение на винтовых сепараторах и центробежных концентраторах не нашло широкого применения при разработке россыпных месторождений и чаще используется в процессах доводки и сокращения концентрата отсадочных машин, а применительно к центробежным концентраторам – для контроля хвостовых продуктов обогащения концентрационных столов.

Необходимость перерабатывать золотоносные пески, в том числе и техногенные, с высоким процентным содержанием золота средних и мелких классов крупности требует применения высокоэффективных обогатительных аппаратов, как правило, с высокой производительностью на единицу оборудования. Применение технологической воды без механических примесей для разрыхления постели при центробежном обогащении является основным сдерживающим фактором ограничения применения современных центробежных концентраторов при обогащении россыпей [17]. В то же время только отсадочная технология обогащения не позволяет достаточно полно извлекать золото мелких классов крупности. Для достижения высокой степени извлечения в настоящее время необходимо применение комбинации различных гравитационных методов обогащения, в частности, отсадочных и центробежных.

1.2 Основные гравитационные методы извлечения рудного золота

При разработке рудных месторождений золота гравитационный метод применяется на трети всех золотоизвлекательных фабрик в России. Гравитация

без сочетания с другими процессами обогащения (флотация и/или цианирование) практически не применяется.

Таблица 1.3 – Гравитационное обогащение руд

Наименование показателей	Простые руды	Упорные руды	Комплексные руды	Всего
Количество предприятий, применяющих гравитационное обогащение	42	17	19	78
В том числе:				
в качестве единственного технологического процесса	1	-	-	1
в комбинации с цианированием	23	-	-	23
в комбинации с флотацией (без цианирования)	2	3	5	10
в комбинации с флотационным обогащением и цианированием	16	14	14	44

При обогащении золотоносных руд нашли применение все гравитационные методы обогащения, кроме шлюзового. Это связано с низкой эффективностью извлечения шлюзовой технологией золота класса крупностью минус 0,25 мм. Отсадочные машины, как правило, применяются на ЗИФ для извлечения золота после первой стадии измельчения, центробежные концентраторы – при извлечении золота из пескового продукта гидроциклонирования, концентрационные столы – на доводочных операциях.

1.2.1 Обзор теорий отсадочного обогащения золотосодержащих руд и песков

Отсадкой принято называть гравитационный метод обогащения полезных ископаемых, в основе которого лежит способность разделения минеральных частиц в восходящих и нисходящих потоках воды или воздуха на основе различий в гидравлической крупности этих частиц.

Первое обоснование процессу отсадки в 1867 году дал австрийский обоганитель П. Риттингер. Он изложил, что из двух частиц одинакового размера, но разной плотности, частица с большей плотностью будет иметь и большую скорость свободного падения в жидкости.

Основным из наиболее существенных отличий отсадочного метода обогащения является формирование в процессе разделения слоёв из минеральных зерен с определенным диапазоном плотностей. При прочих равных условиях (крупность и плотность разделения) эффективность отсадочного метода тем выше, чем крупнее зерна разделяемого материала и чем больше его отдельные компоненты различаются по крупности [18]. При обогащении руд драгоценных и редких металлов область применения отсадки охватывает крупность разделяемых материалов от 0,3 до 6 мм.

До настоящего времени в теории отсадки нельзя поставить точку, как в полностью изученном процессе. К вопросам теории отсадки относят:

- механизмы и закономерности расслоения неоднородной смеси минеральных зёрен по плотности, крупности и форме в пульсирующем потоке воды;
- механизм разрыхления отсадочной постели при динамическом воздействии на неё возвратно-поступательного потока жидкости;
- механизм действия и функции назначения и параметры искусственной постели при селективной разгрузке тяжёлых минералов.

Несмотря на обширное применение процесса отсадки для обогащения различных полезных ископаемых, он не имеет однозначного и общепринятого теоретического толкования, как и нет единой точки зрения на физическую сущность самого процесса. Известные теоретические представления носят характер гипотез, базирующихся на определённых физических предпосылках.

Известны две теоретические модели отсадки: детерминистская и массово-статистическая.

В основе детерминистской модели отсадки заложено изучение закономерностей движения отдельного зерна в стеснённых условиях, в то время

как в массово-статистической модели – изучение закономерности движения совокупности зёрен.

Детерминизм – от латинского *determinare* – ограничивать, очерчивать, определять – учение о взаимосвязях и взаимной определённости всех явлений и процессов.

Детерминистская модель отсадки рассматривает скорости и ускорения движения отдельных частиц как функции их физических свойств: плотности, крупности, формы и т.д. и включает гипотезы начальных скоростей [19, 20] и ускорений [21, 22]; позволяет качественно оценить параметры процесса отсадки с выделением факторов, влияющих на расслоение материала, а также определить критерии движения частиц в постели отсадки.

Основным недостатком детерминистской модели является то, что скорости стеснённого падения и ускорения частиц в дифференциальных уравнениях движения отдельной частицы анализируются без учёта реальных условий, в которых прибывает отсадочная постель в течение цикла отсадки. Однако, эти уравнения могут отражать действительные аспекты механизма разделения в зависимости от физических свойств частиц и гидродинамических параметров движения жидкости в период, когда постель находится в разрыхлённом состоянии и происходит взаимное перемещение частиц [18].

Массово-статистическая модель базируется на суспензионной, энергетической и массово-статистической или вероятностно-статистической гипотезах. Так, суспензионная гипотеза рассматривает процесс обогащения методом отсадки, как процесс обогащения в тяжёлых суспензиях и считает, что процессы, протекающие при обогащении в тяжёлых суспензиях, справедливы для процессов обогащения методом отсадки.

Суть энергетической гипотезы заключается в том, что постель отсадки принято считать механически неустойчивой системой, в которой есть определённый запас потенциальной энергии. Благодаря этому материал постели способен занимать более энергетически выгодное положение,

сопровождающееся расслоением постели при действии на неё энергии извне (колебания решета или диафрагмы).

Массово-статистическая гипотеза определяет закономерности формирования постели отсадки и её физические факторы.

Каждая из вышеуказанных гипотез отражает только отдельные аспекты процесса отсадки.

Многие исследователи склоняются к сочетанию и взаимному дополнению детерминистской и массово-статистической модели.

Сепарация исходного питания методом отсадки возможна только в случае наличия между частицами обогащаемого материала необходимого пространства для их относительного перемещения между друг другом. Данное явление называется разрыхлением отсадочной постели и определяется коэффициентом разрыхления, равным отношению объёма свободного пространства между частицами к общему объёму, занимаемому слоем:

$$\theta = \frac{V_1 - V_2}{V_1}, \quad (1.6)$$

где V_1 – общий объём слоя, м³;

V_2 – объём занимаемый частицами, м³.

От степени разрыхления отсадочной постели и характера её изменения в течение цикла отсадки в большой мере зависит эффективность процесса сепарации. Так, при малом разрыхлении отсадочной постели наблюдаются значительное уменьшение скоростей опускания тяжёлых и подъёма лёгких частиц обогащаемого материала, а при переразрыхлении постели происходит перемешивание частиц с разной плотностью вследствие повышенной интенсификации их движения. В том и другом случае происходит ухудшение технологических показателей обогащения.

На практике степень разрыхления отсадочной постели определяют способом погружения руки в постель и подсчёте количества циклов до её полного погружения до отсадочного решета. Так, например, в россыпной золотодобыче, на основных операциях принято считать нормально

разрыхлённой постелю, при которой рука достигает решета за три – пять циклов отсадки.

Вывод: степень разрыхления отсадочной постели является одним из ключевых факторов, влияющих на процесс извлечения золота при применении отсадочного (в том числе и центробежно-отсадочного) метода обогащения.

Классификация отсадочных машин.

Существует более 90 конструкций отсадочных машины [22-30]. Современные отсадочные машины можно классифицировать по следующим признакам:

1. По среде процесса: гидравлические (в водной среде) и пневматические (воздушной среде);

2. По принципу динамического воздействия на обогащаемую среду: пневматические, поршневые, диафрагмовые (МОД), в том числе с подвижным конусом и с подвижным решетом.

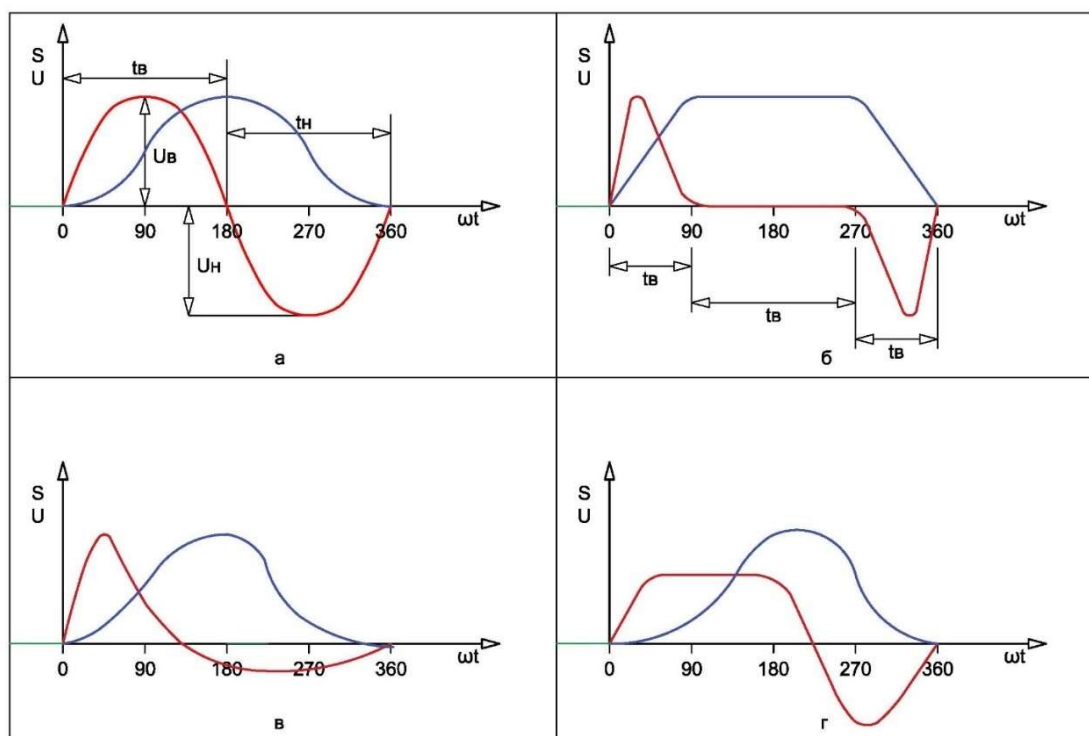
3. По способу передачи кинематической энергии на исполнительный механизм: механические и гидравлические, с механическим и гидравлическим приводом, соответственно.

4. По форме отсадочных камер: прямоугольные, трапециевидные, радиальные. В последних двух типах машин наблюдается постепенное уменьшение слоя материала при удалении от центра или начала загрузки, к сливному порогу.

5. По количеству получаемых продуктов обогащения: хвостовой продукт, надрешётный концентрат, подрешётный концентрат и подрешётный концентрат, полученный в режиме накопления.

6. По назначению: для обогащения мелкозернистого, крупнозернистого, неклассифицированного материала и шламов.

7. По виду цикла отсадки, закономерностей вертикальных перемещений среды относительно разделяемого материала в течение одного периода колебаний: циклы Майера, Бёрга, Томаса и гармонический (рис. 1.1.).



- скорость U



- путь перемещения среды S

а – гармонический цикл

б – цикл Майера

в – цикл Бёрда

г – цикл Томаса

Рисунок 1.1 – График циклов отсадки

В отечественной практике отсадочного обогащения широкое применение нашли диафрагмовые машина типа МОД.

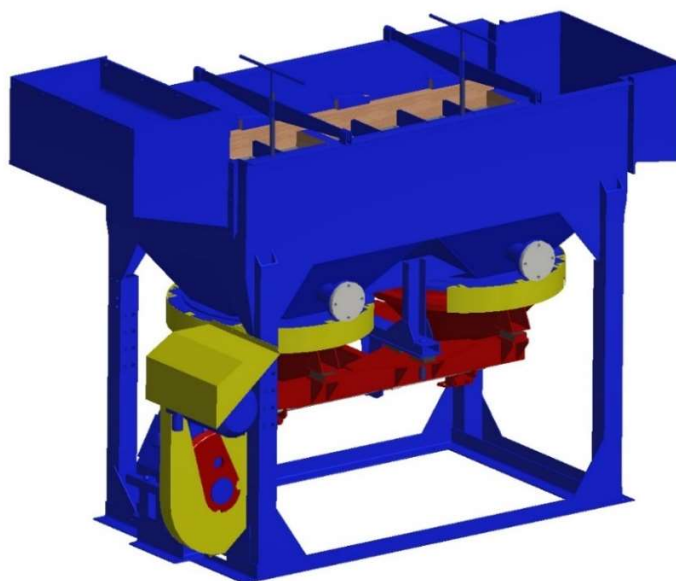


Рисунок 1.2 – Машина отсадочная типа МОД

1.2.2 Обзор теорий центробежного обогащения золотосодержащих руд и песков

Центробежное обогащение золотосодержащих руд широко применяется на зарубежных и отечественных фабриках. В нецентробежных гравитационных процессах, таких как отсадка и др., основной действующей силой, влияющей на отделение ценного компонента от пустой породы, является сила тяжести. В центробежных аппаратах возникает ещё и центробежная сила, которую можно описать формулой:

$$F_{\text{ц.б.}} = \frac{mv_i^2}{R_t}, \quad (1.7)$$

где m – масса зерна, кг;

v_i – тангенциальная скорость его движения, м/с²;

R_t – радиус кривизны траектории зерна, м.

В центробежных концентраторах центробежная сила, действующая на зерна в криволинейном потоке, в несколько порядков раз превышает силу тяжести. Именно в этих случаях процесс может называться центробежным обогащением.

Большое внимание уделяется изучению гидродинамики процесса потоков в центробежных сепараторах (концентраторах) разных конструкций, описанию механизмов разделения частиц в обогатительной чаше и моделированию процесса обогащения [33-34].

Описания движения жидкости во вращающемся центробежном поле решается с помощью модели эффективно-вязкого течения. Выражения для расчёта тангенциальной и радиальной скоростей жидкости получены при решении системы дифференциальных уравнений Навье-Стокса с постоянным коэффициентом турбулентной вязкости. Так же, для расчёта скоростей движения частиц в центробежном поле известны формулы Аллена, Риттингера и Лященко.

Формула для определения конечных скоростей свободного падения твёрдых частиц шарообразной формы в среде, которая позволила проанализировать

особенности поведения частиц в центробежном поле разной интенсивности, предложена Богдановичем А. В. [35-37]:

$$v = \frac{v}{d} \frac{Ar}{d(17,4 + 0,5\sqrt{Ar} + 0,7\sqrt[3]{Ar})}, \quad (1.8)$$

где $Ar = d^3 \frac{(\rho_T - \rho)}{\rho} \frac{g}{v^2}$ – критерий Архимеда

d – диаметр шаровой частицы, см;

ρ_T и ρ – плотности частицы и среды, г/см³;

g – ускорение силы тяжести, см/с²;

v – кинематическая вязкость, см²/с.

Профессором Федотовым К.В. и соавторами предложена численная модель для расчёта скоростей гидродинамических потоков в обогатительной чаше безнапорного центробежного концентратора при разрыхлении минеральной постели оживающей водой, подаваемой через отверстия в чаше [38, 39].

Закономерности разделения минеральных частиц в центробежно-вибрационных сепараторах с выводением формул, описывающих траекторию движения частиц, изучены и описаны Брагиным П.А. [40].

Существует мнение, что эффективность работы центробежных концентраторов зависит от песевдоукрупнения частиц, которое возникает в центробежном поле, и при котором поведение мелких частиц схоже с поведением более крупных [41, 42].

Основы теории процесса турбулизации в центробежном поле были рассмотрены в трудах Морозова Ю.П., Афанасьева А.И. и Водовозова, К.А. [39, 41-44]. Процесс турбулизации пристенного слоя в центробежном обогащении играет важную роль, поскольку подаваемая изнутри в пристеночный слой технологическая вода приводит к разрыхлению слоя с его освобождением от лёгких зёрен.

Все центробежные концентраторы можно разделить на напорные и безнапорные. К напорным относятся аппараты циклонного типа. При обогащении золотосодержащих руд применяются короткоконусные и

тяжелосредные гидроциклоны. К безнапорным аппаратам, работающим по принципу центрифуги с наложением процессов, происходящих в шлюзе при обогащении материала – центробежные концентраторы.

В большинстве безнапорных центробежных аппаратов исходное питание в виде пульпы подаётся в центральную часть вращающейся обогатительной чаши сверху. При достижении дна пульпа под действием центробежной силы меняет своё направление на обратное и начинает двигаться вверх по стенкам чаши к её сливному порогу, одновременно закручиваясь. Участвуя в вынужденном вращении, жидкость образует в роторе параболоид вращения, уравнение свободной поверхности которого определяется из закономерностей вынужденного вращения:

$$r_i = \frac{\sqrt{2g(p-p_0)}}{w}, \quad (1.9)$$

где r_i – радиус вращения внутренней поверхности жидкости, мм;

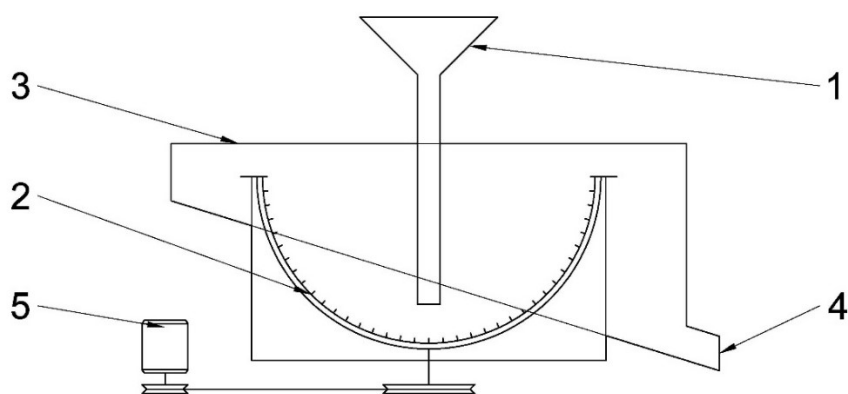
p и p_0 – статическое давление потока соответственно в точке с $r=r_i$ и в нижней точке $r=0$, Н/м²;

w – угловая скорость вращения жидкости, рад/с.

Центробежные концентраторы разделяются по способу разрыхления материала:

- центрифуги, работающие без разрыхления минеральной постели;
- с механическим разрыхлением постели;
- с вибрационным разрыхлением постели;
- с гидродинамическим разрыхлением постели.

Принцип работы центрифуг, работающих без разрыхления минеральной постели (в режиме накопления концентрата в межрифлиевом пространстве), аналогичен процессу обогащения на шлюзах с наложением центробежного поля (рис. 1.3).



1 – пустотелый питающий вал; 2 – чаша; 3 – корпус; 4 – сливной желоб; 5 - привод

Рисунок 1.3 – Схема-безнапорного концентратора

Обогащаемый материал занимает всё свободное место в межрифлиевом пространстве и постоянно насыщается зернами ценных минералов, которые вытесняют более легкие частицы, повышая содержание ценного компонента в концентрате. Данное замещение происходит до определённого момента, а затем обогащенный материал между рифлями чаши концентратора достигает плотности, сопоставимой с удельным весом извлекаемого ценного компонента, а под действием центробежной силы частицы материала цементируются, что не позволяет больше обогащаться концентрату.

В центрифугах наступление предельных значений плотности концентрата и максимальное содержание в нём ценного компонента достигается очень быстро, что требует частой остановки и разгрузки концентрата.

Достоинствами центрифуг являются: простота конструкции (рис. 1.4) и обслуживания, а недостатком – быстрая цементация материала в межрифлиевом пространстве и неспособность эффективно извлекать ценный компонент средних и мелких фракций крупности по этой причине.

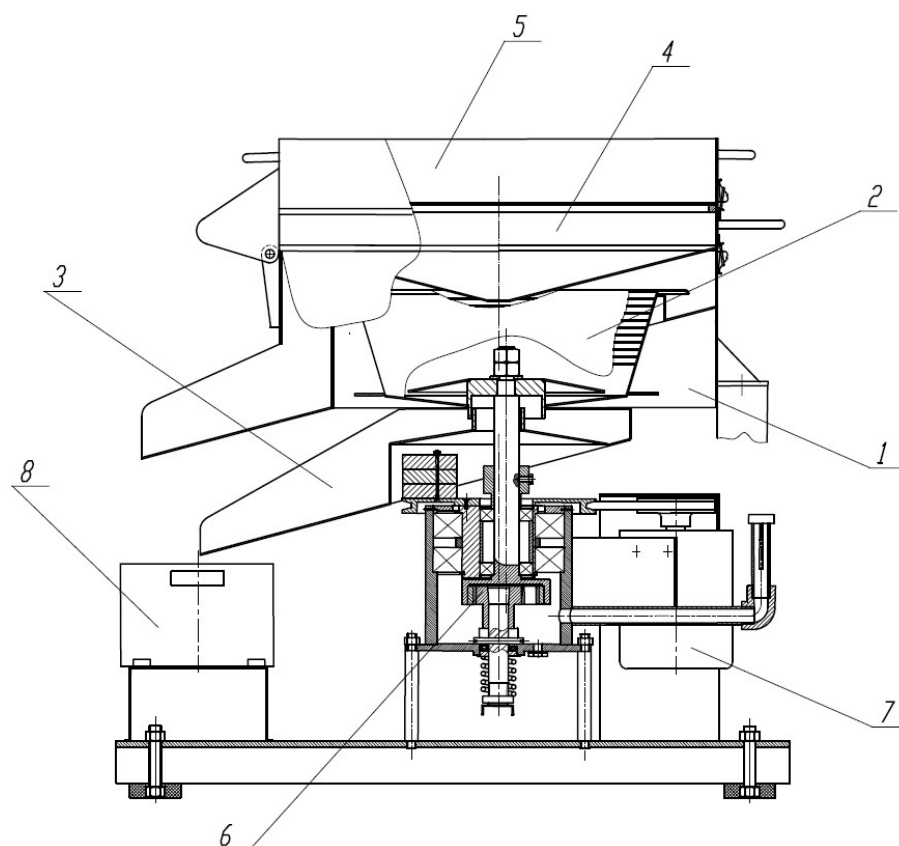
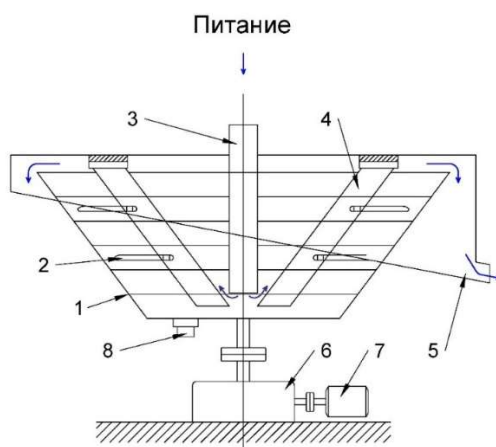


Рисунок 1.4 –Конструкция концентратора КР-400

Обогатительным звеном концентратора является чаша (2) с конусообразными рифлями, закрепленная на валу с помощью двух гаек, шпонки и шайбы. Корпус концентратора (1) служит кожухом для защиты от всех движущих узлов аппарата, а также является желобом для вывода хвостовых продуктов из чаши. Питание концентратора материалом производится через загрузочный бункер (5), состоящий из сита, и воронку (4). Торможение вращения чаши производится путём нажатия на педаль, которая соединена с тормозом, расположенным в нижней части корпуса (1).

В концентраторах с механическим разрыхлением постели происходит процесс сегрегации частиц, т. е. просеивание тонких частиц через промежутки между более крупными зёрнами. В этих аппаратах содержание тонких и мелких частиц в концентратах несколько выше, чем в исходной смеси.

Ярким представителям концентраторов данного типа является центробежный концентратор «Орокон» (см. рис. 1.5).



1. Конус. 2. Рыхлители. 3. Центральная труба питания.
4. Вертикальные консоли. 5. Сливной желоб. 6. Редуктор.
7. Электродвигатель. 8. Винтовая пробка.

Рисунок 1.5 – Схематичное изображение концентратора «Орокон-М30».

Концентраторы «Орокон» нашли применение при доизвлечении золота из хвостовых продуктов шлюзовой технологии обогащения россыпного золота.

К достоинствам концентраторов данного типа можно отнести простоту конструкции и относительно крупный максимальный размер исходного питания, до 15 мм. К недостаткам – низкое извлечение золота средних и мелких классов крупности ввиду невысокой центробежной силы, не более 15G.

Если аппараты используют для разрыхления постели потоки воды, то этот процесс называется флюидизация или псевдоожижение. На данном принципе работают центробежные концентраторы Knelson, Falcon, Итомак (1.6-1.8) и другие.

Способ обогащения заключается в переводе твёрдой, сыпучей в сухом состоянии массы в псевдосостояние, характерное для жидких масс [45, 48]. Иными словами, происходит насыщение сконцентрированного в межрифлиевом пространстве чаши центробежного концентратора материала жидкостью, подаваемой под давлением с внешней стороны чаши, с целью вытеснения частиц, имеющих меньшее значение удельного веса, от извлекаемого ценного компонента. Этот способ обеспечивает два процесса сепарации частиц – классифицирующий и сегрегационный.

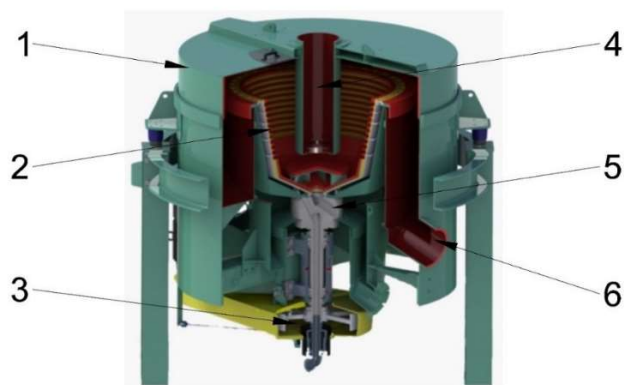
Оба способа происходят в два этапа: первый – в потоке пульпы вдоль стенки вращающегося ротора, второй этап – в постели, в зонах накопления гравиконцентрата.

К достоинствам этого способа можно отнести его способность поддерживать обогащённый продукт в межрифлиевом пространстве чаши во взрыхленном состоянии относительно долго и разгружать высоко обогащённый концентрат.

Недостатками являются:

- селективность при улавливании и удержании в обогащённом продукте мелких по размеру частиц ценного компонента, которые уже находятся в придонном минеральном слое. Однако этот недостаток легко предотвратить, правильно подобрав соотношение центробежной силы и объём подачи флюидизационной воды;

- невозможность использования для псевдоожижения технологической воды, содержащей механические и минеральные включения, способные запрессовать флюидизационные отверстия в чаши концентратора. Данный недостаток является основным определяющим фактором, ограничивающим применение центробежных концентраторов с псевдоожижением, или требует применения дополнительных систем фильтрации технологической воды.



1 – корпус; 2 - обогатительная чаша; 3 - механизм привода; 4 - питающая труба;
5 -устройство вывода концентрата; 6 - устройство вывода хвостов

Рисунок 1.6 – Общий вид центробежного концентратора Knelson QS

Отличительной особенностью центробежных концентраторов фирмы Итомак является наклонная или горизонтальная ось вращения ротора (обогащительной чаши).



Рисунок 1.7 – Общий вид мультироторного комплекса «Итомак-КГ-100» на базе центробежных концентраторов «Итомак-КГ-40»

Центробежный концентратор фирмы Falcon (Sepro) также использует способ псевдооживления для разрыхления обогащённого слоя материала в межрифлиевом пространстве.

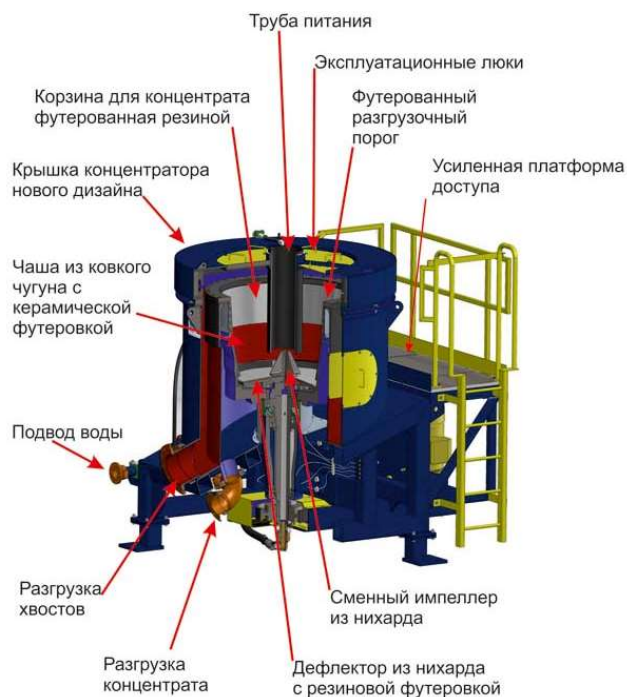


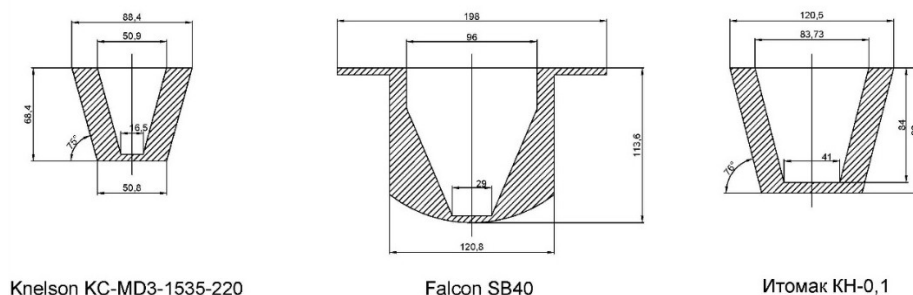
Рисунок 1.8 – Схема устройства центробежного концентратора Falcon SB
Сама конструкция концентраторов Falcon имеет ряд отличий:

– обогатительная чаша имеет канавки (рифли) для накопления концентрата только в верхней части, за счёт чего уменьшается общий объём обогащённого продукта;

– в основании ротора (обогатительной чаши) установлен импеллер с целью отбрасывания поступающего в центральную часть чаши исходного питания к периферии чаши, что по мнению конструкторов данных моделей обеспечивает более скорое придание обогащаемому материалу центростремительного ускорения;

– более высокая центробежная сила.

Обогатительные чаши центробежных концентраторов Knelson и Итомак схожи. Они имеют прямую наклонную поверхность с размещением рифлей по всей длине чаши. Чаша Falcon отличается комбинированием наклонной поверхности в нижней части и вертикальной (или меньшим наклоном) в верхней с размещением в последней концентратных рифлей (рис. 1.9).



Knelson KC-MD3-1535-220

Falcon SB40

Итомак КН-0,1

Все размеры даны для справок

Рисунок 1.9 – Схематичное изображение обогатительных чаш лабораторных центробежных концентраторов фирм Knelson, Falcon и Итомак

Таблица 1.4 – Сравнение центробежных сил в лабораторных моделях наиболее распространённых центробежных концентраторах

Наименование (модель) аппарата	Сила G, max
Итомак КН-0,1	90
Knelson KC-MD3	120
Falcon SB40	300

Выводы: все конструкции обогатительных чаш центробежных концентраторов подразумевают накопление богатого продукта в межрифлиевом пространстве чаш. Для предотвращения цементации концентрата применяют ожижающую воду, подаваемую под давлением с наружной стороны чаши. К механической чистоте (отсутствию твёрдых включений) в ожижающей воде предъявляются высокие требования. Общей особенностью работы центробежных концентраторов является невозможность постоянного вывода концентрата из процесса обогащения. Производители концентраторов добиваются постоянного или регулируемого вывода концентрата из процесса обогащения, применяя:

- периодическую разгрузку, с перенаправлением питания на период разгрузки концентратора на другой концентратор или в буферную ёмкость;
- устройства регулируемой разгрузки.

В обоих случаях объём концентрата незначителен и составляет не более 0,5-2 %, что при обогащении высоко сульфидной руды (содержание сульфидов более 2 %) приведёт к сверхнормативным потерям золота или необходимости увеличения фронта центробежного обогащения [45].

1.2.3 Центробежно-отсадочное обогащение золотосодержащих руд и песков

Центробежно-отсадочное обогащение (ЦОО) полезных ископаемых в настоящее время является менее изученным, в отличие от других эффективных методов гравитационного обогащения, таких как обогащение на шлюзах, отсадочных машинах, центробежных концентраторах и концентрационных столах.

В то же время ЦОО, по заключению специалистов, может найти широкое применение при переработке золотосодержащих руд и россыпей, обеспечивая непрерывный и регулируемый выход концентрата при высоком извлечении в него золотосодержащих сульфидов, свободного мелкого, тонкого золота и платиноидов, а также других ценных шлиховых минералов (ильменита, магнетита, циркона, рутила и др.).

Использование сочетания двух факторов: обогащение методом отсадки и наложение центробежного поля, является современным направлением в гравитационном обогащении полезных ископаемых.

Известно несколько моделей ЦОМ: ОАО «Иргиредмет» [8], Cambell [49], Cross [50], Sprow [51], Митин [52], Kelsey [53], а также Laser, U. & Wagener, W. 1994; Beniuk, V.G., Vadeikis, C.A., Enraght-Moony, J.N.[54].

Наибольшую популярность и распространение среди машин этого класса получила созданная в Австралии центробежная отсадочная машина Kelsey, которая испытана и эксплуатируется на ряде предприятий по добыче и переработке руд драгоценных, цветных, редких (ильменит, рутил, циркон, танталит, вольфрамит и другие) и черных металлов. По литературным данным центробежная отсадочная машина эффективно может извлекать железосодержащие минералы крупностью до 5 мкм, при этом извлечение тяжёлых минералов крупностью менее 53 мкм достигает 90 % [55].

Принцип действия ЦОМ заключается в принудительном разделении минеральных зерен по удельным весам методом отсадки, основанном на принципе разности в скоростях стесненного падения частиц. При этом на разделяемые минералы одновременно воздействуют поступательный поток пульпы, вращательное движение отсадочной камеры, с помощью которого к частицам прикладывается центробежная сила, в десятки раз превышающая силу тяжести и пульсирующее движение водяного потока.

Общие виды центробежных отсадочных машин Kelsey (Mineral Technologist) и ЦОМ-5 («Иргиредмет») приведены на рисунках 1.10 и 1.11, соответственно.

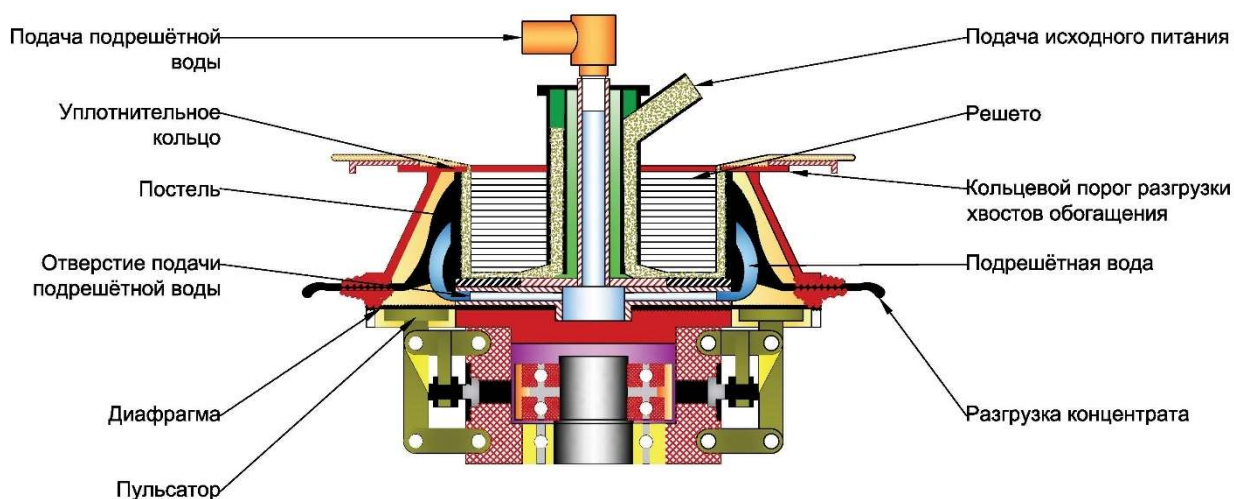


Рисунок 1.10 – Схема центробежной отсадочной машины Kelsey.

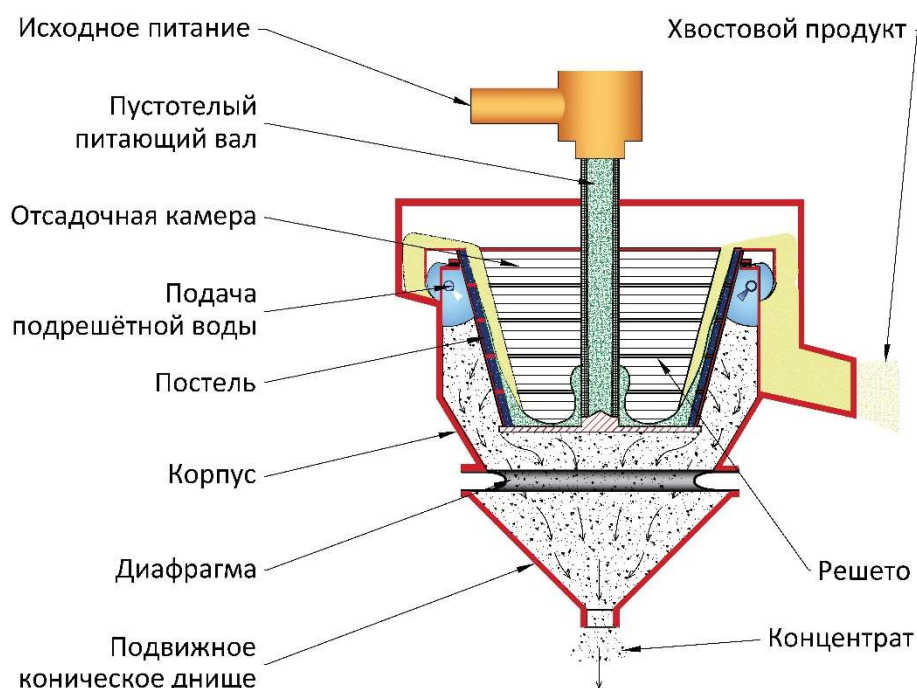


Рисунок 1.11 – Схема центробежной отсадочной машины ЦОМ

Разработанная в ОАО «Иргиредмет» центробежно-отсадочная машина объединила в себе возможности центробежных концентраторов (обогащения золота мелких классов крупности), за счёт приложения к обогащаемому материалу центробежной силы и способности отсадочных машины осуществлять постоянный вывод концентрата через отсадочную постель и сетчатый корпус отсадочной камеры.

К недостаткам центробежно-отсадочного обогащения относятся:

- сложность, по сравнению с центрифугами, конструкции аппаратов;
- большое количество технических параметров влияющий на процесс обогащения как по отдельности, так и в комбинации друг с другом;
- необходимость проведения большого числа натурных экспериментов для повышения эффективности разделения частиц при наложении комбинации центробежных и гравитационных сил;
- необходимость создания математических моделей для определения оптимальных условий обогащения.

1.3 Научные исследования в области моделирования процессов центробежного и отсадочного обогащения

В отечественной и зарубежной литературе описаны несколько попыток математического моделирования процессов центробежного и отсадочного обогащения.

В частности, известны работы Кизевальтера Т.Б., Виноградова Н. Н., Рафалес-Ламарка Э. Э., Огрупповых В.А. и А.В.

Одной из последних работ в данной тематике является работа группы исследователей Слепцовой Е.С., Никифоровой Л.В., Яковлева Б.В. и Матвеева А.И. – «Математическое моделирование процесса концентрации тяжелых частиц в постели отсадочной машины».

Представлена математическая модель движения тяжелых частиц в окружении зерен в отсадочной машине. Зерна моделируются шарами определенного радиуса. Рассмотрен статистический подход для описания процесса. При этом используется модель движения броуновской частицы, в которой вместо кинетической энергии хаотического теплового движения молекул, бомбардирующих броуновскую частицу, учитывается кинетическая энергия зерен, окружающих рассматриваемое зерно тяжелой частицы и движущихся под воздействием вибрирующей силы отсадочной машины. Эта сила зависит от параметров циклов отсадки: амплитуды и частоты. В результате математического моделирования получено уравнение типа Фоккера-Планка для

фракций, распределяемых по плотности в камере отсадочной машины. Получены динамические кривые распределения тяжелых зерен по высоте постели. Полученные распределения позволяют при заданных значениях исходных фракций (например, в процентах от общего объема) с равномерным начальным распределением вычислить вероятное время, за которое образуется некоторый заданный слой материала на дне емкости отсадочной постели с определенным распределением тяжелой (полезной) фракции. Результаты модели важны для описания надрешетного варианта отсадки, применительно к обогащению алмазов, наиболее важными параметрами, из которых являются время полноты осаждения тяжелых фракций из потока минералов в зоне отсадки и высота зоны концентрации (объем извлекаемых надрешетных концентратов).

Несмотря на то, что центробежный метод обогащения достаточно широко известен и изучен, в прогнозирование процесса действия частиц минералов постоянно вносятся изменения и уточнения [57, 58].

Это объясняется трудностью описания процессов, происходящих при обогащении в центробежном сепараторе. На сложность описания турбулентного режима течения пульпы указывается в работе [59] и применяется метод конечных элементов для расчётов динамики движения минеральных смесей в воде. Суть метода заключается в поиске решений дифференциальных уравнений разделения на конечное количество элементов, и в каждом из элементов произвольно выбирается вид аппроксимирующей функции.

В работе [60] представлена математическая модель, описывающая поведение минерального зерна в двухфазном потоке, образующемся в центробежном сепараторе и на его твёрдой стенке, в зависимости от факторов крупности, расхода, плотности питания и количества разрыхляющей воды. Изменяя эти факторы, можно управлять процессом обогащения различного по составу минерального сырья.

Фалей Е.А. при помощи математической модели описывает сегрегационный механизм формирования пристеночного слоя в турбулизационном центробежном сепараторе, заключающийся в продвижении

частиц повышенной плотности внутрь пристеночного слоя между породными частицами, обусловленном действием турбулизирующей воды. На основе рассмотрения действующих на частицы в пристеночном слое сил определено условие перемещения тонкодисперсных частиц повышенной плотности по поверхности крупных породных частиц внутрь пристеночного слоя в его уплотненном состоянии [62]. Автор рассматривает механизм расслоения материала в пазах турбулизационного центробежного сепаратора на примере пристеночного слоя, состоящего из шарообразных частиц кварца крупностью 0,1 мм и частиц золота крупностью 0,01 мм. В работе приводится расчёт обмера пристеночного слоя и отмечается, что при формировании пристеночного слоя определяющее значение имеет процесс сегрегации материала, при котором тонкодисперсные частицы повышенной плотности продвигаются внутрь пристеночного слоя между породными частицами, а подача турбулизирующей воды в пристеночный слой изнутри конуса сепаратора создает условия для эффективной сегрегации материала в пазах.

Математическое моделирование процесса обогащения позволяет исключить или значительно сократить количество натурных экспериментов, проводимых с целью нахождения оптимальных технических параметров работы обогатительного аппарата.

1.4 Выводы по главе. Постановка задачи исследования обогащения золотосодержащих руд методом отсадки в центробежном поле

Анализ современного состояния теории и практики обогащения золотосодержащих руд и песков традиционными методами гравитационного показал следующее:

- традиционные технологии гравитационного обогащения можно разделить на методы, которыми эффективно улавливается крупное золото, золото средней крупности и мелкое золото;

- эффективность процесса центробежно-отсадочного обогащения определяется основными факторами, такими как: крупность и удельный вес

сепарируемых материалов, а также разница между значениями вышеуказанных факторов для ценного компонента и пустой породы.

– аппараты для эффективного извлечения золота мелких классов крупности, как правило, требуют узкой классификации исходного питания и отсутствия механических включений в оживающей технологической воде;

Следовательно, необходим поиск новых и/или комбинированных методов обогащения золотосодержащих руд и песков, исключающий повышенные требования к технологической воде и узкой классификации исходного питания, которые при этом будут обладать высокими технологическими показателями извлечения золотосодержащего сырья в концентрат и невысоким его выходом. Одним из таких методов является центробежно-отсадочное обогащение, которое ввиду конструктивной сложности обогатительного аппарата и отсутствия инструментов для прогнозирования параметров обогащения при тех или иных режимах работы, не находит широкого применения в процессах обогащения золотосодержащих руд.

В связи с этим целью данной работы является определение оптимальных технологических режимов извлечения золота на основе совершенствования обогащения методом отсадки в центробежном поле и разработки конструкции аппарата для её реализации.

Для решения поставленной задачи - оптимизации процесса обогащения золотосодержащего сырья методом отсадки в центробежном поле необходимо:

1. Обосновать целесообразность и эффективность применения отсадки в центробежном поле для обогащения золотосодержащих руд и песков.

2. Разработать конструкцию ЦОМ, изготовить и испытать промышленный образец.

3. Экспериментально, путем проведения опытно-промышленных исследований по обогащению золотосодержащего сырья методом отсадки в центробежном поле, выявить влияние режимов работы ЦОМ, таких как: максимальная производительность, выход концентрата и хвостов, уровень извлечения золота, расход подрешетной воды при различной

производительности машины, потребляемая мощность и др., на технические и технологические показатели процесса обогащения.

4. Разработать математическую модель, позволяющую прогнозировать значения извлечения и содержания золота в концентрате ЦОМ.

5. Обосновать возможность повышения эффективности процесса обогащения в ЦОМ посредством анализа полученных при натурных испытаниях данных, их сопоставления с результатами математического моделирования и оптимизации регулируемых технических параметров обогащения.

6. На основе действующей технологической схемы ЗИФ разработать схему цепи аппаратов с применением ЦОМ для доизвлечения золота из хвостовых продуктов фабрики.

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ОБОГАЩЕНИЯ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ РУД И ПЕСКОВ МЕТОДОМ ОТСАДКИ В ЦЕНТРОБЕЖНОМ ПОЛЕ

2.1 Обоснование возможности повышения уровня извлечения золота методом отсадки в центробежном поле. Обоснование необходимости конструирования нового центробежного аппарата - центробежной отсадочной машины

На обогащаемые методом отсадки в центробежном поле зерна ценного компонента и пустой породы действуют силы, возникающие в центробежном поле и при стеснённом падении частиц при отсадке (рисунок 2.1).

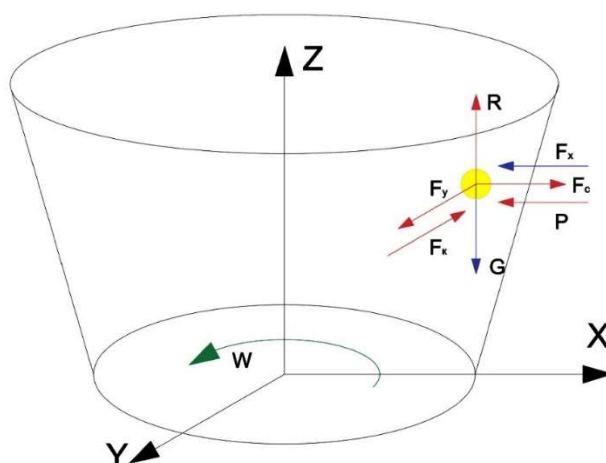


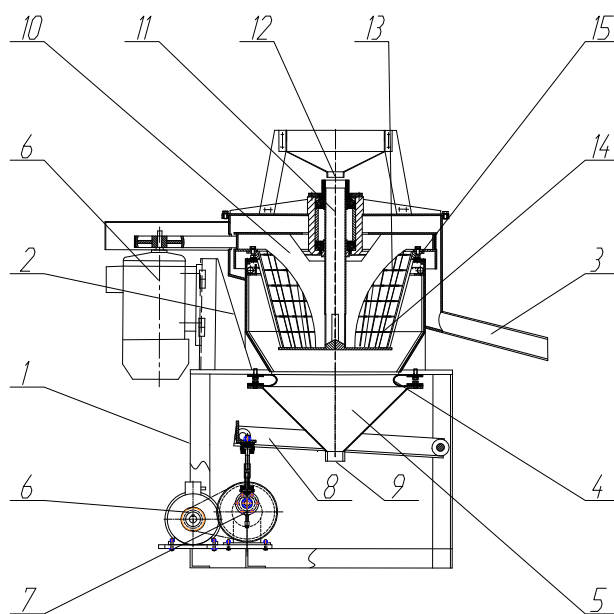
Рисунок 2.1 – Силы, действующие на зерно, сепарируемое методом отсадки в центробежном поле

Возникающая в центробежном поле центробежная сила F_c направлена перпендикулярно оси вращения отсадочной камеры, сила Кориолиса F_k учитывается при рассмотрении относительного движения частицы. Им противодействуют силы сопротивления F_x и F_y и сила динамического сопротивления среды при стеснённом движении P , которая возникает за счёт создаваемых пульсаций. Выталкивающая сила R направлена перпендикулярно вверх, а сила тяжести G вниз.

Сила динамического сопротивления среды P разрыхляет отсадочную постель, создавая возможность прохождения зерен ценного компонента через неё в концентрат.

Таким образом, можно сделать вывод, что наложение центробежного поля на процесс отсадки будет способствовать повышению уровня извлечения ценного компонента.

Согласно разработанному и утвержденному плану исследований для проверки вышеуказанной гипотезы, была разработана конструкторская документация, изготовлена и испытана в промышленных условиях центробежно-отсадочная машина производительностью 5–15 т/ч для гравитационного обогащения руд цветных и благородных металлов.



- | | |
|-------------------------------|---|
| 1 – опорная рама; | 9 – разгрузочное отверстие для концентрата; |
| 2 – корпус; | 10 – отсадочная камера, |
| 3 – желоб для отвода хвостов; | 11 – пустотелый вал; |
| 4 – диафрагма; | 12 – подшипники опорные; |
| 5 – подвижный конус; | 13 – корзина отсадочной камеры; |
| 6 – электродвигатель; | 14 – сетчатый конус отсадочной камеры; |
| 7 – редуктор; | 15 – гидроуплотнение |
| 8 – подвижная рама; | |

Рисунок 2.2 – Конструкция отсадочной машины ЦОМ

Порядок работы ЦОМ конструкции ОАО «Иргиредмет», следующий: продукт поступает в пустотелый вал чаши, технологическая подрешётная вода поступает в корпус машины через кольцевой коллектор, расположенный в зоне гидроуплотнения, что позволяет кроме основной задачи (поддержания уровня давления воды в корпусе машины) также отсекаать абразивный материал (концентрат), не давая ему попадать на кольца гидроуплотнения и изнашивать их. Основные технические характеристики ЦОМ приведены в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Техническая характеристика центробежной отсадочной машины
ЦОМ

Наименование параметра, единицы измерения	Значение параметра
Число отсадочных отделений, шт.	1
Рабочая площадь решета, м ²	0,97
Производительность по исходному питанию, т/ч, до	15
Крупность питания, мм, не более	10
Частота вращения отсадочной камеры, мин ⁻¹	47-400
Частота качаний подвижного конуса, мин ⁻¹	180-360
Длина хода подвижного конуса, мм	0-40
Мощность электродвигателя привода отсадочной камеры, кВт	15
Мощность электродвигателя привода подвижного конуса, кВт	7,5
Габаритные размеры, мм: длина, ширина, высота	2250x1220x2275
Масса машины, кг	1600

В состав ЦОМ входит корпус 2, закреплённый на опорной раме 1 (рис. 2.2).

Внутри корпуса 2 находится отсадочная камера 10 конусообразной формы, закреплённая на пустотелом валу 11, с двумя верхними подшипниковыми опорами 12.

Отсадочная камера состоит из корзины 13 с проницаемой боковой поверхностью, внутрь которой вложен сетчатый конус 14 и прижимной конический трафарет.

В дне корзины есть два отверстия для разгрузки надрешётного продукта, служащих для выгрузки через них искусственной и естественной постели, закрытых во время работы пробками.

В узле уплотнения зазора 15 между вращающейся отсадочной камерой и неподвижным корпусом применена конструкция на основе тонкой щели с двумя фторопластовыми кольцами, одно из которых закреплено на корпусе, через прижимное резиновое кольцо, а второе – жёстко на отсадочной камере.

Отсадочная камера под средством ременной передачи приводится в круговое движение. Регулирование скорости вращения отсадочной камеры и, следовательно, изменение значения центробежного ускорения обогащаемого материала в рабочей зоне отсадочной камеры осуществляется с помощью частотного преобразователя скорости вращения электродвигателя.

Подрешетная вода подается по специальному трубопроводу с возможностью направления части потока в зону гидроуплотнения. Расход воды регулируется вентилем.

Исходный продукт (материал) поступает в ЦОМ через пустотелый вал 11 в верхней части которого установлена загрузочная воронка. Материал достигает дна отсадочной камеры и центробежным ускорением распределяется на внутренней части отсадочной камеры, поверх отсадочной (искусственной и естественной) постели. Одновременно сепарируемый материал подвергается воздействию сил гравитационного разделения отсадкой. Частицы с большим удельным весом проникают через пульсирующую постель. Пульсация создается возвратно-поступательными колебаниями подвижного конуса 5. Прошедший в подрешетное состояние через проницаемую поверхность отсадочной камеры материал попадают в неподвижный корпус, где, опускаясь, разгружаются через разгрузочное устройство подвижного конуса. Материал с низким удельным весом движется вверх и через сливной порог разгружается в хвостовой жёлоб корпуса 3.

Проведение научно-исследовательских работ по обогащению золотосодержащего материала было осуществлено на действующих ЗИФ ОАО «Покровский рудник» и ОАО «Высочайший».

2.2 Исследования влияния режимов работы ЦОМ на показатели обогащения

Задачей работы является 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 при испытании экспериментального образца центробежно-отсадочной машины (ЦОМ), разработанной в ОАО «Иргиредмет» по предварительно разработанным программам и методикой проведения испытаний. В методике использовались термины в соответствии с ГОСТ 15895–77 и ОСТ 48-242-84. Климатическое исполнение УХЛ4 по ГОСТ 15150–75.

Испытания проводили, в том числе, для определения соответствия экспериментального образца техническому заданию, технической документации, результатам оценки технического уровня, правилам безопасности и определения технологической эффективности обогащения золотосодержащего материала на центробежной отсадочной машине.

Условия проведения исследований по определению технологических режимов обогащения ЦОМ и выявления значимых параметров, влияющих на процесс интенсификации обогащения, была приведены в разработанной и утвержденной методике проведения испытаний. Методика предполагала первоначальное теоретическое определение значимых факторов, влияющих на процесс обогащения в центробежной отсадочной машине [63]. Эти факторы были разделены на три группы.

Первая группа, общая, – учитывает конструктивные особенности ЦОМ:

- отношение Т: Ж в питании;
- производительность по питанию;
- удельный расход технологической воды, подаваемой в зону гидроуплотнения.

Вторая группа – факторы, характерные для центробежных концентраторов:

- частота вращения отсадочной камеры;
- центробежная сила.

Третья группа – факторы, характерные для отсадочных машин:

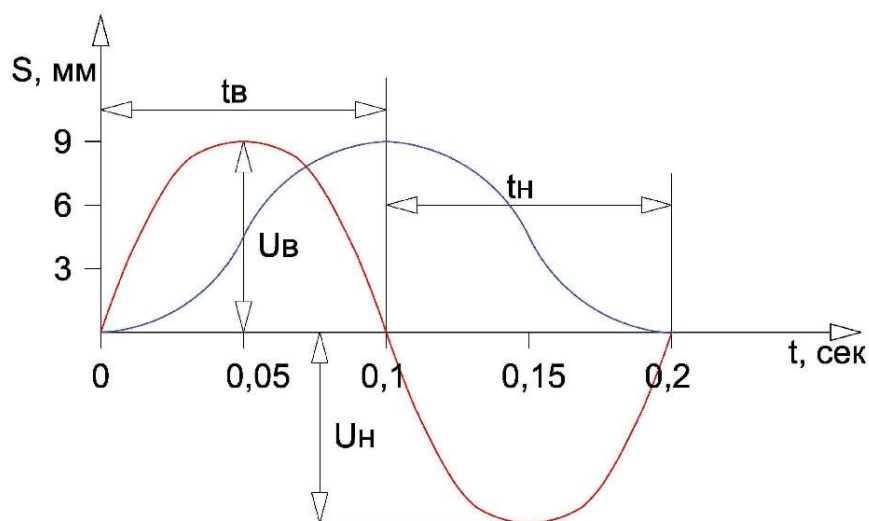
- амплитуда колебаний подвижного конуса;
- частота хода подвижного конуса;
- удельный расход подрешетной воды;
- характеристики искусственной постели (удельный вес, крупность, высота слоя постели).

Предполагалось, что главенствующими параметрами, влияющими на процесс обогащения в ЦОМ, будут:

- скорость вращения отсадочной камеры, а точнее – величина центробежной силы;
- частота колебаний подвижного конуса;
- амплитуда колебаний подвижного конуса.

Характеристика обогащаемого материала (грансостав, удельный вес и т. д.) были приняты неизменяемыми на всё время проведения исследований.

Для колебаний подвижного конуса ЦОМ был выбран и применён симметричный, гармонический цикл колебаний с синусоидальным изменением скорости среды во времени. Выбор был основан на необходимости создания достаточно высокого числа колебаний подвижного конуса, более 200-250 раз в минуту для поддержания искусственной и естественной постели ЦОМ в разрыхлённом состоянии.



S – путь перемещения среды; U – скорость перемещения среды;
 t_v и t_n – длительность подъёма и опускания среды.

Рисунок 2.3 – График циклов ЦОМ-5

Перед началом исследований было выдвинуто предположение, что частота пульсации, совместно с амплитудой колебаний подвижного конуса, воздействует на постель ЦОМ, по всей вероятности, аналогично их воздействию в классических диафрагмовых отсадочных машинах [24].

В качестве начальных технических параметров настройки ЦОМ были приняты значения частоты и амплитуды колебаний, полученные при эксплуатации диафрагмовых отсадочных машин типа МОД на схожих продуктах обогащения. Так, по данным института Иргиредмет, а также других исследовательских организаций минимально извлекаемая классической отсадочной машиной крупность золота может составлять 50 мкм [20]. Для достаточно полного и надёжного извлечения золота отсадкой крупностью 0,15-0,1 мм должны быть выполнены ряд условий: узкая классификация исходного продукта, оптимальный водный режим, невысокая удельная нагрузка по твердому, амплитуда пульсаций подвижного днища 6-10 мм, частота пульсаций не менее 200 раз в минуту.

Предполагалось, что при увеличении скорости вращения отсадочной камеры и возрастании центробежной силы потребуется увеличение частоты и/или амплитуды восходящих и нисходящих пульсаций, разрыхляющих постель

ЦОМ. Увеличение частоты вращения отсадочной камеры ЦОМ неизбежно приведёт к следующим явлениям:

- увеличению центробежной силы;
- уменьшению расстояния между зернами постели и её уплотнению;
- снижению водонасыщения постели вследствие отделения большего количества жидкости от твёрдого материала в центробежном поле;
- сокращению времени нахождения материала внутри рабочей зоны ЦОМ.

Вышеуказанные явления проявляются, когда центробежная сила, направленная от центра вращения отсадочной камеры, превышает силу пульсации, чей вектор силы обратно пропорционален центробежной силе.

В большинстве случаев, по данным эксплуатации ЦОМ Kelsey, повышение частоты пульсаций приводит к увеличению извлечения ценного компонента и снижению качества концентрата [51]. Аналогичные выводы были получены при обработке результатов исследований ЦОМ-5 на ЗИФ «Покровский рудник» и ЗИФ «Высочайший».

В общих случаях при обогащении золотосодержащего материала на диафрагмовых отсадочных машинах в несколько стадий, например: основная отсадка, первая перечистная отсадка и вторая перечистная отсадка, частота пульсаций возрастает при каждом последующем переделе [64-66]. Это связано с тем, что концентрат отсадки в каждом последующем переделе состоит из большего количества тяжелых минералов, что сокращает разницу между удельными весами зерен разных минералов. Кроме того, как правило, с каждой перечистой операцией возрастает в процентном отношении и объём искусственной постели, которая, чаще всего, представлена металлическими шариками.

2.3 Программа и методика опытно-промышленных испытаний ЦОМ

Программой и методикой испытаний предусмотрена проверка соответствия конструкции экспериментального образца требованиям безопасности и проверка

показателей назначения и экономичности использования материалов и электроэнергии, в том числе:

- техническая и технологическая производительности центробежной отсадочной машины;
- технологические показатели обогащения (выход продуктов обогащения, содержания золота и его извлечение в концентрат);
- амплитуда колебаний подвижного конуса, частота хода подвижного конуса, частота вращения отсадочной камеры (ротора);
- удельная производительность, удельный расход электроэнергии двигателей подвижного конуса и отсадочной камеры как отдельно, так и суммарно;
- удельный расход подрешетной воды;
- удельный расход воды, подаваемой на гидроуплотнение.

Первоначально в программе испытаний были заложены показатели настраиваемых технических параметров, которые представлены в таб. 2.1.

Таблица 2.1 – Настраиваемые технические параметры работы ЦОМ и их показатели

Параметр	Значение параметра
Амплитуда колебаний подвижного конуса, мм	6, 8, 10, 12, 14, 16
Частота хода подвижного конуса, мин ⁻¹	180, 220, 260, 300, 360
Частота вращения отсадочной камеры, мин ⁻¹	100, 200, 250, 300, 350, 400
Производительность, т/ч	5, 10, 15, 20, 25

Методика испытаний разрабатывалась с учетом следующих требований: Правила безопасности при проведении исследований и испытаний разработанные на основе «Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей» и «Правил техники безопасности при эксплуатации

электроустановок потребителей»: утвержденных приказом министерства энергетики РФ от 13.01.2023 № 6.

Основные пункты методики испытаний центробежной отсадочной машины изложены ниже:

1. Правила подготовки к исследованиям, включающие внешний осмотр всех механизмов и систем управления центробежной отсадочной машины, а также проверку комплектности, монтаж, наладку и обкатку машины в соответствии с руководством по эксплуатации, проверку установки регулируемых параметров (частота пульсаций, скорость вращения отсадочной камеры, амплитуда пульсаций, расход подрешетной воды и воды, подаваемой на гидроуплотнения), проверку состояния и готовности к работе основного и вспомогательного оборудования, работающего в одной технологической цепи с центробежной отсадочной машиной, проверку наличия и надежности заземлений всех устройств и корпуса машины.

2. Порядок проведения исследований с указанием определяемых технических и технологических показателей при различных технологических режимах работы аппарата, таких как:

- максимальная производительность отсадочной машины;
- выход концентрата и хвостов;
- уровень извлечения золота;
- расход подрешетной воды при различной производительности машины.

3. Пуско-наладочные работы, включая график организации работ, предварительный подбор наиболее эффективных режимов работы ЦОМ, которые проверяются и уточняются по результатам отбора и обработки проб продуктов обогащения.

4. Учет времени работы центробежной отсадочной машины, изменения режима ее работы. Сведения о поломках и внесенных конструктивных изменениях ежемесячно регистрируются ответственным лицом в журнале наблюдений за работой центробежной отсадочной машины.

Определение технологической эффективности центробежной отсадочной машины при различных параметрах (частота вращения ротора, расход подрешетной воды и т. д.), по результатам которых производится выбор рациональных режимов, осуществлялось путём отбора, обработки и анализа проб продуктов обогащения. В процессе проведения опробований определяли выход продуктов в абсолютном и процентном значении, содержание золота в них и извлечение золота в концентрат ЦОМ. Масса проб, как предварительных (частных), так и сменных опробований определяется с учетом максимального размера зерна опробуемых продуктов. По формуле Ричардса-Чечотта «о квадратичной зависимости массы пробы от размера куска руды» масса пробы может быть определена как:

$$Q_{\text{пр}} = k \cdot d^2, \quad (2.1)$$

где: $Q_{\text{пр}}$ – масса пробы, кг.

d - диаметр максимального зерна в опробуемом продукте, мм.

k – коэффициент зависящий от неоднородности руды, кг/мм².

Например, при максимальной крупности зерна в опробуемом продукте 2 мм и максимальном значении коэффициента $k=0,2$ кг/мм² (для неоднородных руд) масса пробы должна быть не менее 0,8 кг, при максимальной крупности 4 мм и том же значении коэффициента k , масса пробы должна быть не менее 3,2 кг.

Подготовка проб к анализу в общем случае включала в себя следующие операции: обезвоживание, сушка проб, взвешивание, квартование, истирание.

Обезвоживание проб необходимо производить после осветления (отстоя) технологической воды в пробе. Минимальное время осветления должно обеспечивать осаждение минеральных частиц крупностью более 0,05 мм и определяться с учетом скорости их падения в воде (за 4 мин. они оседают на глубину 400-450 мм).

Содержание золота в пробах определяется пробирным анализом.

2.4 Проведение заводских испытаний в замкнутом цикле. Исследование конструктивной надежности разработанной конструкции ЦОМ

Заводские испытания полностью собранной ЦОМ проводились для определения ей работоспособности и готовности к отправке на место проведения опытно-промышленных испытаний ЦОМ (рисунок 2.4).



Рисунок 2.4 – Размещение ЦОМ на полузаводской установке ОАО «Иргиредмет»

В качестве постели в отсадочную камеру было загружено 60 кг металлической дробы крупностью минус 8 + 2 мм.

Первоочередной задачей испытаний было определение конструктивной надежности отдельных элементов ЦОМ и машины в целом, проверка возможности осуществления регулировок основных изменяемых технических параметров с фиксацией максимально возможных их интервалов.

Особое внимание уделялось износостойкости фторопластового гидроуплотнения при частоте вращения отсадочной камеры свыше 200 мин⁻¹ и

механической надёжности редуктора электродвигателя подвижного конуса, испытания которого проводились вплоть до его поломки (наработка на отказ).

В ходе заводских испытаний были достигнуты следующие параметры работы ЦОМ [67]:

- максимальная скорость вращения обогатительной камеры – 400 мин^{-1} ;
- максимальная длина хода подвижного конуса - 24 мм;
- частота хода подвижного днища - 360 мин^{-1} ;
- общее время проведения испытаний – 230 ч.

После завершения заводских испытаний была осуществлена остановка ЦОМ, проведена тщательная дефектовка всех подвижных элементов и деталей, подвергающихся абразивному износу, разгрузка и взвешивание искусственной постели. В результате принято решение о достижении целей испытаний, а именно: опытно-промышленный образец ЦОМ показал высокую степень механической надёжности, выявленные и проанализированы конструктивные недостатки не являются существенными и могут быть устранены.

2.5 Исследование возможности эффективности обогащения хвостов цианирования центробежно-отсадочным методом

Опытно-промышленные испытания центробежно отсадочной машины проведены на отвальных хвостах цеонирования золотоизвлекательной фабрике (ЗИФ) №1 ОАО «Покровский рудник».

2.5.1 Размещение ЦОМ на золотоизвлекательной фабрике

Отсадочная машина была смонтирована над зумпфом насосов, перекачивающих хвосты цианирования в хвостохранилище (рисунок 2.5 и 2.6).

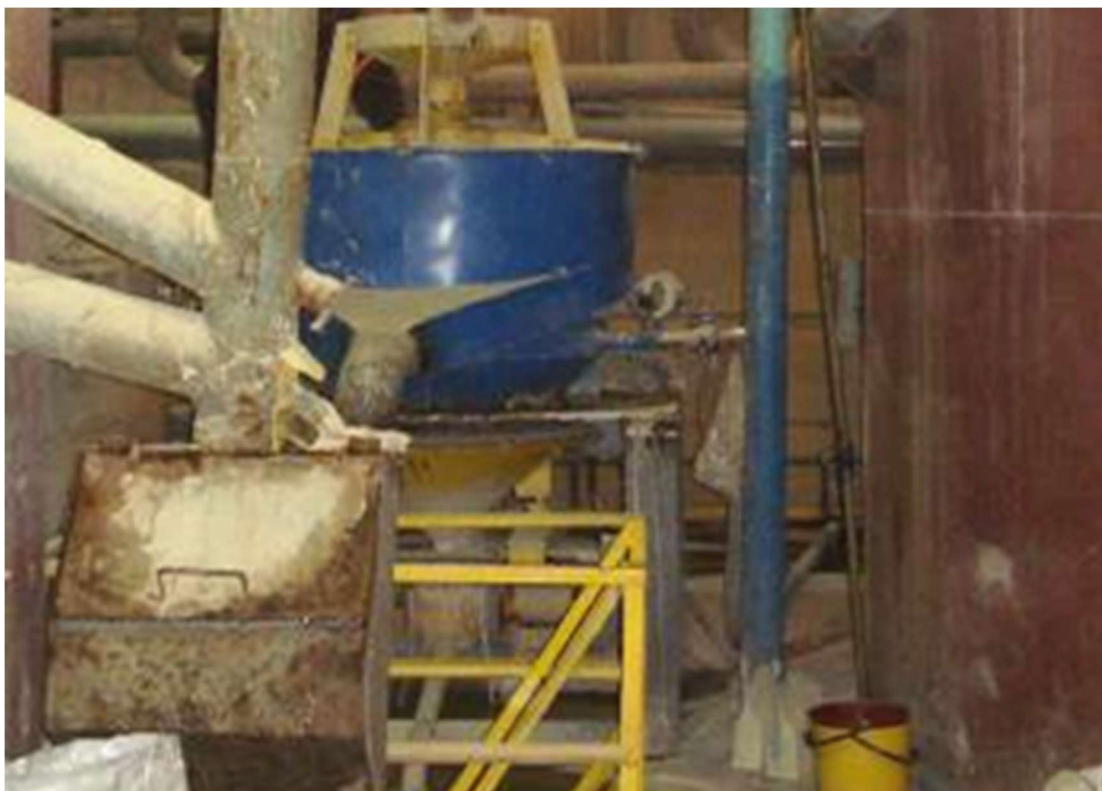


Рисунок 2.5 – Общий вид ЦОМ на предприятии

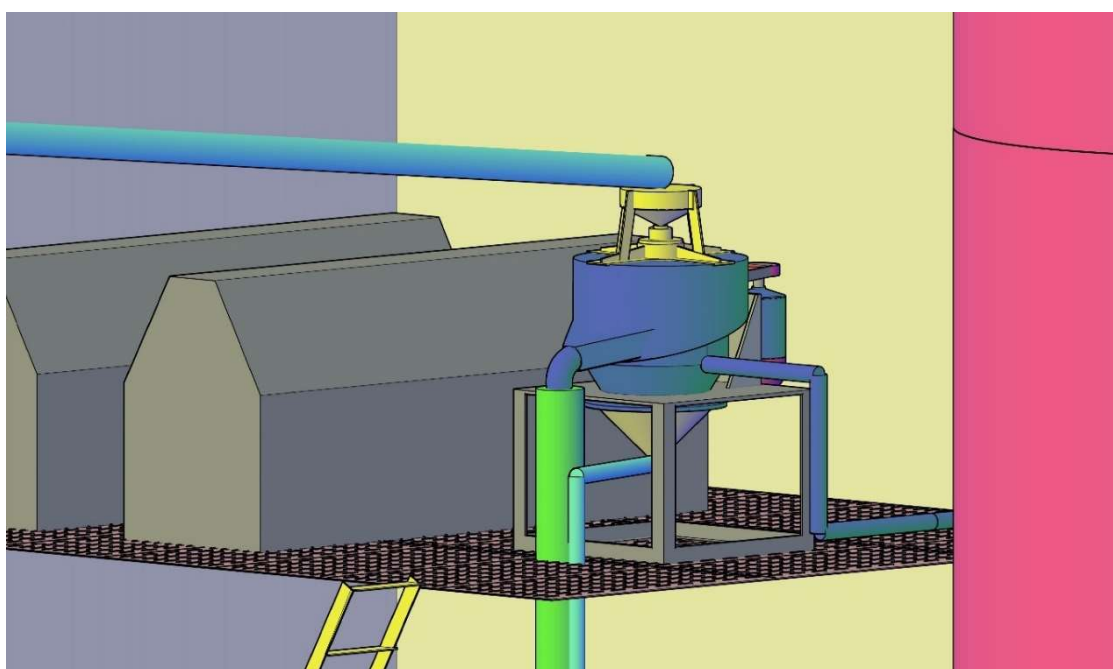


Рисунок 2.6 – Общий вид размещения ЦОМ на ЗИФ № 1 ОАО «Покровский рудник».

Отвальные хвосты цианирования фабричного передела подавали в приёмную воронку ЦОМ по отводной металлической трубе диаметром 100 мм, врезанной в хвостовую трубу.

Регулировка подачи объёма питания осуществлялась с помощью задвижки со шланговым затвором ДУ-100 (рисунок 2.7).



Рисунок 2.7 – Отвод хвостов для питания ЦОМ из хвостовой магистрали ЗИФ

Согласно гипотезе настоящей диссертационной работы расход подрешётной воды является одним из четырёх значимых регулируемых параметров ЦОМ. Для обеспечения стабильной подачи подрешётной воды, отсадочная камера ЦОМ была подключена к общей магистрали технологической водой ЗИФ с постоянным дебетом; расход воды определялся по расходомеру (рисунок 2.8).



Рисунок 2.8 – Подвод подрешётной воды в отсадочную камеру ЦОМ

2.5.2 Краткая характеристика обогащаемого материала

В период опытно-промышленных испытаний исходным питанием ЦОМ были хвосты цианирования – отвальные хвосты технологической схемы ЗИФ №1 ОАО «Покровский рудник», характеризующиеся гранулометрическим составом, представленным в таблице 2.2 и на рис 2.9.

Таблица 2.2 – Ситовая характеристика исходного питания ЦОМ

Крупность класса, мм	Выход класса, %	
	частный	суммарный по плюсу
+0,500	0,02	0,02
-0,500 +0,250	0,14	0,16
-0,250 +0,125	7,14	7,30
-0,125 +0,063	25,24	32,54
-0,063	67,46	100,00
Итого	100,00	–

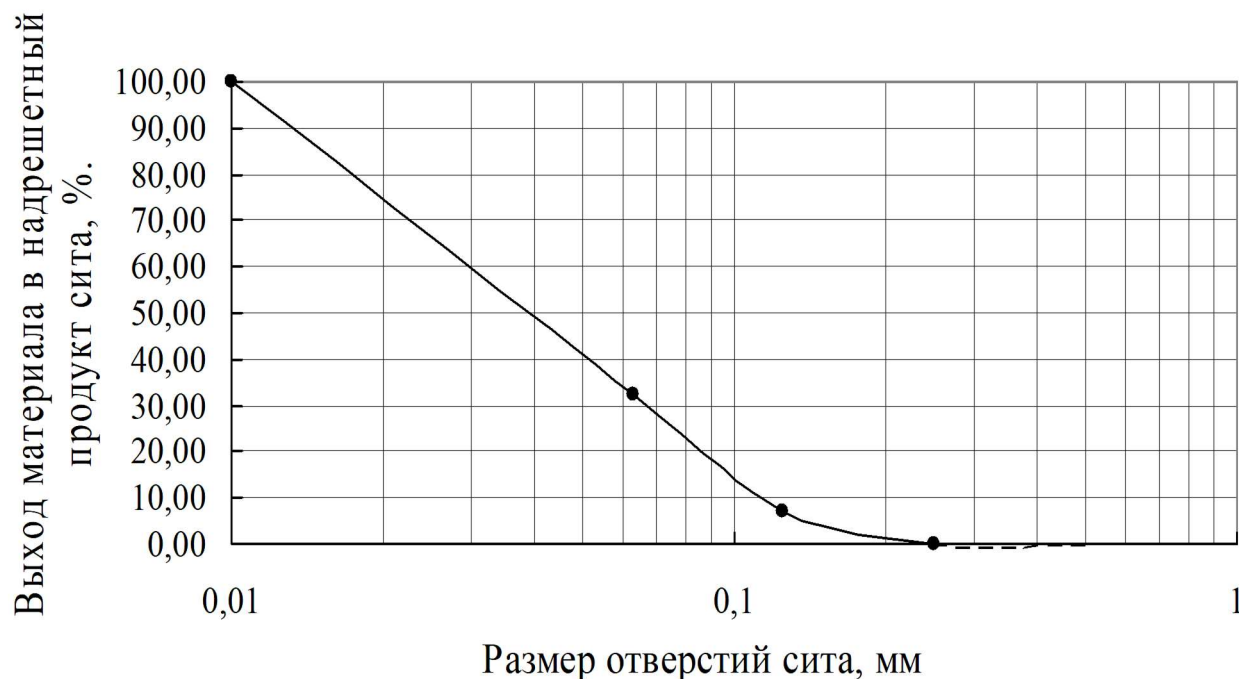


Рисунок 2.9 – График распределения по крупности материала хвостов цианирования (питания ЦОМ)

Наибольший размер минеральных зёрен в хвостах ЗИФ (исходном питании ЦОМ) практически не превышает 0,5 мм (выход класса крупностью +0,5 мм составляет всего 0,02 %). Преобладает класс крупности минус 0,125 мм

(92,70 %), в котором превалирует класс крупности минус 0,063 мм – его массовая доля достигает 67,46 %.

Расчётное содержание золота в хвостах цианирования в период испытаний ЦОМ изменялось от 0,64 до 0,91 г/т.

Исследованиями, ранее выполненными в институте «Иргиредмет» [68], установлено, что золото в рудах Покровского месторождения находится в самородной форме в виде мелких и тонких зёрен в тесной ассоциации с сульфидами (пиритом) и породообразующими минералами. Преобладают зёрна крупностью минус 0,07 мм (в рудах различного типа от 93,1 до 100,0 %), размер микроскопически видимых частиц золота колеблется от 2,5 до 10 мкм. Относительно полное освобождение пирита наблюдается в классе минус 0,07 мм.

Учитывая, что переработка исходной руды на фабрике осуществляется по многостадийной, комплексной схеме, предусматривающей стадийное дробление и измельчение, гравитационное обогащение, в том числе в центробежных концентраторах типа «Итомак», а также цианирование тонкоизмельчённых продуктов, свободное золото в отвальных хвостах цианирования практически отсутствует и всё находится в тесной ассоциации с тонкозернистыми сульфидами (пиритом), часть из которых присутствует в виде тонкой вкрапленности в сопутствующих минералах и с породообразующими минералами [69].

Вышеизложенное свидетельствует о том, что продукт, используемый для опытно-промышленных испытаний ЦОМ, по крупности и форме нахождения золота, крупности материала и сульфидов, с которыми ассоциирует часть золота, по-видимому весьма неблагоприятен для обогащения методом отсадки, в том числе на центробежной отсадочной машине.

2.5.3 Результаты опытно-промышленных исследований ЦОМ на ЗИФ ОАО «Покровский рудник»

На первом этапе была определена максимальная производительность ЦОМ на используемом исходном сырье, которая составила 15-17 т/ч.

Все последующие исследования по определению влияния регулируемых технологических режимов работы ЦОМ на показатели обогащения проводили при производительности 15-17 т/ч.

По полученным при проведении первой серии опытно-промышленного исследования данным, степень концентрации, отношение содержания золота в концентрате к его содержанию в исходном продукте, не превышало 1,1. Процесса разделения исходного питания практически не происходило (см. опыт 1-3 табл.2.3).

Таблица 2.3 – Технологические показатели обогащения хвостов цианирования технологической схемы фабрики №1 на ЦОМ

№ опыта	Наименование продукта	Выход продукта		Содержание золота, г/т*	Извлечение золота, %	Степень концентрации Аи, раз	Частота вращения отсадочной камеры, мин ⁻¹	Частота колебаний подвижного конуса, мин ⁻¹	Длина хода подвижного конуса, мм	Расход подрешётной воды	
		т/ч	%							м ³ /ч	л/с на 1 м ² решета
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Исходное питание	24,188	100	0,771	100		85	200	24	10	2,8
	Концентрат	1,28	5,3	0,855	5,86	1					
	Хвосты	22,908	94,7	0,767	94,14						
2	Исходное питание	18,728	100	0,771	100		95	200	18	10	2,8
	Концентрат	2,191	11,7	0,825	12,51	1,1					
	Хвосты	16,537	88,3	0,764	87,49						
3	Исходное питание	19,147	100	0,771	100		105	200	12	10	2,8
	Концентрат	2,355	12,3	0,821	13,09	1,1					
	Хвосты	16,792	87,7	0,765	86,91						
4	Исходное питание	18,911	100	0,771	100		115	200	12	10	2,8
	Концентрат	2,25	11,9	1,029	15,86	1,3					
	Хвосты	16,661	88,1	0,736	84,14						

Окончание таблицы 2.3

№ опыта	Наименование продукта	Выход продукта		Содержание золота, г/г*	Извлечение золота, %	Степень концентрации Au, раз	Частота вращения отсадочной камеры, мин ⁻¹	Частота колебаний подвижного конуса, мин ⁻¹	Длина хода подвижного конуса, мм	Расход подрешётной воды	
		т/ч	%							м ³ /ч	л/с на 1 м ² решета
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
5	Исходное питание	18,08	100	0,771	100		125	200	12	10	2,8
	Концентрат	3,58	19,8	0,814	20,89						
	Хвосты	14,5	80,2	0,761	79,11						
6	Исходное питание	16,458	100	0,771	100		150	240	12	10	2,8
	Концентрат	3,407	20,7	1,031	27,67						
	Хвосты	13,051	79,3	0,704	72,33						
7	Исходное питание	15,9	100	0,771	100		150	300	12	14	4
	Концентрат	3,562	22,4	1,029	29,89	1,3					
	Хвосты	12,338	77,6	0,697	70,11						
8	Исходное питание	15,7	100	0,771	100		150	300	12	14	4
	Концентрат	3,768	24,0	0,850	26,46	1,1					
	Хвосты	11,932	76,0	0,746	73,54						
9	Исходное питание	16,1	100	0,771	100		200	240	12	14	4
	Концентрат	4,202	26,1	1,018	34,43	1,3					
	Хвосты	11,898	73,9	0,685	65,57						

* - содержание золота в продуктах обогащения представлено после нормировки данных, приведения к единому, среднему, значения содержания золота в исходному продукте.

Выбрать оптимальную длину хода подвижного конуса по результатам приведённых опытов не представилось возможным. Визуальные наблюдения за работой ЦОМ показали, что при длине хода конуса 18-24 мм происходят сильные вибрации отсадочной машины, также имеет место выброс (выдавливание) материала из отсадочной камеры, когда днище конуса поднимается в верхнее положение, и всасывание материала под решето, когда днище конуса опускается, и среда за решетом машины оказывается чрезмерно разряжённой по сравнению со средой внутри отсадочной камеры. При длине хода конуса 12 мм наблюдалось уравнивание эффектов «выдавливания» и «всасывания» материала под влиянием колебаний днища и отсутствие каких-либо значительных вибраций машины. Для визуального определения процесса пульсации вращения отсадочной камеры было остановлено, а возвратно-

поступательные движения подвижного днища сохранены. При отсутствии вращения отсадочной камеры наблюдалась динамичная пульсация воды и материала при различной частоте пульсаций (от 200 до 360 мин⁻¹). В качестве рабочей длины хода подвижного конуса была принята длина, равная 12 мм, при которой проводили последующие опыты по оценке влияния на результаты обогащения частоты колебаний конуса и частоты вращения отсадочной камеры (см. опыт 3-9 табл. 2.3).

Частота колебаний подвижного конуса регулировалась от 200 до 300 мин⁻¹. Наибольшее извлечение золота в концентрат ЦОМ было получено при частотах колебаний конуса 240 и 300 мин⁻¹, которые и были приняты за основные «рабочие». Для выявления оптимальной частоты колебаний конуса провели три опыта при частоте колебаний конуса 240 и 300 мин⁻¹ (см. табл. 2.3, опыты 9 и 7, 8, соответственно) и постоянных остальных параметрах работы отсадочной машины (производительность 15,5-16,5 т/ч, частота вращения отсадочной камеры – 150 мин⁻¹, длина хода конуса 12 мм).

Разница в технологических показателях данных опытов составила:

- выход концентрата колеблется в интервале 22,4-26,1%;
- извлечение золота в концентрат – в диапазоне 26,46-34,43%;
- степень концентрации - 1,1-1,3.

Причём, степень концентрации золота в опыте 9, в котором частота колебаний конуса составляла 240 мин⁻¹, и в опыте 7, в котором частота колебаний конуса составляла 300 мин⁻¹, получена совершенно одинаковой. Это свидетельствует о том, что изменение частоты колебаний конуса в принятых пределах 240–300 мин⁻¹ практически не влияет на эффективность обогащения исследуемого сырья на отсадочной машине ЦОМ (см. табл. 2.3, рисунок 2.10).

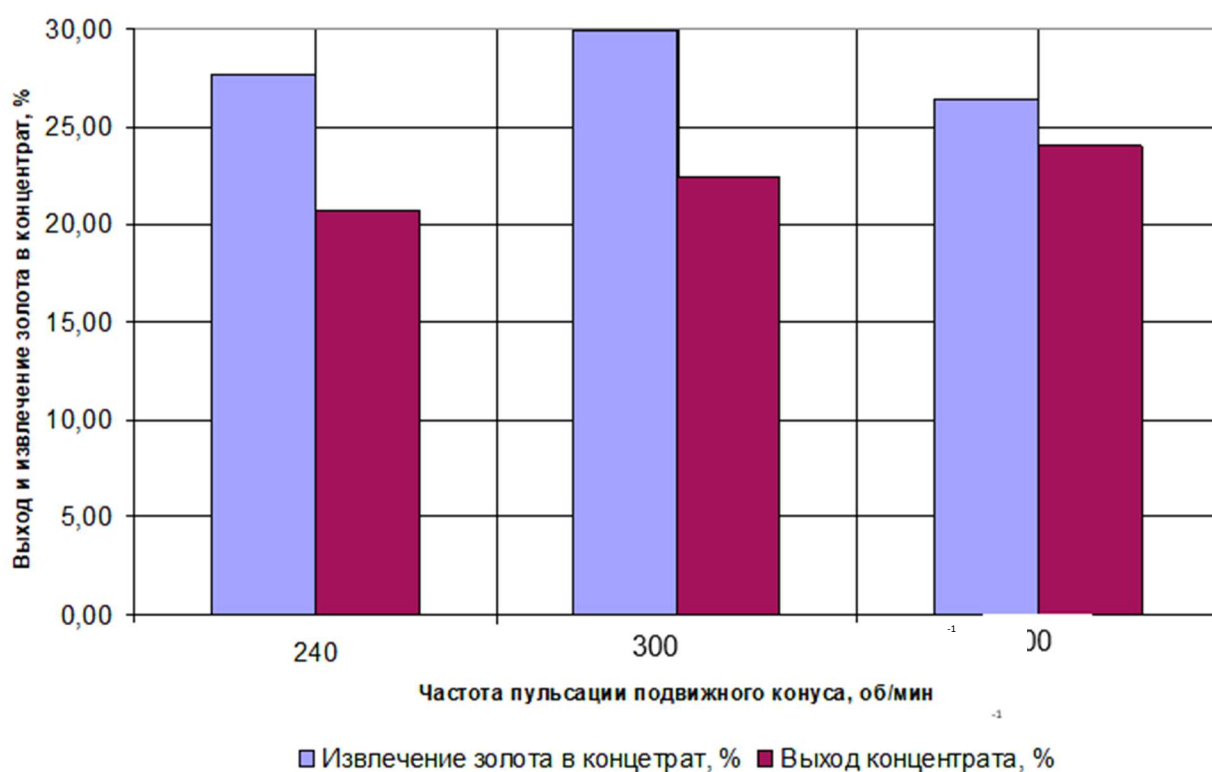


Рисунок 2.10 – График зависимости технологических параметров ЦОМ от частоты пульсаций подвижного конуса.

Для изучения гранулометрической характеристики продуктов обогащения концентрат и хвосты опыта 7 были рассеяны по классам крупности.

Установлено, что при обогащении хвостов цианирования на ЦОМ происходит некоторое перераспределение материала по крупности, а именно, концентрат заметно крупнее (его медианная крупность 0,070 мм), а хвосты несколько мельче (их медианная крупность около 0,034 мм) исходного питания, медианная крупность которого 0,040 мм (таблица 2.4, рисунок 2.11).

Таблица 2.4 – Гранулометрический состав исходного питания, концентрата и хвостов ЦОМ

Крупность фракции, мм	Выход фракции, %					
	Исходное питание		Концентрат ЦОМ		Хвосты ЦОМ	
	частный	суммарный по плюсу	частный	суммарный по плюсу	частный	суммарный по плюсу
+0,500	0,02	0,02	0,09	0,09	0,00	0,00
-0,500 +0,250	0,14	0,16	0,54	0,63	0,00	0,00
-0,250 +0,125	7,14	7,30	22,71	23,34	1,70	1,70
-0,125 +0,063	25,24	32,55	31,10	54,44	23,20	24,90
-0,063	67,46	100,00	45,56	100,00	75,10	100,00
Итого	100,00	–	100,00	–	100,00	–

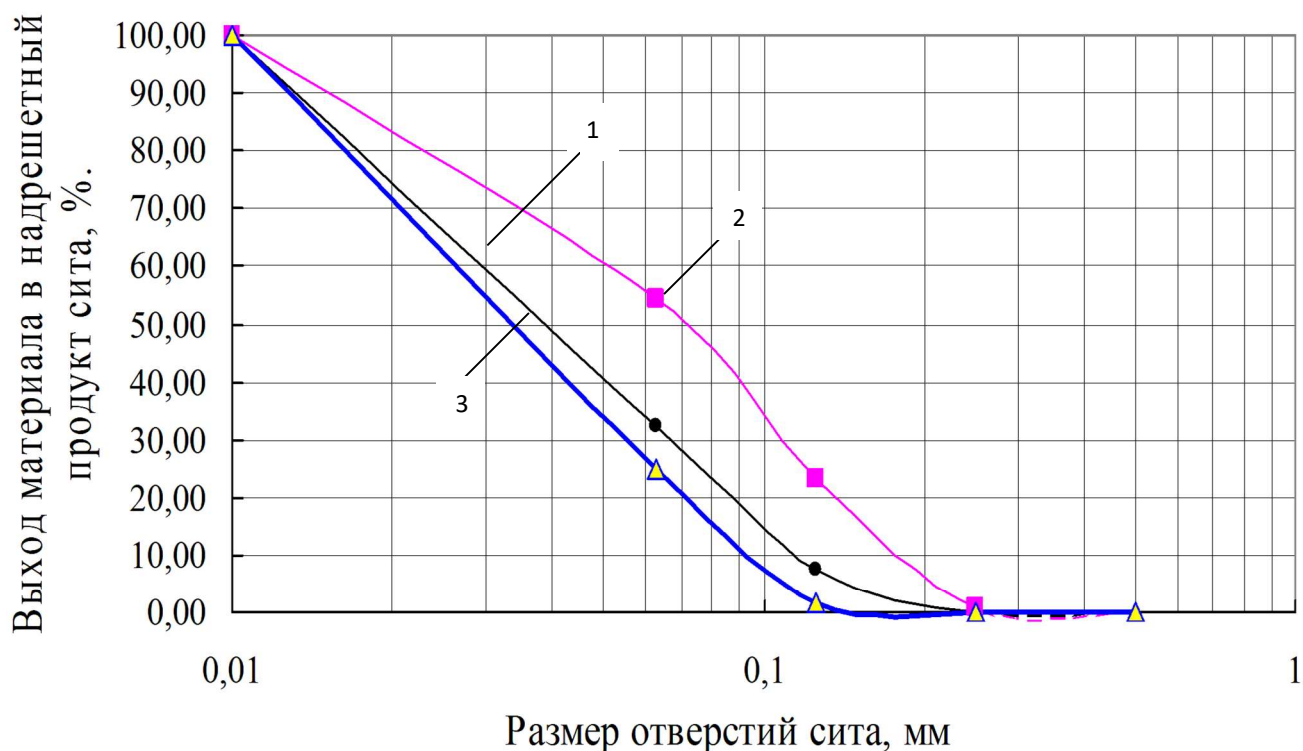


Рисунок 2.11 – График распределения по крупности материала исходного питания (1), концентрата (2) и хвостов ЦОМ (3)

Выявленная закономерность наряду с показателями извлечения и содержания золота в продуктах обогащения подтверждает, что в ЦОМ

происходит процесс сепарации исходного питания, которое разделяется не только по удельному весу зерна, но и по крупности. Данные закономерности справедливы для всех обогатительных аппаратов, сепарирующих исходное питание гравитационными методами.

При проведении исследований строго выполнялась последовательно работ (этапность). На первых этапах исследований частота вращения составляла 105 об/мин с её постепенным увеличением до значений с максимальным извлечением золота в концентрат. По результатам двух серий опытов – опыты 3-5 при частоте вращения отсадочной камеры 105, 115 и 125 мин⁻¹ и постоянных частоте колебаний подвижного конуса 200 мин⁻¹, расходе подрешётной воды 2,8 л/с на 1 м² решета, длине хода конуса 12 мм и опыты 8, 9 при частоте вращения отсадочной камеры 150 и 200 мин⁻¹ и постоянных расходе подрешётной воды 4,0 л/с на 1 м² решета, длине хода конуса 12 мм (см. табл. 2.3). В опытах 8 и 9 была различной частота колебаний подвижного конуса – соответственно 300 и 240 мин⁻¹, однако, как показано выше, такая разница в частоте колебаний подвижного конуса не влияет сколько-нибудь заметно на технологические показатели сепарации в ЦОМ. Во всех указанных опытах наблюдается тенденция к увеличению извлечения золота в концентрат при повышении частоты вращения отсадочной камеры. Лучшие результаты по извлечению золота и степени его концентрации получены при частоте вращения отсадочной камеры 200 мин⁻¹ (см. табл. 2.3, опыт 9).

По результатам выше указанных опытов можно предположить, что максимум извлечения золота и степени его концентрации лежит в области более высоких частот вращения отсадочной камеры.

Установлено, что изменение расхода подрешётной воды в пределах (2,8-4,0 л/с на 1 м² решета) практически не влияет на выход концентрата и извлечение золота в него.

Наилучшие показатели при обогащении хвостов цианирования ЗИФ №1 на ЦОМ соответствуют выходу концентрата 26 % и извлечению золота 34,43 % при степени его концентрации 1,3.

Ранее специалистами ЗАО «Питер Хамбро Майнинг Инжиниринг» совместно с сотрудниками ОАО «Покровский рудник» были проведены исследования с целью возможности применения на хвостах цианирования ЗИФ - 1 центробежного концентратора СТС-20 типа «Итомак» производства ООО СпецТехСервис (г. Новосибирск). Концентратор СТС-20 был установлен в том же технологическом пределе, где в последствии проводились исследования обогащения хвостов цианирования на ЦОМ. Все основные условия при исследованиях СТС-20 и ЦОМ-5 были идентичны: питанием служили отвальные хвосты цианирования фабрики, которые подавались по металлической трубе диаметром 100 мм, врезанной в хвостовой трубопровод.

В период испытаний концентратора СТС-20 среднее расчётное содержание золота в хвостах цианирования составило 0,48 г/т, его потери с хвостами – 14,7 %.

Испытания показали возможность выделить концентрат с выходом 0,44 и 0,21 % по операции (соответственно при шести и восьмиразовой разгрузке концентрата в течение одного часа работы концентратора), содержанием золота в нём 5,0–8,9 г/т и достаточно высокой степенью его концентрации – соответственно 10,4 и 18,5. Однако извлечение золота при этом получено крайне низкое – 4,1-3,5% по операции, что не позволяет оценить полученные в целом технологические показатели как положительные и подтверждает вывод о том, что хвосты цианирования ЗИФ №1 по вещественному составу неблагоприятны для обогащения рассматриваемым методом.

При сопоставлении результатов обогащения исходного питания ЗИФ №1 на СТС-20 и ЦОМ-5 получены следующие данные - при обогащении 1 тонны материала с содержанием золота 0,48 г/т на СТС-20 возможно извлечь в концентрат до 0,022 г золота, а при обогащении того же материала в ЦОМ-5 до 0,167 г. Таким образом можно сделать выводы, что комбинированный центробежно-отсадочный метод обогащения более полно извлекает золото в концентрат из отвальных хвостов ЗИФ №1 чем центробежный метод.

В результате окончания опытно-промышленных исследований экспериментального образца центробежной отсадочной машины был составлен и утвержден представителями ОАО «Иргиредмет» и ОАО «Покровский рудник» акт (Приложение А).

2.6 Совершенствование конструкции экспериментального образца ЦОМ.

Стендовые испытания модернизированной ЦОМ.

По результатам опытно-промышленных исследований применения ЦОМ на золотоизвлекательной фабрике ОАО «Покровский рудник» были обнаружены конструктивные недостатки, которые не позволяли в полном объеме осуществлять регулирование настраиваемых технических параметров ЦОМ и устойчиво получать максимально возможные технологические показатели извлечения и выхода золота в концентрат.

Так, установлено, что при увеличении скорости вращения отсадочной камеры хвостовой продукт, подверженный влиянию возросшей угловой скорости, стремясь от центра вращения обогатительной камеры интенсивно проникал в зазор между кольцами гидроуплотнения разделяющими зону сепарации внутри обогатительной камеры, зону сепарации, и снаружи, подрешётную зону. Таким образом происходило разбавление концентрата хвостами обогащения с увеличением процента его выхода. Вышеуказанная явление прослеживалось во всех экспериментах (см. столбец 4 таб. 2.3).

Попытки максимально уменьшить зазор между фторопластовыми кольцами гидроуплотнения приводили к быстрому повышенному износу колец.

Для минимизации эффекта разбавления было предложено осуществить подачу подрешетной воды с внешней части гидроуплотнения таким образом, чтобы технологическая вода, подаваемая под давлением, препятствовала проникновению хвостов в зазор между кольцами.

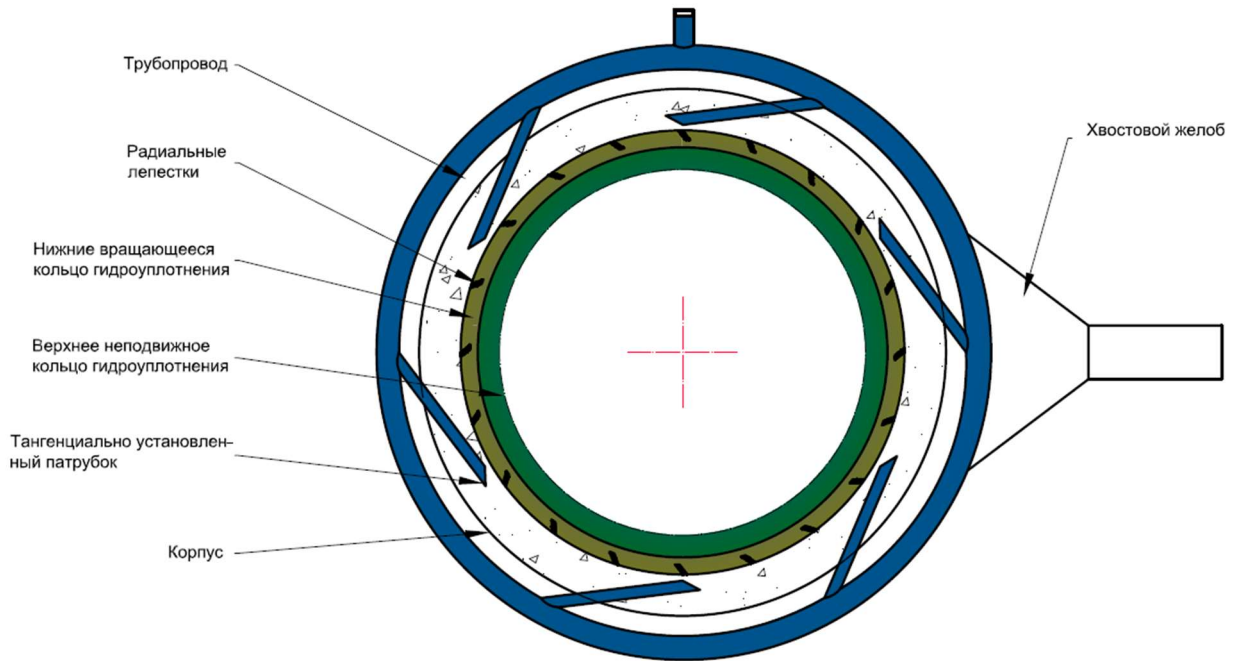


Рисунок 2.12 – Общий вид подвода подрешетной воды в зону гидроуплотнения.

При конструировании первой модели ЦОМ-5 её конструктивные элементы рассчитывались исходя из теоретической максимальной производительности 15 т/ч [70]. В процессе проведения полупромышленных испытаний на ЗИФ «Покровский рудник» было установлено, что эффективная производительность аппарата может быть увеличена до 17 т/ч и более. В связи с этим были модернизированы часть узлов и механизмов, работа которых в условиях увеличенной производительности была не эффективной. В частности, изменениям подвергся хвостовой желоб, который при прежних размерах не мог эффективно принимать и транспортировать хвостовой продукт обогащения.

В основу расчета хвостового желоба положены две основные формулы:

1. Постоянства расхода:

$$Q = v * \omega \quad (2.2)$$

где Q – расход хвостового продукта;
 v – скорость течения;
 ω – площадь живого сечения;

2. Скорости течения (формула Шези):

$$V = C * \sqrt[2]{R * I} \quad (2.3)$$

где C – коэффициент Шези;
 R – гидравлический радиус;
 I – гидравлический уклон.

Для определения результативности внесенных изменений было осуществлено проведение исследований в полужаводских условиях – стендовые испытания. Для проведения стендовых испытаний доработанной конструкции аппарата была разработана и смонтирована технологическая схема, включающая в себя кроме ЦОМ, два песковых насоса НП12,5/12,5, гидроциклон ККГЦ-120 и транспортные магистрали (рисунок 2.13)

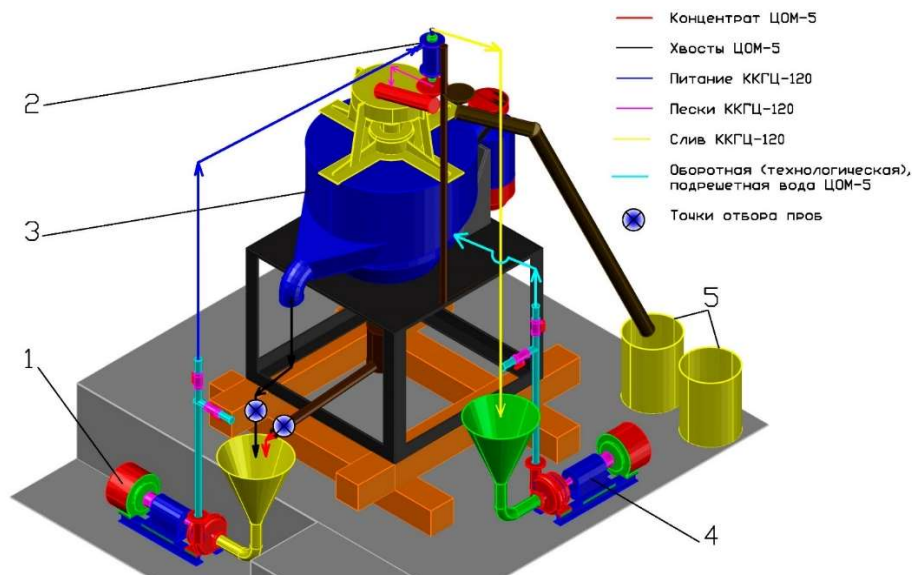


Рисунок 2.13 – Технологическая схема установки для проведения стендовых испытаний ЦОМ

В соответствии со схемой установки для исследования ЦОМ исходное питание подавалось в зумпф насоса 1, которым перекачивалось в гидроциклон 2 для обезвоживания. Пески гидроциклона поступают самотёком в центробежную отсадочную машину 3, а слив, являясь подрешетной водой ЦОМ, направляется в зумпф насоса 4, которым подаётся в зону гидроуплотнения через шесть тангенциально установленных патрубков.

Концентрат и хвосты отсадки направляются в зумпф насоса 1 и возвращаются в процесс. После завершения работы ЦОМ все продукты выводятся в ёмкости 5.

В качестве исходного питания применялась смесь золотосодержащих руд месторождений «Голец Высочайший», «Венера» и «Покровское» крупностью мельче 2 мм. Время работы аппарата под нагрузкой составило 45 восьмичасовых смен или 15 суток. Было проведено 8 технологических опробований при различных технологических режимах обогащения на ЦОМ с определением содержания серы, как основного природного элемента используемой смеси сульфидных руд (см. таб. 2.5.)

Таблица 2.5 – Результаты стендовых испытаний ЦОМ

№	Наименование продукта	Выход пр-та, %	Сод. серы, %	Извл. серы, %	Примечание		
1	Исходное питание	100,00			Частота вращения	130	мин ⁻¹
	Концентрат	47,7			Частота пульсации	200	мин ⁻¹
	Хвосты	52,23			Амплитуда пульсации	14	мм
2	Исходное питание	100,00			Частота вращения	150	мин ⁻¹
	Концентрат	66,73			Частота пульсации	200	мин ⁻¹
	Хвосты	33,27			Амплитуда пульсации	14	мм
3	Исходное питание	100,00			Частота вращения	180	мин ⁻¹
	Концентрат	46,67			Частота пульсации	200	мин ⁻¹
	Хвосты	53,33			Амплитуда пульсации	14	мм
4	Исходное питание	100,00			Частота вращения	200	мин ⁻¹
	Концентрат	47,93			Частота пульсации	200	мин ⁻¹
	Хвосты	52,07			Амплитуда пульсации	14	мм
5	Исходное питание	100,00	0,36	100,00	Частота вращения	130	мин-1
	Концентрат	48,93	0,55	75,61	Частота пульсации	200	мин-1
	Хвосты	51,07	0,17	24,39	Амплитуда пульсации	12	мм

Окончание таблицы 2.5

№	Наименование продукта	Выход пр-та, %	Сод. серы, %	Извл. серы, %	Примечание		
6	Исходное питание	100,00	0,28	100,00	Частота вращения	150	мин ⁻¹
	Концентрат	32,20	0,5	58,27	Частота пульсации	200	миг ⁻¹
	Хвосты	67,80	0,17	41,73	Амплитуда пульсации	12	мм
7	Исходное питание	100,00	0,29	100,00	Частота вращения	180	мин ⁻¹
	Концентрат	25,27	0,6	51,64	Частота пульсации	200	мин ⁻¹
	Хвосты	74,73	0,19	48,36	Амплитуда пульсации	12	мм
8	Исходное питание	100,00	0,32	100,00	Частота вращения	200	мин ⁻¹
	Концентрат	22,29	0,67	46,63	Частота пульсации	200	мин ⁻¹
	Хвосты	77,71	0,22	53,37	Амплитуда пульсации	12	мм

Как видно из таблицы 2.5 извлечение серы в концентрат, а, следовательно, и золотосодержащих сульфидов, возрастает при увеличении частот вращения отсадочной камеры и пульсации подвижного днища, Максимальное извлечение серы в концентрат 46,5 % достигается при его выходе 22,3 % с содержанием 0,67 % при частоте вращения отсадочной камеры 200 мин⁻¹ и частоте пульсаций подвижного конуса 200 мин⁻¹. При проведении опытов 1–4 содержание и извлечение не определялись.

Внесённые в конструкцию изменения позволили осуществлять регулировку технических параметров с достаточным интервалом без выноса концентрата в хвосты через зону гидроуплотнения.

За время проведения стендовых испытаний отказов в работе машины не было, при этом износ гидроуплотнения происходил равномерно по всей площади резиновых колец и составил в среднем 1,2 мм (рисунки 2.14 и 2.15)



Рисунок 2.14 – Нижнее вращающееся кольцо гидроуплотнения ЦОМ после окончания стендовых испытаний



Рисунок 2.15 – Верхнее неподвижное кольцо гидроуплотнения ЦОМ после окончания стендовых испытаний.

Акт с результатами стендовых испытаний приведён в Приложении В.

2.7 Проведение опытно-промышленных исследования на ЗИФ ОАО «Высочайший»

С целью дальнейшей оптимизации процесса обогащения золотосодержащего сырья методом отсадки в центробежном поле необходимо было осуществить повторные исследования, для проведения которых был осуществлён поиск и отбор действующих золотоизвлекательных фабрик, применяющих в основе процессе гравитационную технологию обогащения [71].

Во время проведения опытно-промышленных исследований ЦОМ на ЗИФ ОАО «Высочайший» питанием являлись отвальные хвосты технологической схемы ЗИФ крупностью 79-83 % фракции минус 0,074 мм. Данные хвосты представлены сливом гидроциклонов, полученным после двойной классификации в них слива спиральных классификаторов, в которые поступали хвосты гравитации ЗИФ [61]. Содержание золота в хвостах ЗИФ, которые являлись питанием ЦОМ, составляло 0,27-1,87 г/т. Золото в хвостах практически полностью связано с сульфидами, которые представлены большей частью пиритом. Плотность исходного питания ЦОМ (содержание твердого) во время проведения испытаний составила в среднем 12 % [61].

Центробежная отсадочная машина была размещена в цехе пресс-фильтров ЗИФ (рисунок 2.16).



Рисунок 2.16 – Размещение ЦОМ на ЗИФ ОАО «Высочайший» .

Для обеспечения возможности сопоставления результатов экспериментов было необходимо контролировать и обеспечивать равный объём исходного питания, поступающего на сепарацию в ЦОМ для всех экспериментов. Для реализации этой возможности была конструктивно обеспечена подача питания самотеком через магистраль отвальных хвостовых продуктов ЗИФ. Регулировка подачи объема питания осуществлялась с помощью задвижек со шланговым затвором ДУ-300 и ДУ-100 (рисунок 2.17).



Задвижка ДУ 100 с
шланговым затвором

Корпус ЦОМ

Рисунок 2.17 – Подвод питания к загрузочной воронке ЦОМ

Подача воды на ЦОМ осуществлялась от автономной водной магистрали, оснащенной запорной арматурой, что позволило регулировать и поддерживать на постоянном уровне расход и давление воды.

Для исследования возможности дальнейшей переработки концентрата ЦОМ последний подвергался обогащению (перечистке) на концентрационном столе ВУ. Для этого весь поток выходящего концентрата перекачивался песковым насосом и разделялся на 4 части с обогащением $\frac{1}{4}$ части концентрата ЦОМ на концентрационном столе (рисунок 2.18 и 2.19).

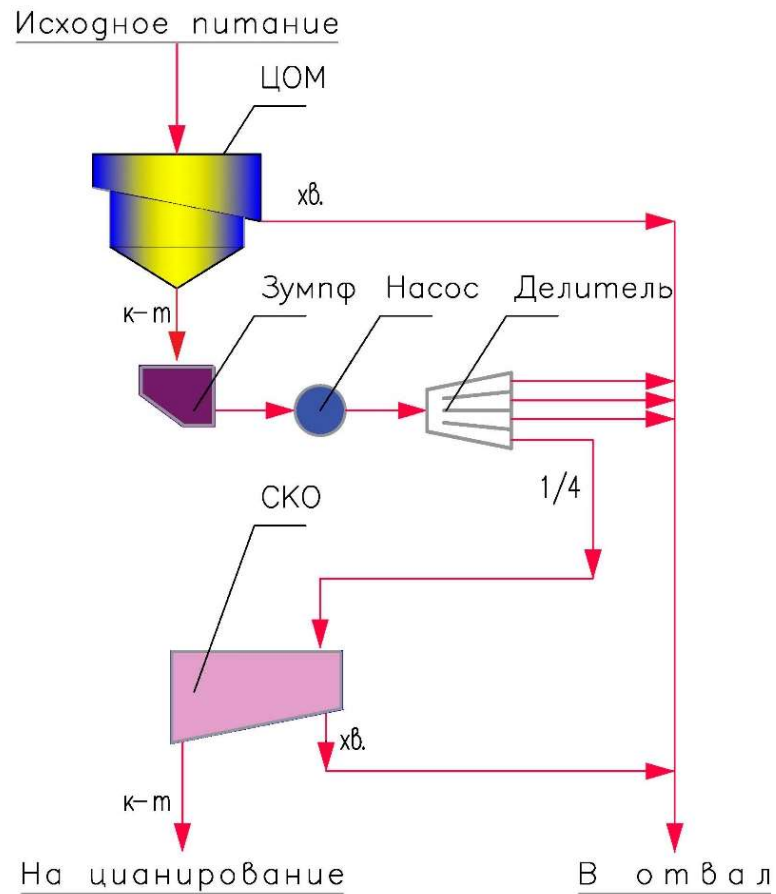


Рисунок 2.18 – Схема перечистки концентрата ЦОМ на концентрационном столе



Рисунок 2.19 – Концентрационный стол в технологической схеме ЦОМ

Основными показателями оценки эффективности работы центробежного аппарата являлись содержание золота в продуктах обогащения, выход концентрата ЦОМ и извлечение в него золота, определяемые методом пробирного анализа отобранных проб продуктов обогащения.

Отбор проб концентрата и хвостового продукта ЦОМ осуществлялся полным, кратковременным пересечением потоков указанных продуктов.

В процессе выполнения исследований на ЗИФ были найдены оптимальные значения частоты вращения отсадочной камеры и частоты колебаний подвижного конуса центробежной отсадочной машины для [72].

За основу технологических режимов работы при испытании экспериментального образца ЦОМ на ЗИФ ОАО «Высочайший» были приняты рациональные технологические режимы, полученные при проведении аналогичных испытаний ЦОМ на ЗИФ №1 ОАО «Покровский рудник, а именно:

- частота вращения отсадочной камеры 200 мин^{-1} ;
- частота пульсаций подвижного конуса 240 мин^{-1} ;
- расход подрешётная воды 4 л/с на 1 м^2 площади камеры.

За время проведения исследований на ЦОМ было проведено более 30 опытов с различными регулируемыми технологическими параметрами работы аппарата.

Средняя производительность ЦОМ при обогащении хвостов фабрики составила 10 т/ч по твёрдому при проектной производительности до 15 т/ч . Это обусловлено ограничениями в пропускной способности пустотелого питающего вала аппарата. В виду невысокой плотности подаваемого на обогащение в центробежную отсадочную машину исходного питания, которое не превышало 12%, средняя производительность по твёрдому на ЗИФ «Высочайший» существенно ниже (10 т/ч) по сравнению с максимальной ($24,2 \text{ т/ч}$) и средней ($15,5\text{-}16,5 \text{ т/ч}$) производительностью на ЗИФ «Покровский рудник», когда плотность питания достигала 50%.

При проведении исследований амплитуда хода подвижного днища изменялась от 9 до 12 мм, частота его пульсации – от 200 до 280 мин⁻¹, а частота вращения отсадочной камеры – от 150 до 225 мин⁻¹.

Результаты исследований центробежной отсадочной машины на ЗИФ ОАО «Высочайший» представлены в таблице 2.6.

По результатам проведения испытаний экспериментального образца ЦОМ на ЗИФ № 1 ОАО «Покровский рудник» было установлено, что наиболее эффективные технологические показатели (извлечение золота в концентрат и выход концентрата) получены при частоте вращения отсадочной камеры 200 мин⁻¹. Примерно при такой же частоте вращения отсадочной камеры (200-250 мин⁻¹) были получены наилучшие технологические показатели и при проведении испытания ЦОМ на ЗИФ ОАО «Высочайший».

Таблица 2.6 – Технологические показатели обогащения хвостов передела ЗИФ ОАО «Высочайший» на ЦОМ

№ п.п.	Наименование	Выход продукта (γ)		Содержание золота, г/т *	Извлечение золота, %	Степень концентрации золота, раз	Частота вращения отсадочной камеры, мин ⁻¹	Частота колебаний подвижного конуса, мин ⁻¹	Длина хода подвижного конуса, мм	Расход подрешётной воды, м ³ /ч
		т/ч	%							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Исходное питание	18,7	100	0,960	100	1,07	95	200	18	10
	Концентрат	2,2	11,7	1,020	12,43					
	Хвосты	16,5	88,3	0,945	87,57					
2	Исходное питание	24,2	100	0,960	100	1,11	85	200	24	10
	Концентрат	1,3	5,3	1,070	5,91					
	Хвосты	22,9	94,7	0,960	94,09					
3	Исходное питание	8	100	0,960	100	1,56	100	200	12	7
	Концентрат	1,5	19,1	1,499	29,82					
	Хвосты	6,5	80,9	0,832	70,18					
4	Исходное питание	19,1	100	0,960	100	1,06	105	200	12	10
	Концентрат	2,4	12,3	1,016	13,01					
	Хвосты	16,8	87,7	0,946	86,99					
5	Исходное питание	18,9	100	0,960	100	1,33	115	200	12	10
	Концентрат	2,3	11,9	1,280	15,87					
	Хвосты	16,7	88,1	0,916	84,13					

Окончание таблицы 2.6

№ п.п.	Наименование	Выход продукта (γ)		Содержание золота, г/т *	Извлечение золота, %	Концентрация золота, г/т	Частота вращения, мин ⁻¹	Частота колебаний, мин ⁻¹	Частота подвижного конуса, мин ⁻¹	Расход воды, л/с
		т/ч	%							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
6	Исходное питание	21	100	0,960	100	1,31	115	200	12	10
	Концентрат	2,8	13,3	1,260	17,46					
	Хвосты	18,2	86,7	0,915	82,54					
7	Исходное питание	18,6	100	0,960	100	1,34	115	200	12	10
	Концентрат	2,4	12,9	1,285	17,27					
	Хвосты	16,2	87,1	0,911	82,73					
8	Исходное питание	18,1	100	0,960	100	1,31	125	200	12	10
	Концентрат	3,6	19,8	1,262	26,02					
	Хвосты	14,5	80,2	0,891	73,98					
9	Исходное питание	10,1	100	0,960	100	1,53	130	200	12	7
	Концентрат	1,8	18	1,468	27,53					
	Хвосты	8,3	82	0,847	72,47					
10	Исходное питание	10,5	100	0,960	100	1,56	150	200	9	5
	Концентрат	1,3	12,4	1,498	19,35					
	Хвосты	9,2	87,6	0,885	80,65					
11	Исходное питание	10,1	100	0,960	100	200	280	9	6	1,62
	Концентрат	1	10,1	3,188	33,6					
	Хвосты	9,1	89,9	0,708	66,4					
12	Исходное питание	10,1	100	0,960	100	150*	200	9	5	1,35
	Концентрат	0,9	9,1	1,528	14,5					
	Хвосты	9,2	90,9	0,903	85,5					
13	Исходное питание	10	100	0,960	100	175	250	9	5	1,35
	Концентрат	0,8	8,4	2,301	20,1					
	Хвосты	9,2	91,6	0,837	79,9					
14	Исходное питание	10,3	100	0,960	100	200	250	9	5	1,35
	Концентрат	1,3	12,2	2,090	26,5					
	Хвосты	9,1	87,8	0,804	73,5					
15	Исходное питание	9,6	100	0,960	100	225	280	9	5	1,35
	Концентрат	1	10,2	3,338	35,4					
	Хвосты	8,6	89,8	0,691	64,6					

* - содержание золота в продуктах обогащения представлено после нормировки

Результаты экспериментов подтвердили ранее выявленную при испытаниях ЦОМ на ЗИФ №1 ОАО «Покровский рудник» зависимость извлечения золота в его концентрат от частоты вращения отсадочной камеры (ω) и частоты колебаний подвижного конуса аппарата (η); оно увеличивается с возрастанием ω и η без изменения выхода концентрата (γ), достигая 35,4 % при $\omega=225$ мин⁻¹, $\eta=280$ мин⁻¹ и $\gamma=10,2$ %.

Появились основания полагать, что с увеличением ω и η извлечение золота в концентрат ЦОМ будет возрастать [61].

При обогащении концентрата ЦОМ на концентрационном столе происходило образование сульфидной дорожки шириной 3-4 см, в которой при

его остановке под нагрузкой визуально наблюдалась сульфидно-золотая дорожка, сформированная мелкими сульфидами вкраплениями золота и весьма мелкими свободными золотинами.

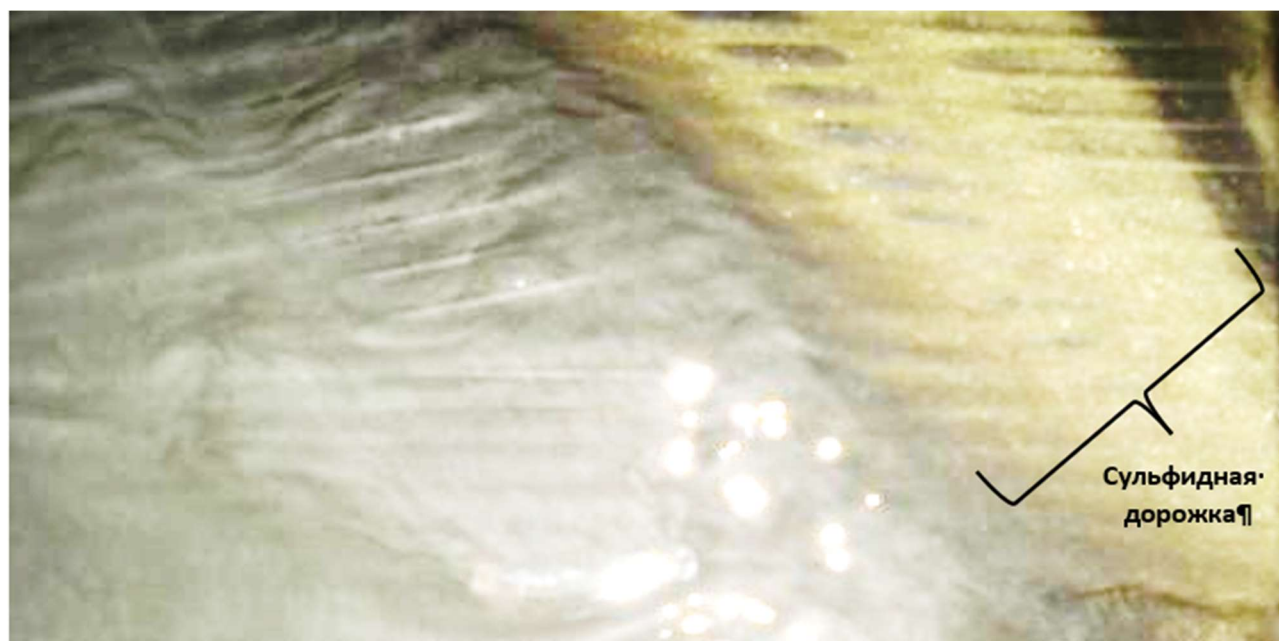


Рисунок 2.20 – Обогащение концентрата ЦОМ на концентрационном столе

Извлечение золота из концентрата ЦОМ в концентрат СКО составляло 41-42 %, что сопоставимо с извлечением эксплуатирующихся концентрационных столов ЗИФ.

Результаты исследований на ЗИФ ОАО «Высочайший» подтвердили технологическую эффективность отсадочного метода обогащения с наложением центробежных сил и зависимость получаемых технологических показателей от частоты вращения отсадочной камеры и частоты колебаний подвижного конуса. Достижение более высокие технологических значений при проведении исследований на ЗИФ ОАО «Высочайший», обосновываются устранением ряда конструктивных недостатков аппарат, выявленных в исследованиях ЗИФ «Покровский рудник». Особенно изменениям подверглось конструкция гидроуплотнения. Кроме того на ЗИФ «Высочайший» исходное питание было более благоприятным для гравитационного обогащения.

По результатам проведения опытно-промышленных экспериментов составлен соответствующий акт, подписанный представителями ОАО «Высочайший» и ОАО «Иргиредмет» (Приложение Г).

Аппарат оставлен на предприятии для продолжения опытно-промышленных испытаний.

2.8 Выводы по главе

Результаты исследований при проведении испытаний экспериментального образца центробежной отсадочной машины ЦОМ в заводских и промышленных условиях показали её функциональную пригодность при извлечении золота из хвостовых продуктов ЗИФ.

По результатам испытаний была улучшена конструкции ЦОМ. Теоретически проработана и изменена конструкция хвостового желоба, в результате максимальная производительность по транспортированию хвостов обогащения увеличена с 15 до 20 т/ч. Изменен способ подачи подрешетной воды с одноточечного в среднюю часть корпуса ЦОМ, на тангенциальный шеститочечный в область гидроуплотнения. Таким образом удалось предотвратить попадания хвостов через зазор между кольцами гидроуплотнения в подрешетное пространство.

На ЗИФ ОАО «Покровский рудник» максимальное извлечение золота в концентрат ЦОМ достигало 34,4 % при его выходе 26 %. Степень концентрации золота составила 1,3.

На ЗИФ ОАО «Высочайший» максимальное извлечение золота в концентрат ЦОМ составило 35,4 % при выходе концентрата 10,2 % и степени концентрации золота до 3,48.

Исходя из общей производительности ЗИФ «Высочайший» и оптимальной производительность ЦОМ-5 для переработки всего объема хвостов ЗИФ потребуется 9-11 машин. Ожидаемый прирост извлечения золота при внедрении центробежно-отсадочного метода обогащения хвостовых продуктов ЗИФ составит 30-35 кг. При этом, ожидается, что содержание золота в остальных хвостах ЗИФ снизиться на 0,04-0,06 г/т.

ГЛАВА 3. ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РАБОТЫ ЦОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА

Гравитационные методы обогащения, как правило, в комбинации с цианированием или флотацией, применяются на многих золотоизвлекательных фабриках в России и за рубежом [19, 63].

Методы отсадочного и центробежного обогащения широко изучены [28, 30, 39, 53, 54, 66-68, 87-102]. По результатам применения отсадочных машин и центробежных концентраторов имеются накопленные данные, полученные экспериментальным путём по траектории движения зёрен при обогащении полезных ископаемых. В то же время теоретические представления о поведении твёрдой и жидкой фазы в центробежных аппаратах носят поверхностный характер, а математические модели для центробежно-отсадочного обогащения (ЦОО), описывающие поведение зерен при обогащении методом отсадки в центробежном поле или прогнозирующих технологические показатели обогащения в ЦОМ, отсутствуют.

Общеизвестно, что технические параметры, такие как: амплитуда, частота колебаний среды и расход подрешётной воды влияют на процесс отсадки. Предполагается, что расход подрешётной воды не влияет на показатели извлечения золота в концентрат и его содержание в концентрате при обогащении материала методом отсадки в центробежном поле. Это выполняется при условии подачи технологической воды в объёме, достаточном для компенсации вытесненного объёма при подъёме и опускании подвижного днища.

3.1 Прогнозирование технологических результатов обогащения в ЦОМ

В работах Аллена У., Ньютона И, Риттенгера П.Р., Стокса Д.Г., Эйнштейна А, Лященко П.В. описаны закономерности и принципы свободного падения частиц в форме шара в условиях земного тяготения. Общеизвестно, что притяжение земли способно придавать ускорение свободного падения частицам с ускорением $g=9,8 \text{ м/с}^2$, в то время, как современные центробежные аппараты для обогащения минерального сырья в

центробежном поле придают обогащаемым частицам ускорение 100 g и более. Законы и принципы падения частиц в искусственно созданном гравитационном поле центробежных аппаратов досконально не анализировались. Принципы движения зерен при обогащении методом отсадки при стеснённых условиях с одновременным наложением центробежного поле не изучались вовсе.

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.

Для нахождения оптимальных параметров общения в ЦОМ были разработаны две математические модели с применением инструментов статистического анализа для обработки полученных данных.

Одним из основных способов исследования подобного рода результатов наблюдений является построение регрессионных моделей и поиска возможных зависимостей между настраиваемыми параметрами ЦОМ, значениями содержания ценного компонента, выхода концентрата и хвостов обогащения, так называемыми характеристиками выходных сигналов [82]. Таким образом, для решения данных задач является рациональным применение метода наименьших квадратов (МНК), позволяющего выполнить поиск функциональных зависимостей между исследуемыми техническими параметрами машины и значениями технологических параметров обогащения, такими как 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 максимальные показателей обогащения (содержание и извлечение ценного компонента в продукты обогащения) путём определения оптимальных регулируемых параметров оборудования [73, 79].

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

3.2. Математическая модель по содержанию

Одним из наиболее важных параметров для процесса переработки и обогащения рудных материалов является содержание ценного компонента в концентрате и хвостах (y_1 и y_2 соответственно). Настраиваемыми параметрами для данной установки были частота вращения отсадочной камеры, мин^{-1} , частота колебаний подвижного конуса, мин^{-1} , длина хода подвижного конуса, мм и расход подрешётной воды, $\text{м}^3/\text{ч}$.

Обозначим данные входные параметры как x_i , где $i = 1(1)4$.

В таблице 3.1 представлены результаты проведенных испытаний установки на двух ЗИФ, на основании которых осуществлялось построение математических моделей.

Таблица 3.1 – Результаты испытаний ЦОМ на ЗИФ «Покровский рудник» (1) и ЗИФ «Высочайший» (2) для построения математических моделей

№	Содержание золота в к- те, г/т (y_1)	Содержание золота в хв., г/т (y_2)	Частота вращ. отсад. камеры, мин-1 (x)	Частота колебаний подв. конуса, мин ⁻¹ (x_2)	Длина хода подвижного конуса, мм (x_3)	Расход подрешёт- ной воды, м ³ /ч (x_4)
1	0,68	0,63	95	200	18	10
1	0,78	0,7	85	200	24	10
1	0,88	0,63	115	200	12	10
1	0,92	0,65	125	200	12	10
1	2,2	1,3	150	200	9	5
1	1,04	0,71	150	200	12	10
1	0,9	0,6	150	240	12	7
1	1,21	0,82	150	300	14	10
1	1,23	0,86	150	300	14	10
1	0,9	0,6	175	200	12	7

Окончание таблицы 3.1

№	Содержание золота в к- те, г/т (y_1)	Содержание золота в хв., г/т (y_2)	Частота вращ. отсад. камеры, мин-1 (x)	Частота колебаний подв. конуса, мин ⁻¹ (x_2)	Длина хода подвижного конуса, мм (x_3)	Расход подрешёт- ной воды, м ³ /ч (x_4)
1	2,2	0,8	175	250	9	5
1	1,07	0,72	200	240	14	10
1	1,3	0,5	200	280	9	5
1	2,56	1,72	220	240	12	7
1	2,64	1,3	220	240	12	7
2	0,78	0,7	85	200	24	10
2	0,68	0,63	95	200	18	10
2	0,73	0,68	105	200	12	10
2	0,88	0,63	115	200	12	10
2	0,92	0,86	125	200	12	10
2	1,04	0,71	150	240	12	10
2	1,21	0,82	150	300	12	14
2	0,98	0,86	150	300	12	14
2	1,07	0,72	200	240	12	14

Для корректной оценки количественного влияния параметра x_i на выходной параметр y_j при помощи процедуры нормирования данных определялось его истинное значение. Для этого применялось выражение:

$$\tilde{x}_i = \frac{x_i - m_{x_i}}{\sigma_{x_i}} \quad (3.1)$$

где $\tilde{x}_i$ — нормированное значение параметра x_i ;

m_{x_i} — рассчитанное на основании таблицы 3.2 его среднее значение;

σ_{x_i} — рассчитанное среднеквадратическое отклонение.

До начала расчетов случайным образом из таблицы 1 выбирались два опыта из каждого испытания, которые в дальнейшем использовались для проверки получаемых моделей с целью отбора наиболее адекватной. Далее производился корреляционный анализ входных и выходных параметров с целью отделения тех переменных, которые оказывали наиболее существенное влияние на содержание

ценного компонента в хвостах и концентрате. Применялся метод наименьших квадратов (МНК), позволяющий определить коэффициенты уравнения регрессии, сумма квадратов отклонений реальных данных от которого минимальна [80-82]. Зависимость параметров y_1 и y_2 определялась как линейная функция от $x_1, \dots, x_4$:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^4 b_i x_i \quad (3.2)$$

где b_0 – коэффициент регрессии

Таким образом, обработка результатов испытаний производилась по следующему алгоритму:

- случайный выбор по одному опыту из каждой серии испытаний;
- расчет парных коэффициентов корреляции между независимыми переменными $x_1, \dots, x_4$ и выходными параметрами y_1 и y_2 ;
- выбор значимых переменных для построения регрессионной модели;
- построение регрессионных моделей;
- расчет коэффициентов модели с помощью МНК;
- оценка полученных моделей и выбор наиболее адекватной из них.

Адекватность модели оценивалась по её отклонению от вновь получаемых данных. При внесении новых данных в построенную модель отклонения были минимальны.

При проведении оценки моделей применялся следующий подход: лучшая модель должна, во-первых, как можно лучше описывать исходную выборку, и, во-вторых, быть близка к результатам испытаний, отобранных в п.1 настоящего алгоритма. Так, для учета близости к исходным данным можно воспользоваться коэффициентом детерминации R^2 , а для второго – рассчитаем сумму квадратов отклонений прогнозных значений от истинных. Учтем, что $R^2 \in [0; 1]$ поэтому в критерий следует включить величину $1/R^2$. Таким образом, критерий для оценки получаемых регрессионных моделей будет выглядеть следующим образом:

$$I = \frac{\alpha}{R^2} + \beta \cdot \sum (\tilde{y} - y_{\text{в}})^2 \rightarrow \min \quad (3.3)$$

где α и β – весовые коэффициенты;
 $\tilde{y}$ – значение, рассчитанное на основании модели для данных из проверочной выборки;
 $y_{\text{в}}$ – истинное значение параметра из проверочной выборки;

Коэффициенты α и β позволяют изменять модель, как в сторону увеличения прогностической способности, так и в сторону увеличения адаптивности модели. В нашем случае примем α и β равными 0,5.

Далее рассчитаем парные коэффициенты корреляции r_{xy} между независимыми переменными $x_1, \dots, x_4$ и выходными параметрами y_1 и y_2 . Расчет буде производить по следующей формуле:

$$r_{x_i y_j} = \frac{\sum (x_i - \bar{x}_i)(y_j - \bar{y}_j)}{\sigma_{x_i} \sigma_{y_j}}, \quad (3.4)$$

где $\bar{x}_i$ и $\bar{y}_j$ – средние значения величин, для которых рассчитывается коэффициент;
 σ_{x_i} и σ_{y_j} – значение, рассчитанное на основании модели для данных из проверочной выборки;
 $y_{\text{в}}$ – их среднеквадратические отклонения соответственно истинное значение параметра из проверочной выборки.

Результаты представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Значения парных коэффициентов корреляции

Показатель	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 золота, г/т (α, β, θ), Концентрат, y_1	0,69	0,24	-0,44	-0,54
Содержание золота, г/т (α, β, θ), хвосты, y_2	0,47	0,13	-0,2	-0,25

Таким образом, видим, что парные коэффициенты корреляции подтверждают наличие зависимости между выходными и входными параметрами, при этом большинство коэффициентов меньше 0,5, что свидетельствует о скорее нелинейной зависимости между исследуемыми переменными.

Для конструирования регрессионной модели воспользуемся упрощённым рядом Винера, имеющего преимущество перед другими рядами, выражаемое в способности ортогонального разложения не линейного функционала, общая формула которого может быть представлена в виде:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^4 b_i x_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=i}^l b_{ij} x_i x_j, \quad (3.5)$$

где k, l – определяющие порядка модели;

Данный метод был выбран исходя из критерия соотношения количества наблюдений и параметров.

Применяя метод наименьших квадратов, обозначим множество значений наблюдаемого параметра y_1 или y_2 в виде вектор-столбца Y , размерности $n \times 1$, где n – количество наблюдений, неизвестные коэффициенты регрессии $b_i, i = 0, 1 \dots m$ как вектор-столбец b размерности $m \times 1$, где m – количество настраиваемых параметров, а множество значений настраиваемых параметров в

виде матрицы X , размерностью $n \times m$. Таким образом, выражение (1) можно записать в следующем виде:

$$Y = Xb \quad (3.6)$$

Для нахождения неизвестных коэффициентов $b_i, i = 0, 1, 2, 3$ (или что то же самое вектор-столбца $\mathbf{b}$ из формулы (3.2) воспользуемся следующей формулой:

$$\mathbf{b} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (3.7)$$

где X^T – транспонированная матрица независимых параметров;

Необходимо отметить, что в данном случае матрица независимых переменных X дополняется столбцом из единиц, для нахождения свободного члена b_0 уравнения (3.4).

Рассмотрим полученные таким образом коэффициенты, обсудим их уровень значимости и другие статистические параметры, сначала для уравнения выхода концентрата, а затем для выхода хвостов.

Таким образом, найдем, что уравнение регрессии для случая $k = 0, l = 0$ для y_1 имеет следующий вид:

$$y_1 = 1,2 - 13,27x_1 + 1,53x_2 + 0,09x_3 - 0,59x_4 \quad (3.8)$$

Рассчитаем коэффициент детерминации R^2 , определяемый как отношение суммы квадратов остатков регрессии к общей сумме квадратов:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^n (y_j - \hat{y}_i)^2}{\sum_{j=1}^n (y_j - \bar{y})^2} \quad (3.9)$$

где $\hat{y}_i$ – значение параметра, рассчитанное после нахождения вектор-столбца;

y_i – наблюдаемое значение параметра;

y_1 и $\bar{y}$ – среднее значение параметра y_1 в данном эксперименте.

$R^2 = 0,6$, что говорит о небольшой прогностической способности представленной модели. Рассчитаем теперь для данной модели значение критерия качества по формуле 3.2, тогда $I = 2,46$, что свидетельствует о достаточно большом отклонении от проверочных данных.

Проведем расчет в соответствии с представленным выше алгоритмом для всех возможных сочетаний переменных.

Конечный результат представленного алгоритма. В итоге получаем уравнение регрессии с минимальным значением критерия $I = 0,92$:

$$y_1 = 1,18 + 12,49x_1 + 3x_2 - 17,8x_3 + 1,25x_4 - 2,68x_1x_2 - 1,64x_1x_3 - 8,72x_1x_4 + 15,53x_2x_3 - 3,0x_2x_4 + 6,75x_3x_4 - 1,66x_1^2 - 10,15x_2^2 - 0,51x_3^2 + 5,21x_4^2 \quad (3.10)$$

При этом $R^2 = 0,99$, что говорит об очень высоком соответствии полученной модели данным.

Вероятности для коэффициентов регрессии уравнения, определенные при помощи расчета t-статистики, равны соответственно и могут быть представлены в табличной форме (см. табл. 3.3).

Таблица 3.3 – Вероятности для коэффициентов регрессии

Коэффициент регрессии	Математическая модель по содержания	
	Значение коэффициента регрессии	Значение вероятности для коэффициента регрессии
b_0	1,18	$5,5 \cdot 10^{-7}$
b_1	12,49	$1,95 \cdot 10^{-6}$
b_2	3	0,00064
b_3	-17,8	$1,07 \cdot 10^{-7}$
b_4	1,25	0,002
b_5	-2,68	0,1
b_6	-1,64	0,0003
b_7	-8,72	$1,09 \cdot 10^{-5}$
b_8	15,53	$1,4 \cdot 10^{-5}$
b_9	-3	0,0004
b_{10}	6,75	0,0005
b_{11}	-1,66	0,12
b_{12}	-10,15	$7,22 \cdot 10^{-5}$
b_{13}	-0,51	0,021
b_{14}	5,21	0,0013

Как видим, все найденные коэффициенты статистически значимы, а именно имеют доверительный интервал более 95 % уровня значимости

коэффициентов регрессии, кроме коэффициентов при x_1x_2 и x_1^2 . Для них определяем доверительные интервалы как:

$$\left(b_i - t\left(n - p, 100 - \frac{1}{2}\alpha\right); b_i + t\left(n - p, 100 - \frac{1}{2}\alpha\right) \right) \quad (3.11)$$

где $t\left(n - p, 100 - \frac{1}{2}\alpha\right)$ – значение t-статистики для данного коэффициента при уровне значимости равном α ;

Тогда для коэффициентов b_6 и b_{12} имеем следующие интервалы $b_6 \in (-4,67; -0,67)$ и $b_{12} \in (-3,55; 0,22)$.

Анализируя полученные результаты, можно заключить, что содержание ценного компонента в концентрате зависит в большей степени от длины хода подвижного конуса, при этом данная зависимость носит обратно пропорциональный характер. Далее по степени влияния выделено произведение частоты колебаний подвижного конуса и длины хода подвижного конуса, что говорит о взаимозависимости данных параметров.

Третьим наиболее значимым настраиваемым (регулируемым) параметром является частота вращения отсадочной камеры, которая входит в уравнение регрессии с положительным коэффициентом.

Для дальнейшего расчета необходимо было обработать аналогичным образом результаты содержания ценного компонента в хвостовом продукте. Поиск регрессионной зависимости проводился так же в форме упрощенного ряда Винера (3.6). Для случая без каких-либо дополнительных переменных ($k = 0$, $l = 0$) имеем:

$$y_2 = 0,78 + 4,44x_1 - 0,2x_2 + 0,1x_3 - 0,09x_4 \quad (3.12)$$

Представим теперь конечный результат для модели регрессии, где было получено минимальное значение критерия I , определённого по формуле 3.3. В итоге получено следующее уравнение:

$$y_2 = 1,64 - 4,06x_1 + 29,6x_2 + 8,87x_3 + 3,8x_4 - 736,8x_1x_2 - 150,82x_1x_4 + 425,9x_2x_3 - 51,12x_2x_4 + 2,58x_3x_4 - 1455,7x_2^2 + 5,68x_3^2 \quad (3.13)$$

Также проведем расчет значимости коэффициентов корреляции. Вероятности для коэффициентов регрессии уравнения (3.10), определенные при помощи расчета t -статистики, равны соответственно:

$$1,51 * 10^{-7}; 0,04; 4,25 * 10^{-6}; 6,82 * 10^{-6}; 1,11 * 10^{-5}; 0,0003; 5,17 * 10^{-6}; \\ 2,69 * 10^{-6}; 0,0001; 0,014; 6,61 * 10^{-6}; 1,25 * 10^{-5}$$

Как видно, все коэффициенты значимы, так как все полученные вероятности меньше 0,05. Коэффициент R^2 конкретной данной математической модели оказался равен 0,96. Этот показатель является очень хорошим результатом. Значение критерия $I = 0,85$ является минимально возможным для данных условий.

Обсудим теперь полученный результат для содержания ценного компонента в хвостах. Видно, что в уравнении (3.13) наибольшие абсолютные значения имеют те коэффициенты, которые стоят при нелинейных компонентах. Так зависимость содержания в хвостах от частоты колебаний подвижного конуса в квадрате имеет намного больший коэффициент, по сравнению с той же частотой, но в первой степени. Аналогичная ситуация повторилась с остальными переменными математической модели. Исходя из данного анализа, можно заключить, что выход хвостов имеет более сложную и нелинейную зависимость от настраиваемых параметров.

В результате мы получаем два уравнения описывающих зависимости выхода концентрата и хвостов, для представленного аппарата. Исходя из логики работы обогащительного производства, проведем расчет оптимальных параметров работы аппарата, решая систему уравнений 3.11 и 3.14 в том смысле, что содержание ценного компонента в концентрате должно стремиться к максимуму, а в хвостах – к минимуму.

Проведя определение частных производных первого порядка $\frac{\partial y_{1,2}}{\partial x_{1,2,3,4}}$ и приравнивания их к нулю для уравнений 3.10 и 3.13, получим подозреваемые на экстремум. Результаты вычислений показаны в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Расчёт определения крайних точек для математической модели по содержанию.

Параметр	Показатель	
	y_1 (формула 3.11)	y_2 (формула 3.14)
x_1	200,5	171,7
x_2	283,2	265,5
x_3	20,5	15,25
x_4	9,5	10,48

Как видно из таблицы, получены достаточно близкие по значениям параметры, что позволяет говорить о нахождении действительно экстремальной точки для данной серии испытаний.

3.3. Математическая модель по извлечению

Математическая модель, где основным показателем процесса обогащения принято извлечение золота в концентрат и хвосты ЦОМ, обозначенные в модели как y_1 и y_2 , соответственно, разработана по аналогичному первой модели алгоритму и настраиваемыми параметрами, x_i .

В таблице 3.5 представлены результаты проведенных испытаний установки на двух ЗИФ, на основании которых осуществлялось построение математических моделей.

Таблица 3.5 – Результаты испытаний ЦОМ на ЗИФ «Покровский рудник» (1) и ЗИФ «Высочайший» (2) для построения математических моделей

№	Извлечение золота, %, хв., (y_2)	Извлечение золота, %, к-т, (y_1)	Частота вращ. отсад. камеры, мин ⁻¹ (x)	Частота колебаний подв. конуса, мин ⁻¹ (x_2)	Длина хода подвижного конуса, мм (x_3)	Расход подрешётной воды, м ³ /ч (x_4)
1	87,5	12,5	95	200	18	10
1	94,1	5,9	85	200	24	10
1	84,1	15,9	115	200	12	10

Окончание таблицы 3.5

№	Извлечение золота, %, хв., (у₂)	Извлечение золота, %, к-т, (у₁)	Частота вращ. отсад. камеры, мин-1 (х)	Частота колебаний подв. конуса, мин⁻¹ (х₂)	Длина хода подвижного конуса, мм (х₃)	Расход подрешёт- ной воды, м³/ч (х₄)
1	74,1	25,9	125	200	12	10
1	80,7	19,3	150	200	9	5
1	79,6	20,4	150	200	12	10
1	79,9	20,1	150	240	12	7
1	70,1	29,9	150	300	14	10
1	68,9	31,1	150	300	14	10
1	82,5	17,5	175	200	12	7
1	79,9	20,1	175	250	9	5
1	71,4	28,6	200	240	14	10
1	73,5	26,5	200	280	9	5
1	81,9	18,1	220	240	12	7
1	77,7	22,3	220	240	12	7
2	94,46	5,54	85	200	24	10
2	87,17	12,83	95	200	18	10
2	87,23	12,77	105	200	12	10
2	84	16	115	200	12	10
2	78,9	21,1	125	200	12	10
2	72,45	27,55	150	240	12	10
2	70,24	29,76	150	300	12	14
2	73,36	26,64	150	300	12	14
2	65,7	34,3	200	240	12	14

Для корректной оценки количественного влияния параметра x_i на выходной параметр y_j при помощи процедуры нормирования данных определялось его истинное значение. Для этого использовалась формула:

$$\tilde{x}_i = \frac{x_i - m_{x_i}}{\sigma_{x_i}} \quad (3.1)$$

где $\tilde{x}_i$ – нормированное значение параметра x_i ;
 m_{x_i} – рассчитанное на основании таблицы 3.6 его среднее значение;
 σ_{x_i} – рассчитанное среднеквадратическое отклонение.

Дальнейшие вычисления для построения математической модели по извлечению золота в концентрат ЦОМ проводились аналогично построению модели по содержанию золота в концентрате ЦОМ (формулы 3.3, 3,4). Значения вычленений коэффициентов корреляции приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Значение парных коэффициентов корреляции

Показатель	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)
Извлечение золота в концентрат, y_1	0,63	0,71	-0,6	0,247
Извлечение золота хвосты, y_2	-0,63	-0,71	0,6	-0,247

Как видно из таблицы:

- числовые значения коэффициентов корреляции для y_1 и y_2 совпадают, однако сами значение имеют разный знак. Это связано с тем, что сумма значений извлечения золота в концентрат и хвосты равна 100%;
- парные коэффициенты корреляции подтверждают наличие зависимости между выходными и входными параметрами, при этом наибольшее влияние на извлечение имеет частота колебаний подвижного конуса, а наименьшее – расход подрешётной воды.

Уравнение регрессии для y_1 имеет следующий вид:

$$y_1 = 0,0003 + 0,16x_1 + 0,41x_2 - 0,47x_3 + 0,3x_4 \quad (3.14)$$

Коэффициент детерминации R^2 , определённый по формуле 3.9, будет равен $R^2=0,8$, а значение критерия качества, определённого по формуле 3.4, равен

$I=0,88$. При этом минимальное значение критерия $I=0,59$ соответствует следующему уравнению регрессии:

$$y_1 = 0,74 + 1,38x_1 + 0,27x_2 + 1,14x_3 - 1,24x_1^2 + 1,94x_1x_2 - 0,27x_2^2 - 0,47x_1x_3 + 1,31x_2x_3 - 0,26x_3^2 \quad (3.15)$$

При этом $R^2 = 0,92$, что говорит об очень высоком очень высоком качестве соответствии полученной модели данным. Стоит отметить тот факт, что итоговое уравнение не зависит от переменной x_4 (расход подрешётной воды), что соответствует данным корреляционного анализа (коэффициент $r_{x_4y_1} = 0,274$).

Таблица 3.7 – Вероятности для коэффициентов регрессии

Коэффициент регрессии	Математическая модель по извлечению	
	Значение коэффициента регрессии	Значение вероятности для коэффициента регрессии
b_0	0,74	0,05
b_1	1,38	0,02
b_2	0,27	0,35
b_3	1,14	0,04
b_4	-1,24	0,04
b_5	1,94	0,05
b_6	0,27	0,39
b_7	-0,47	0,6
b_8	1,31	0,22
b_9	-0,26	0,38

Из таблицы видно, что часть коэффициентов статистически значимы и могут приняты с вероятностью 0,95, но пять коэффициентов имеют высокое значение вероятности. В этом случае Доверительные интервалы определяются по формуле:

$$\left(b_i - t \left(n - p, 100 - \frac{1}{2} \alpha \right); b_i + t \left(n - p, 100 - \frac{1}{2} \alpha \right) \right) \quad (3.16)$$

где $t(n - p, 100 - 1/2 \alpha)$ - значение t-статистики для данного коэффициента при уровне значимости равном α

Тогда для коэффициентов b_2 , b_6 , b_7 , b_8 , и b_9 имеем следующие интервалы $b_2 \in (-0,7; 1,25)$, $b_6 \in (-1,15; 0,61)$, $b_7 \in (-1; 0,056)$, $b_8 \in (0,01; 2,6)$, $b_9 \in (-1,17; 0,66)$

Анализируя полученные результаты, можно заключить, что извлечение в концентрат зависит в большей степени от частоты вращения отсадочной камеры, при этом данная зависимость носит прямо пропорциональный характер. Далее по степени влияния выделено произведение частоты колебаний подвижного конуса и частоты вращения отсадочной камеры, что говорит о взаимозависимости данных параметров. Наконец, третьим наиболее влиятельным фактором является длина хода подвижного конуса, которая входит в уравнение регрессии с положительным коэффициентом.

Уравнение регрессии для отвального продукта имеет аналогичный вид только с инвертированными коэффициентами, так как $y_2 = 100 - y_1$:

$$y_2 = -0,74 - 1,38x_1 - 0,27x_2 - 1,14x_3 + 1,24x_1^2 - 1,94x_1x_2 + 0,27x_2^2 + 0,47x_2x_3 - 1,31x_2x_3 + 0,26x_3^2 \quad (3.17)$$

В результате получено два уравнения (3.16 и 3.18) описывающих зависимости извлечения золота в концентрат и хвосты ЦОМ. Как отмечалось выше, зависимость извлечения золота в концентрат обратно зависимости извлечения золота в хвосты, следовательно, максимум для уравнения 3.15 будет являться минимумом для уравнения 3.17.

После проведения процедуры определения частных производных первого порядка и приравнивания их к нулю определились крайние точки, подозреваемые на экстремуме.

Таблица 3.8 – Расчёт определения крайних точек для математической модели по извлечению.

Параметр	Показатель	
x_1	-0,014	146,7 мин ⁻¹
x_2	-1,54	173 мин ⁻¹
x_3	-1,67	7,2 мм

Матрица Гессе будет иметь вид:

$$H = \begin{pmatrix} -2,48 & 1,94 & -0,47 \\ 1,94 & -0,54 & 1,31 \\ -0,47 & 1,31 & -0,52 \end{pmatrix} \quad (3.18)$$

Миноры первых трех порядков равны соответственно $-2,48 < 0$, $-2,43 < 0$ и $3,25 > 0$, что указывает на то, что найденная точка является «седловой» точкой. Максимальные значения исследуемой функции достижимы в крайних точках возможного интервала параметров x_1 , x_2 или x_3 .

Таблица 3.9 – Возможные сочетания параметров

Извлечение золота, %, хвосты, y_1	Извлечение золота, %, Концентрат, y_1	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
94,46	5,54	85	200	24	10
68,9	31,1	150	300	14	10
73,5	26,5	200	280	9	5
64,8	39,2	240	300	7,2	5

На уровень извлечения влияют частота вращения отсадочной камеры и частота колебаний подвижного конуса.

При этом максимум извлечения золота в концентрат ЦОМ из отвальных хвостов ЗИФ определяется по уравнению 3,15 и прогнозируется на уровне 39,2 % и достижимо при следующих технических параметрах значения x_1 (частота вращения чаши) – 240 об/мин, x_2 (частота пульсации отсадочной постели) – 300 раз/мин, x_3 (амплитуда пульсации подвижного конуса) – 7,2 мм.

3.4. Выводы по главе

Проведя сравнительный анализ математических моделей определено, что математическая модель по содержанию имеет 14 слагаемых, а математическая модель по извлечению 9. Следовательно, математическая модель по извлечению с меньшей ошибкой определяет технические параметры обогащения (извлечения ценного компонента в концентрат) при изменении настраиваемых параметров обогащения в ЦОМ.

При конструирования регрессионных моделей стало возможным определить значимые регулируемые технические параметры. Кроме того, параметры были ранжированы по степени из значимости на процесс сепарации в ЦОМ. Так в модели по содержанию настраиваемые параметры распределись следующим образом [82]:

1 – длина хода подвижного конуса. 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 – $7,2 \text{ мм}$, извлечения золота в концентрат из отвальных хвостов – $39,2 \text{ \%}$.

ГЛАВА 4. ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ЦЕНТРОБЕЖНО-ОТСАДОЧНОГО МЕТОДА ОБОГАЩЕНИЯ

Центробежно-отсадочный метод обогащения может быть успешно применён при извлечении полезных ископаемых мелких классов крупности, включая золото, золотосодержащие сульфиды, хвостовых продуктов ЗИФ, платину, олово, никель, а также железную руду, неблагородные металлы, хромиты, циркон, ильменит, уголь и др. [44, 49, 55, 74, 83-91].

Центробежная отсадочная машина может быть применена в различных технологических переделах обогатительных фабрик, шлиходоводочных установках, драгах.

На основании проведенного 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 наиболее рациональными технологическими переделами для применения ЦОМ являются:

1. На золотоизвлекательных фабриках:

- контрольное обогащение сливов гидроциклонов;
- перечистка песков гидроциклонов, сливов спиральных сепараторов;
- предварительное обогащение исходного питания флотации, концентрационных столов;
- предварительное обогащение относительно крупного материала, до 10 мм, разгрузки мельниц.

2. На береговых обогатительных фабриках и драгах (обогащение россыпного золота и платины);

- доводка золотосодержащих концентратов;
- перечистка концентратов отсадочных машины.

3. При обогащении угля крупностью 150-300 мкм.

4. При переработке титаносодержащих песков (ильменит, цирконий), как основной, контрольный и перечистный обогатительный аппарат.

4.1 Дополнительное извлечение золота из отвальных хвостов ЗИФ

При проведении исследований методом отсадки в центробежном поле на ЗИФ «Высочайший» исходным питанием ЦОМ, как отмечалось выше, были отвальные хвосты ЗИФ, с содержанием в них золота от 0,27 до 1,87 г/т. Золото в хвостах связано с сульфидами.

Для снижения общих потерь золота произведены расчёты балансов выходов продуктов обогащения и извлечения золота из отвальных хвостовых продуктов ЗИФ по двум вариантам.

Оба варианта предполагают применение отсадочного метода обогащения в центробежном поле на центробежной отсадочной машине.

В таблице 4.1 (первый вариант) в качестве основного обогатительного оборудования выбрана центробежная отсадочная машина ЦОМ, а в качестве доводочного оборудования – концентрационные столы. В таблице 4.2 (второй вариант) ЦОМ был принят как основной, контрольный и перечистный обогатительный аппарат с доводкой концентратов на концентрационных столах.

Первый вариант предусматривает применение ЦОМ только в основной стадии обогащения хвостов ЗИФ с перечисткой её концентрата на концентрационных столах (таблица 4.1), второй вариант предполагает применение ЦОМ в основной стадии обогащения с контрольным обогащением её хвостов на контрольных ЦОМ и перечисткой основных и контрольных концентратов на перечистных ЦОМ и с доводкой концентратов последних – на концентрационных столах (таблица 4.2).

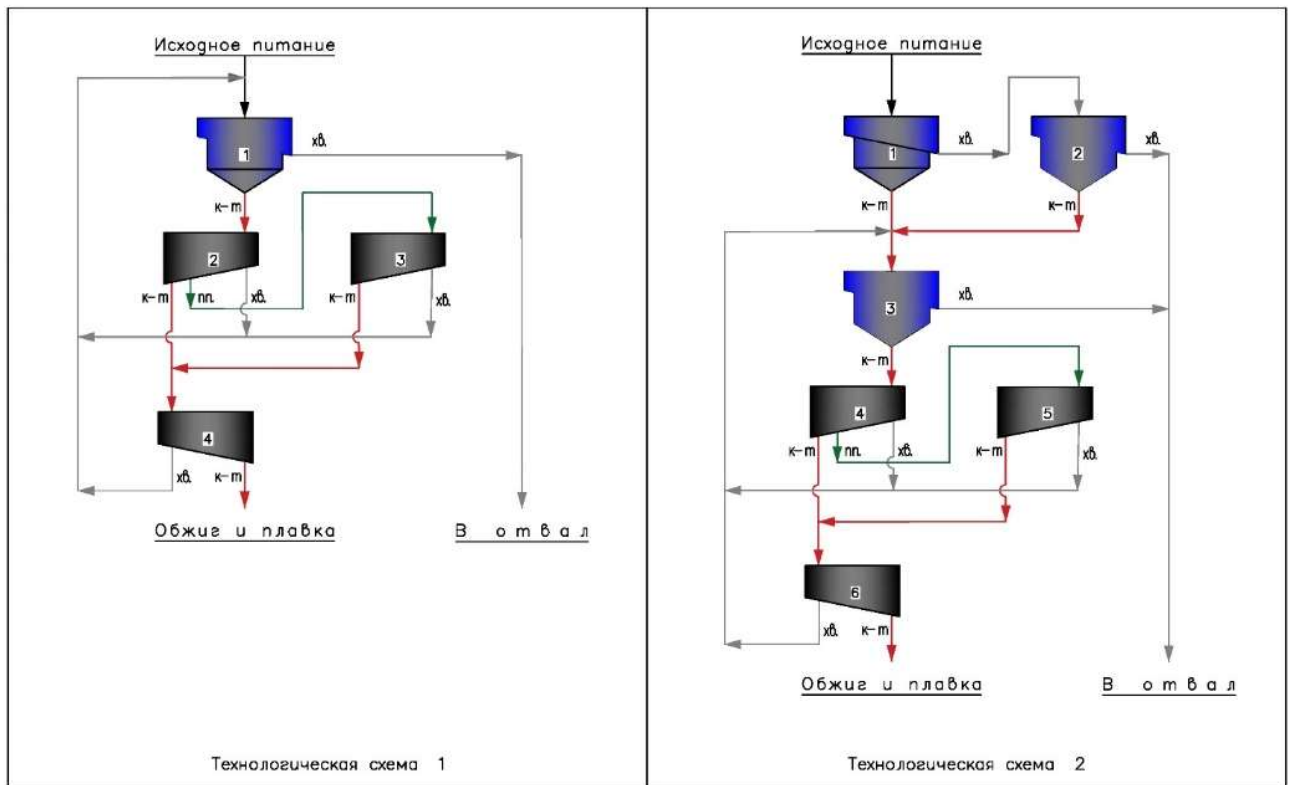


Рисунок 4.1 – Схема цепи аппаратов применения ЦОМ на ЗИФ

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

Таблица 4.1 – Баланс выхода продуктов и извлечения золота

Наименование операции	Наименование продуктов	Номер продукта	Выход продукта (γ)			Извлечение золота в продукт (ε), %	Содержание золота в продукте (β), г/т	Масса золота, г/сут
			т/сут	% по операции	% от исходного			
Обогащение на ЦОМ	Поступает:							
	Исх. прод.	1	2644,98	99,816	97,86	87,40	0,38	1005,09
	Хв. СКО II	8	4,53	0,171	0,168	2,90	0,47	33,36
	Хв. СКО III	10	0,35	0,013	0,004	9,70	317,45	111,51
	Итого		2649,86	100,00	98,031	100,00	0,38	1149,96
	Выходит:							
	К-т ЦОМ	2	254,39	9,60	9,411	39,20	1,55	394,72
	Хв. ЦОМ	3	2395,48	90,40	88,620	60,80	0,26	755,23
Обогащение на концентрационном столе ВУ4500х1800	Поступает:							
	К-т ЦОМ	2	254,39	100,00	9,41100	100,00	1,55	394,72
	Выходит:							
	К-т СКО I	4	0,25	0,10	0,00941	48,12	746,66	189,94
	Пр.п. СКО	5	4,63	1,82	0,17128	18,46	15,74	72,87
	Хв.СКО	6	249,50	98,08	9,23	33,42	0,53	131,92
Перечистка на концентрационном столе ВУ2100х1050	Поступает:							
	Пр.п. СКО	5	4,63	100,00	0,17128	100	15,74	72,87
	Выходит:							
	К-т СКО II	7	0,10	2,10	0,0036	54,22	406,35	39,51
	Хв. СКО II	8	4,53	97,90	0,16768	2,901	0,47	33,36
Перечистка на концентрационном столе ВУ 1050х500	Поступает:							
	К-т СКО I	4	0,254		0,00941		746,66	189,94
	К-т СКО II	7	0,097		0,0036		406,35	39,51
	Итого:		0,352	100	0,01301	100	652,56	229,45
	Выходит:							
	Ац	9	0,000	0,10	0,0000036	47,40	282555,84	99,35
	Хв. СКО III	10	0,351	99,90	0,003596	52,60	317,45	111,51

Окончание таблицы 4.1

Наименование операции	Наименование продуктов	Номер продукта	Выход продукта (γ)			Извлечение золота в продукт (ε), %	Содержание золота в продукте (β), г/т	Масса золота, г/сут
			Выход продукта (γ)	% по операции	% от исходного			
Обжиг и плавка	Поступает:							
	Аи	9	0,000	100,00	0,0000036	100	282555,84	99,35
	Выходит:							
	Лигатурное золото	11	0,000	99,89	0	95	268723,64	94,38
	Потери при плавке	12	0,000	0,11	0	5	12843447,21	4,97

Таблица 4.2 – Баланс выхода продуктов и извлечения золота.

Наименование операции	Наименование продуктов	Номер продукта	Выход продукта (γ)			Извлечение золота в продукт (ε), %	Содержание золота в продукте (β), г/т	Масса золота, г/сут
			т/сут	% по операции	% от исходного			
Обогащение на ЦОМ	Поступает:							
	Исходный продукт	1	2644,98000	100,00	97,8600	100	0,38*	1005,09
	Выходит:							
	К-т ЦОМ I	2	253,91808	9,60	9,3946	39,20	1,55	394,00
	Хв. ЦОМ I	3	2391,06192	90,40	88,4654	60,80	0,26	611,10
Контрольное обогащение на ЦОМ	Поступает:							
	Хв. ЦОМ I	3	2391,06192	100,00	88,4654	100	0,26	611,10
	Выходит:							
	К-т ЦОМ II	4	229,54194	9,60	8,4927	39,20	1,04	239,55
	Хв. ЦОМ II	5	2161,51998	90,40	79,9728	60,80	0,17	371,55

* среднее содержание золота по данным ЗИФ

Продолжение таблицы 4.2

Наименование операции	Наименование продуктов	Номер продукта	Выход продукта (γ)			Извлечение золота в продукт (ε), %	Содержание золота в продукте (β), г/т	Масса золота, г/сут
			т/сут	% по операции	% от исходного			
Перечистка обогащение на ЦОМ	Поступает:							
	К-т ЦОМ I	2	253,91808	47,48	9,3946	44,64	1,55	394,00
	К-т ЦОМ II	4	229,5419443	42,92	8,4927	27,14	1,04	239,55
	Хв. СКО I	10	50,35513511	9,42	1,86298241	13,10	2,30	115,62
	Хв. СКО II	12	0,914781532	0,17	0,03384	3,31	31,96	29,24
	Хв. СКО III	13	0,070892401	0,01	0,001898	11,80	1468,82	104,13
	Итого		534,8008334	100,00	19,7860	100	1,65	882,53
	Выходит:							
	К-т ЦОМ III	6	51,34088	9,60	1,8995	39,20	6,74	345,95
	Хв. ЦОМ III	7	483,45995	90,40	17,8865	60,80	1,11	536,58
Обогащение на столе ВУ4500х1800	Поступает:							
	К-т ЦОМ III	6	51,34088	100,00	1,8995	100,00	6,74	345,95
	Выходит:							
	К-т СКО I	8	0,05134	0,10	0,0019	48,12	3242,47	166,47
	Пр.п. СКО I	9	0,93440	1,82	0,0346	18,46	68,35	63,86
	Хв. СКО I	10	50,35514	98,08	1,8630	33,42	2,30	115,62
Перечистка на концентрационно м столе ВУ2100х1050	Поступает:							
	Пр.п. СКО I	9	0,93440	100,00	0,0346	100	68,35	63,86
	Выходит:							
	К-т СКО II	11	0,01962	2,10	0,0007	54,22	1764,62	34,63
	Хв. СКО II	12	0,91478	97,90	0,0338	45,78	31,96	29,24

Окончание таблицы 4.2

Наименование операции	Наименование продуктов	Номер продукта	Выход продукта (γ)			Извлечение золота в продукт (ϵ), %	Содержание золота в продукте (β), г/т	Масса золота, г/сут
			т/сут	% по операции	% от исходного			
Обжиг и плавка	Поступает:							
	Au	12	0,00007	100,00	0,000002	100	1366470,21	96,97
	Выходит:							
	Лигатурное золото	14	0,00007	99,87	0	95	1299836,48	92,12
	Потери при плавке	15	0,00000	0,13	0	5	52556546,44	4,85

Как видно из таблиц 4.1 и 4.2, дополнительное извлечение золота при применении ЦОМ в основной стадии и концентрационных столов на всех стадиях перераспределения позволит дополнительно извлекать 94,38 грамма золота в сутки или 32,5 кг в год, а при применении ЦОМ в качестве основного, контрольного и доводочного оборудования в первой стадии 92,12 гр и 31,7 кг, соответственно.

4.2 Выбор и экономическое обоснование варианта доизвлечения золота из хвостов ЗИФ.

Предложено два варианта реализации разработанной технологии доизвлечения золота из хвостов золотоизвлекательной фабрики ЗИФ «Высочайший» с применением разработанной конструкции ЦОМ.

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 4500х1800 (аналог СКО-7,5) – 35 шт;
- стол концентрационный ВУ 2100х1050 (аналог СКО-2) – 2 шт;
- стол концентрационный ВУ 1050х500 (аналог СКО-0,5) – 1 шт;
- строительный объём дополнительного цеха гравитационного обогащения – 5400 м³.

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

- центробежная отсадочная машина основного обогащения ЦОМ-5 – 10 шт;
- центробежная отсадочная контрольного обогащения машина ЦОМ-5 – 9 шт;
- перераспределительная центробежная отсадочная машина ЦОМ-5 – 2 шт;
- стол концентрационный ВУ 4500х1800 (аналог СКО-7,5) – 8 шт;
- стол концентрационный ВУ 2100х1050 (аналог СКО-2) – 1 шт;
- стол концентрационный ВУ 1050х500 (аналог СКО-0,5) – 1 шт;

– строительный объём дополнительного цеха гравитационного обогащения – 1500 м³.

В таблицах 4.3 и 4.4 приведены расчёты притока денежных средств за период освоения и эксплуатации нового, вновь возводимого, гравитационного цеха в ценах 2023 г.

Таблица 4.3 – Расчёт операционной деятельности

Показатель	Удельные значения, руб/т	Вариант схемы	
		I	II
Питание ЦОМ, тыс.т		912 518,10	912 518,10
Среднее содержание Au в питании ЦОМ, г/т		0,38	0,38
Сквозное извлечение Au, %		9,39	9,17
Товарное Au, кг		32 560,47	31 797,61
Цена Au, гр		4 254,90	4 254,90
Выручка от реализации Au, тыс. руб.		138 541 547,39	135 295 632,55
Эксплуатационные затраты (без амортизации):			
- ФОТ рабочих по переделу, тыс. руб.		9 600 000,00	4 800 000,00
- Страховые взносы	30%	2 880 000,00	1 440 000,00
- электроэнергия		4 865 526,09	7 486 838,10
- содержание и ремонт оборудования	30%	12 599 575,30	10 332 000,00
- прочие затраты цеховые затраты	10%	2 994 510,14	2 405 883,81
Затраты на аффинаж, тыс. руб.	1,50%	2 078 123,21	2 029 434,49
НДПИ, тыс. руб.		8 187 805,45	7 995 971,88
Итого эксплуатационные затраты, тыс. руб.		43 205 540,19	36 490 128,28
Амортизация ОС, тыс. руб.		7 897 939,10	4 484 084,67
Полные эксплуатационные затраты, тыс. руб.		51 103 479,29	40 974 212,95
Валовая прибыль		87 438 068,10	94 321 419,60
Налог на имущество	2,20%	1 220 366,62	343 227,94
Прибыль до налогообложения		86 217 701,48	93 978 191,66
Налог на прибыль (20%)	20%	17 243 540,30	18 795 638,33
Чистая прибыль		68 974 161,19	75 182 553,33
Сальдо от операционной деятельности		76 872 100,29	79 666 637,99

Таблица 4.4 – Расчёт инвестиционной деятельности

Показатель	Вариант схемы	
	I	II
Капитальные вложения, в т.ч., тыс. руб.	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 таблицы 4.4, несмотря на более полное извлечение золота при применении ЦОМ только в основной операции обогащения с перечисткой его концентратов на СКО, экономически целесообразно осуществлять доизвлечение золота из хвостовых продуктов ЗИФ с применением ЦОМ в основной, контрольной и перечистой операции с плавкой конечного концентрата в существующей плавильне ЗИФ.

4.3 Выводы по главе

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

Центробежно-отсадочный метод экономически эффективен при извлечении золота 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, которое имеет важное значение, 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 наложении центробежного поля эффективно извлекать в концентрат частицы полезного ископаемого средних и мелких классов крупностью с возможностью постоянного его вывода.

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

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

4. 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 подрешетной воды) на показатели извлечения золота и его содержания в концентрате.

5. Проведен комплекс исследовательских работ и испытаний центробежной отсадочной машины в заводских условиях, на ЗИФ «Покровский рудник» и ЗИФ «Высочайший». Опытно-промышленные исследования, проведенные 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 [61]. Исследования на ЗИФ ОАО «Высочайший» проводились после

модернизации конструкции аппарата ЦОМ. Наиболее важные изменения были внесены в устройство подачи подрешетной воды в корпус аппарата. Была внедрена шеститочная, тангенциальная подача в зону гидроуплотнения. Таким образом, поступающая подрешетная вода восполняет «потери» воды с разгрузкой концентрата и препятствует попаданию хвостов обогащения в подрешетную зону через зазор в гидроуплотнение. При этом максимальное извлечение золота в концентрат ЦОМ составило 35,4 % при выходе концентрата 10,2 % и степени концентрации золота 3,48.

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

7. 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.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.

ОАО – Открытое акционерное общество

ЗИФ – золотоизвлекательная фабрика

ЦОМ – центробежная отсадочная машина

МОД – машина отсадочная диафрагмовая

СКО – стол концентрационный опорный

СМШ – самородкоулавливающий шлюз

ШГН – шлюз глубокого наполнения

ШМН – шлюз мелкого наполнения

БОФ – береговая обогатительная фабрика

ИТР – инженерно-технический работник

МОД – машина отсадочная диафрагмовая

КР – концентратор разведочный

НП – насос песковый

ЦОО – центробежно-отсадочное обогащение

ДУ – диаметр условный

ККГЦ – короткокonusный гидроциклон

СТС – центробежный концентратора типа «Итомак»

Пр.п. – промпродукт

К-т – концентрат

Хв. – хвостовой продукт

МНК – метод наименьших квадратов

ГОСТ – государственный стандарт

УХЛ4 – климатическое исполнение

НИОКР – научно-исследовательская и опытно-конструкторская работы

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цианид натрия: обзор мирового рынка 2022 г. и прогноз до 2031 г. // [Электронный ресурс] URL:<https://marketpublishers.ru/r/S71E968291ARU.html> (07.04.2022)
2. Рынок золота в России: итоги 2022 года // URL: <https://zolotodb.ru/link/4812>
3. Волков А.В. Золотосульфидные месторождения вкрапленных руд Северо-востока России: особенности геолого-генетической и поисковой модели// URL: https://zolteh.ru/regions/zoloto_sulfidnye_mestorozhdeniya_vkraplennykh_rud_severovostoka_rossii_osobennosti_geologo_genetiche/ (07.04.2023).
4. Сенченко А.Е., Федотов К.В., Федотов П.К., Бурдонов А.Е. Технологическая оценка обогатимости руды гравитационными методами // Известия Тульского государственного университета, 2020, - С. 262-280.
5. Chanturiya V.A., Kondratiev S.A. Contemporary Understanding and Developments in the Flotation Theory of Non-Ferrous Ores // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2019. 40(6). - С. 390-401.
6. Мырзалиев Б.М., Ногаева К.А., Молмакова М.С. Определение целесообразности гравитационного обогащения руды месторождения "Джамгыр" // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 10 (141). - С. 153-165.
7. Пелих В.В., Салов В.М., Бурдонов А.Е., Лукьянов Н.Д. Применение Knelson CVD-технологии для обогащения золотосвинцовой руды // Обогащение руд. 2019. № 1(379). - С.3-10.
8. Пат. 2430784 С2, РФ, МПК В03В 5/32, В03В 5/10. Центробежно-отсадочный концентратор / Маньков В.М., Лучко М. С., Патрин С.А. (Россия). - 20091494227/03, заявлено 29.12.2009; Опубл. 10.10.2011. Бюл. №28
9. Замятин О. В., Лопатин А. Г. Чугунов А. Д. и др. Обогащение золотосодержащих песков и конгломератов // Москва, «Недра», 1975, - С. 264.
10. Бурдин В.Н. Бурдин Н.В. Физические основы технологии промывки золотосодержащих руд и песков. // Современные наукоемкие технологии, 2009, №8. - С. 16-22.
11. Кантаева А.С., Брус И.Д., Ворошилов Ф.А., Разделение. Гетерогенных систем. // Томский политехнический университет, 2012 - 24 с.

12. Создание и внедрение технологий и высокопроизводительного оборудования для извлечения золота мелких классов из руд и песков: Отчет о НИР (заключительный) / Иргиредмет; Руководитель В.М. Маньков. – Иркутск, 2000. – 94 с.
13. Замятин О. В., Маньков В. М. Технологическая эффективность отсадочной технологии обогащения золотосодержащих песков // Цветные металлы. 1991. – №11 – С. 46.
14. Применение отсадочных машин при разработке россыпей на Аляске, НБЛЗолото: благородные металлы и драгоценные камни мира. – 2001. – №10. – С. 19-22, переводчик Егупов С.А.
15. Кавчик Б.К. Центробежные концентраторы для извлечения мелкого золота // URL: <https://zolotodb.ru/article/10784/?page=all> (21.07.2020).
16. Барченков В.В., Золотарев А.П. Извлечение золота из рудного сырья на концентраторе // URL: <https://zolotodb.ru/article/10777> (21.07.2020).
17. Лодейщиков В. В. Гравитационное обогащение, цианирование и флотация // [Электронный ресурс] URL: <https://zolotodb.ru/article/10442> (14.11.2022)
18. Самылин Н. А., Золотко А.А., Починок В.В. Отсадка. // Москва, Недра, 1976, 320 с.
19. Кизевальтер Б.В. Закономерности разрыхления слоя частиц стационарным потоком жидкости // «Научно-информационный бюллетень института Механобр», 1956, №2, - С. 54-61.
20. Кизевальтер Б.В. Влияние числа и размаха колебаний жидкости в процессе отсадки. В кн.: «Вопросы теории и гравитационных методов обогащения полезных ископаемых» // Москва, Госгортехиздат, 1960, - С. 11-21.
21. Верховский И.М., Виноградов Н. Н., Артуринов О.М. Исследование кинетики процесса отсадки // «Известие вузов. Горный журнал», 1959, №10, - С. 141-148.
22. Рафалес-Ламарка Э. Э. К вопросу определения давления вод постелью отсадочных машин. – «Труд УкрНИИУглеобогащения». М.: 1968, т5. - С 16-19.
23. Карлина А.И. Применение процесса мокрого рудного самоизмельчения для дезинтеграции глины и песков металлоносных россыпей // Вестник ИрГТУ. 2014. № 10 (93). - С. 189-195.
24. Карлина А.И. Изучение и совершенствование математических моделей

гравитационного обогащения полезных ископаемых // Вестник ИрГТУ. 2014. № 11 (94). - С. 211-216.

25. Савченко А. А., Каимов Е.В., Карлина А.И. Влияние структуры внешних воздействий на динамические свойства механических колебательных систем // Кулагинские чтения: материалы XI Международная науч.-паратактическая конференция. Чита: Изд-во ЗабГУ, 2011. - С. 203-205.

26. Карлина А.И. Изучение гидродинамики гравитационного обогащения полезных ископаемых // Вестник ИрГТУ. 2015. № 3. - С. 194-199.

27. Карлина А.И. Совершенствование математических моделей гравитационного обогащения полезных ископаемых из результатов опыта отечественных и зарубежных исследований // Вестник ИрГТУ. 2015. № 1 (96). - С. 118-124.

28. Кизевальтер Б.В. Теоретические основы гравитационных процессов обогащения. // Москва, Недра, 1979. – 295 с.

29. Виноградов Н. Н. Вопросы теории и интенсификации процесса отсадки: диссертация на соискание учёной степени д-ра техн. Наук. Институт горючих ископаемых.// Москва, 1964. – 367 с.

30. Рафалес-Ламарка Э. Э. Применение методов теории вероятностных процессов при исследовании расслоения постели отсадочных машин // Труды Укр. НИИ углеобогащения. – М., 1964. – Т. 3. – С. 50–68.

31. Лященко П.В. Гравитационные методы обогащения // П.В. Лященко. – Москва, Гостоптехиздат, 1940. – 359 с.

32. Меринов Н.Ф. Гравитационные методы обогащения полезных ископаемых: конспект лекций // Екатеринбург, Изд-во УГГУ, 2005. – 205 с.

33. Косой Г.М. Динамика движения твёрдых частиц во вращающихся турбулентных потоках / Г.М. Косой, В.В. Сапешко // Теорет. основы хим. технологии. – 1980. – Т. 14. – № 3. – С. 452-458.

34. Косой Г.М. Теоретические основы разделения минеральных суспензий в закрученных турбулентных потоках и интенсификация технологических процессов в гидро- и турбоциклонах: автореф. дисс. д-ра техн. наук: 05.15.08 / Косой Г. М. – Днепропетровск, 1990. – 38 с.

35. Богданович А.В. Интенсификация процессов гравитационного обогащения в

- центробежных полях / А.В. Богданович // Обогащение руд. – 1999. – № 1-2. – С. 33-36.
36. Богданович А.В. Исследование работы гравитационных сепараторов для обогащения тонкозернистых материалов / А.В. Богданович, А.М. Васильев // Обогащение руд. – 2005. – № 1. – С. 12-15.
37. Богданович А.В. Теоретические основы и методы повышения эффективности разделения при гравитационном обогащении руд: автореф. дис. д-ра техн. наук: 25.00.13 / Богданович А. В. – М., 2003. – 44 с.
38. Федотов К.В. Теория и практика обогащения золотосодержащего сырья в центробежных концентраторах: автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.15.08 / Федотов К.В. – Иркутск, 2000. – 35 с.
39. Афанасьев А.И. Теоретический анализ внутренней турбулизации пристеночного слоя центробежного концентратора / А.И. Афанасьев, Ю.П. Морозов, Д.В. Черепанов // Научные основы и практика разведки и переработки руд и техногенного сырья с извлечением благородных металлов: материалы Междунар. науч.-техн. конф., 12-15 ноября 2002 г. – Екатеринбург: УГГГА, 2002. – Ч. 2. – С. 53-58.
40. Федотов, К.В. Эффективные технологии гравитационного обогащения для комплексной переработки исходного и техногенного минерального сырья / К.В. Федотов А.Е. Сенченко, Ю.В. Куликов // Сборник материалов VIII Конгресса обогатителей стран СНГ. – Т. 1. – М., 2011. – С. 193-197.
41. Водовозов К.А. Математический анализ движения частиц по поверхности конуса центробежного концентратора при отрывающей силы тяжести / К.А. Водовозов // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: материалы Междунар. науч.-техн. конф., 22-27 мая 2006 г. – Екатеринбург: Изд-во АМБ, 2006. – С. 144-145.
42. Брагин, П.А. Разработка комплекса технологий и оборудования для переработки минерального сырья россыпных месторождений: автореф. дисс. д-ра. техн. наук: 05.15.08 / Брагин Павел Алексеевич. – М., 1993. – 38 с.
43. Морозов Ю.П. Анализ гравитационного разделения минералов в стесненных условиях движения // Известия вузов. Горный журнал. – 2011. – № 4. – С. 93-98.
44. Морозов Ю.П. Теоретическое обоснование и разработка новых методов и аппаратов извлечения тонкодисперсных благородных металлов из руд: дис. д-ра

техн. наук: 25.00.13 / Морозов Ю. П. – Екатеринбург, 2001. – С. 397.

45. Морозов, Ю.П. Технологии дополнительного извлечения золота при переработке сульфидных медных и медно-цинковых руд / Ю.П. Морозов // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: мат-лы Междунар. науч.-техн. конф., 23-24 апреля 2014 г. – Екатеринбург: Изд-во «Форт Диалог-Исеть», 2014. – С. 3-7.

46. Дэвидсон Дж., Харрисон Д. Псевдооживление: Пер. с англ. – М.: Химия, 1974. – 725 с.

47. Пикок К. Роль технологии CVD (непрерывная регулируемая разгрузка концентрата) компании «KNELSON» в улучшении показателей обогащения минерального сырья // Золотодобыча №119, 2008, - С. 23-28

48. Псевдооживление / Под ред. В. Г. Айнштейна, А. П. Баскакова. – М.: Химия, 1991. – 400 с.

49. Пат. 4998986 США, Centrifugal jig pulsing system / 12.03.1991 / Thomas P. Cambell

50. Пат. 4056464 США, Mineral jig. 01.11.1977 / Donald James Cross

51. Пат. 4574046 США, Centrifugal jig for ore beneficiation /04.03.1986 / Earnest A. Sprow

52. Пат. 2209679, РФ, МПК В03В 5/10. Машина отсадочная центробежная / Митин Л. А., Гаськин А.И. (Россия). – 2001119827/03, заявлено 16.07.2001; Оpubл. 10.08.2003.

53. Rotating centrifugal jig with pulsator // Патент США № 4898666. 06.02.1990 / Christopher G. Kelsey

54. Qiang Dai Simulation of packed column jigging//URL: <https://researchrepository.wvu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1969&context=etd> (05.03.2021)

55. Алгебраистова Н.К., Бурдакова Е.А., Маркова А.С., Макшинин А.В. Обогащение благороднометалльного сырья на центробежных аппаратах // Цветные металлы, 2017, - С.18-22.

56. Перепелкин М.А., Семькин Е.С., Мирошникова Л.К., Уфатова З.Г. Моделирование процесса центробежной сепарации минеральных частиц в гравитационном поле с применением метода конечных элементов // Горная промышленность, №1, 2022, - С. 128-132

57. Gibson B., Wonyen D.G., Chehreh Chelgani S. A review of pretreatment of diasporic bauxite ores by flotation separation // Minerals Engineering. – 2017. – № 114. – С. 64-73
58. Chanturiya V.A. Innovation-based processes of integrated and high-level processing of natural and technogenic minerals in Russia // IMPC 2018 – 29th International Mineral Processing Congress. – Moscow, Russia, 2019. – С. 2-12.
59. Романченко А.А. Моделирование процесса центробежной сепарации золотосодержащего минерального сырья: автореф. дис. к.д-ра техн. наук: 05.15.08 / Романченко Артём Анатольевич. – Иркутск, 2000. – 18 с.
60. Фалей Е.А. Исследование закономерностей и разработка технических решений турбулизационной центробежной сепарации минерального сырья: автореф. дис. к.д-ра техн. наук: 25.00.13 / Фалей Е. А. – Екатеринбург, 2014. – 21 с.
61. Испытания в промышленных условиях центробежной отсадочной машины для гравитационного обогащения руд цветных и благородных металлов / Лучко М.С., Федотов П.К. // Науки о Земле. 2019. №3. - С. 349-357
62. Огурцов В.А., Огурцов А.В., Галиева А.Ф. Исследование распределения частиц мелкой фракции в слое сыпучего материала на поверхности сита виброгрохота // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2008. – Выпуск 3. – С. 1-3.
63. Испытание и внедрение опытно-промышленного образца обогатительного комплекса с отсадочными машинами на драге № 91: Отчет о НИР /Иргиредмет; Руководитель В.С. Томин. – 16-82-103.- Иркутск, 1984. – 86 с.
63. Замятин О.В., Кавчик Б.К. Расчёт потерь золота с эфелями промывочных приборов по данным ситовых анализов // Золотодобыча №111, 2008, - С. 9-16
65. Кузнецов Г.Г. О механизме действия постели в отсадочной машине // Труды ВНИИ-1, Магадан, 1959. – 44 с.
66. Испытание и внедрение развитой технологии обогащения песков россыпи р. зБ. Куранах на драге № 73 и береговой обогатительной фабрике открытого способа разработки: Отчет о НИР / Иргиредмет; Руководитель В.М. Маньков.- 16-85-226. – Иркутск, 1989. – 150 с.
67. Определение технологических параметров, влияющих на интенсификацию обогащения золотосодержащих руд методом отсадки в центробежном поле / Лучко

- М.С., Федотов П.К. // Материалы междунар. совещ. «Инновационные процессы комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения-2020 21-26 сент. г. Апатиты), – Апатиты, 2020. – С. 250-252
68. Изучение технологических свойств руды месторождения «Покровское II» (пробы ТП-20, ТП-21, ТП-22, ТП-23): Отчёт о НИР/ОАО «Иргиредмет»; Руководитель Муллов В.М.– Иркутск, 2008.
69. Определение эффективности применения центробежного концентратора «Итомак» для снижения потерь золота в хвостах ЗИФ ОАО «Покровский рудник»: Отчет о НИР/ЗАО «ПХМ Инжиниринг». – М., 2007. – 59 с.
70. Разработать конструкторскую документацию, изготовить и испытать в промышленных условиях центробежную отсадочную машину производительностью 5-15 т/ч (ЦОМ-5) для гравитационного обогащения руд цветных и благородных металлов: Информационный отчёт/ОАО «Иргиредмет»; Руководитель Маньков В.М.– Иркутск, 2009.
71. Применение центробежной отсадочной машины для контрольного обогащения золотосодержащего сырья на ЗИФ / Лучко М.С. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2022. № 4 . - С. 67-85
72. 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
73. Федотов П. К., Сенченко А.Е., Федотов К. В., Бурдунов А.Е. Гравитационно-флотационное обогащение золотосодержащей руды // Цветная металлургия, 2021, С. 4-15
74. Е. С. Слепцова, Л. В. Никифорова, Б. В. Яковлев, А. И. Матвеев. Математическое моделирование процесса концентрации тяжелых частиц в постели отсадочной машины // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) – 2014. – С. 239-244.
75. Пелих В. Центробежные концентраторы. <https://dprom.online/mtindustry/tsentrobezhnye-kontsentratory/>
76. Шумилова Л. В., Костикова О. С. Анализ влияния вещественного состава руды серебро-полиметаллического месторождения «Гольцовое» на показатели обогащения

// Вестник Забайкальского государственного университета. – 2015. – № 5 (120). – С. 46-55.

77. Бочаров В.А., Гурников А.В., Гурников В.В. Анализ процессов разделения золотосодержащих продуктов в концентраторах Knelson и Falcon SB* // Обогащение руд – 2002 №2. – С.17-21

78. Королев И. А., Удовицкий В.И. Математическое моделирование процессов тяжелосредного обогащения при оптимизации проектных решений углеобогащительных фабрик. III международная научно-практическая конференция «Современные тенденции и инновации в науке и производстве» - С. 38-39. 02-04 апреля 2014 //Междуреченск, КУЗГТУ.

79. Построение и сравнение регрессионных моделей обогащения золотосодержащего сырья в центробежной отсадочной машине / Лучко М.С., Федотов П.К., Лукьянов Н.Д. // Вестник Забайкальско-го государственного университета. 2022. № 1. - С. 31-39

80. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ: В 2-х книгах / Кн.1. – М: Финансы и статистика, 1986, 366 с.

81. Апарцин, А.С. О новых классах линейных многомерных уравнений I рода типа Вольтерра // Изв. вузов. Математика. 1995. – № 11. – С. 28-41.

82. Применение инструментов статистического анализа для обработки данных обогащения золотосодержащего сырья методом отсадки в центробежном поле / Лучко М.С., Федотов П.К., Лукьянов Н.Д. // Материалы междунар. совещ. «Проблемы комплексной и экологически безопасной переработки природного и техногенного минерального сырья («Плаксинские чтения-2021», 04-08 окт., г. Владикавказ) – Владикавказ, 2021. – С. 346-350

83. Nirlipta P. N., Bhatu K. P. Separation behavior of iron ore fines in Kelsey Centrifugal jig // Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, 2013, 1, - С. 85-89.

84. Применение центробежной отсадочной машины для обогащения минерального сырья на ЗИФ / Лучко М.С. // Материалы технико-экономического совещания совещания «Развитие горнодобывающей промышленности в современных условиях» («Недра Сибири-2022» 30 нояб. -01 окт. г. Иркутск) – Иркутск, 2022. – С.

196-199

85. Агабалян А.Ю. Техничко-экономическое обоснование полноты извлечения металлов в концентрат // Вестник Национального политехнического университета Армении. Metallurgy, материаловедение, недропользование. – 2016. – № 2. – С. 97-108.
86. Адагамов. Э.В. Технология руд цветных металлов // Москва, МИСИС, 2007 – 515 с.
87. Агабалян Ю.А. Общая теория оптимального основания недр (твердые полезные ископаемые) // Saarbrecken (Германия), Palmarium Academic Publishing, 2015. – 288 с.
88. Коннова Н. И., Пехова Л. П. Изучение возможности применения современных гравитационных аппаратов Kelsey и Gemini // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. № 7. – С. 193–196.
89. Aryasuta N., Jena M. S., Mandre N. R. Application of enhanced gravity separators for fine particle processing: An overview // Journal of Sustainable Metallurgy. 2021. Vol. 7. – С. 315–339.
90. Dilip M., Rajenda K. R., Asim K. M. Application of enhanced gravity technique for separation of iron phase from LD slag // Metallurgical Research and Technology. 2019. Vol. 116, No. 3. 9 с.
91. Лучко М. С., Патрин С. А. Новое оборудование для золотодобывающей промышленности // Золотодобыча. 2014. № 6. – С. 16–19.
92. Butcher G., Laplante A. R. Recovery of gold carriers at the Granny Smith mine using Kelsey jigs J1800 // Advances and gravity concentration symposium. Non-coal separations session. SME annual meeting. 2003. – С. 155–164.
93. Лодейщиков В. В. Центробежные отсадочные машины «Келси». Первый опыт промышленного использования на предприятиях золотодобывающей промышленности. URL: <https://zolotodb.ru/article/10313> (13.01.2022).
94. Chen Q., Yang H., Tong L., Liu Z., Chen G., Wang J. Analysis of the operating mechanism of a Knelson concentrator // Minerals Engineering. 2020. Vol. 158.
95. Замятин О. В., Маньков В. М. Применение отсадочной технологии обогащения золотосодержащих песков. URL: <https://zolotodb.ru/article/10952/13.11.2021>).
96. Tucker P. Modeling the Kelsey centrifugal jig // Minerals Engineering. 1995. Vol. 8,

No. 3. – С. 333–336.

97. Barbosa da Costa J. H., Delbony H. Junior. Concentracao de minerais com jigue centriífugo Kelsey // II Congresso de pesquisa e inovacao da rede norte nordeste de educacao tecnológica. João Pessoa, Brazil, 2007. 16 с.

98. Ананенко К. Е., Кондратьева А. А., Зашихин А. В. Извлечение тяжелых минералов центробежными аппаратами // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2–2. 8 с.

99. Uslu T., Celep O. Enrichment of low-grade colemanite concentrate by Knelson Concentrator // Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2015. Vol. 115. No 3. – С. 229—233.

100. Woodcock F. C., Laplante A. R. Use of a Knelson unit to quantify gravity recoverable gold in an ore. Institute: McGill University (Canada), dissertation year: 1996.

101. Zhu X., Tao Y. J., Sun Q., Xue Y., Zhang W. Particle migration regularity in compound force field of enhanced gravity concentrator // International Journal of Coal Preparation and Utilization. 2019. Vol. 39. No 4. – С. 219—231.

102. Солоденко А. А. Испытания на эффективность центробежных концентраторов Falcon при обогащении золотосодержащей руды коренного месторождения // Цветная металлургия. – 2012. – № 6. – С. 39 – 41.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

УТВЕРЖАЮ

Главный инженер ЗИФ №1

ОАО «Покровский рудник»



М.К. Минин

«*д*» *апреля* 2009 г.

АКТ

**о проведении опытно-промышленных испытаний экспериментального
образца центробежной отсадочной машины ЦОМ-5**

Мы, нижеподписавшиеся, от ОАО «Покровский рудник» - главный технолог ЗИФ №1 Завалюев А.С., от ОАО «Иргиредмет» - ведущий инженер Лучко М.С. и ведущий инженер Патрин С.А. составили настоящий акт о том, что в период с 12 по 31 марта 2009 г. произведен монтаж и опытно-промышленные испытания экспериментального образца центробежной отсадочной машины ЦОМ-5 на ЗИФ ОАО «Покровский рудник».

Целью опытно-промышленных испытаний было определение эффективности работы ЦОМ-5 на отвальных продуктах фабричного передела.

Установлены следующие оптимальные режимы работы ЦОМ-5:

- технологическая производительность **15 - 24 т/ч**;
- расход подрешетной воды **3,4 л/с** на 1 м² решета;
- выход концентрата **22,4%**;
- частота вращения отсадочной камеры **150 мин⁻¹**;
- частота пульсации **240 мин⁻¹**.

При указанных параметрах извлечение золота в концентрат центробежной отсадочной машины ЦОМ-5 составило **29,9% - 34,4%** (по данным опытных работ).

В ходе проведения опытно-промышленных испытаний ЦОМ-5 выявлены ее следующие конструктивные недостатки:

1. Недостаточная глубина хвостового желоба, что приводило к выплеску хвостового продукта при частоте вращения отсадочной камеры более 100 мин^{-1} ;
2. Низкая надежность примененного фторопластового кольцевого гидроуплотнения;
3. Значительный дебаланс ротора при полной загрузке ЦОМ-5.

Выводы и рекомендации:

1. В целом экспериментальный образец центробежной отсадочной машины ЦОМ-5 является работоспособным и технологически эффективным аппаратом.
2. Рекомендовано на основании полученных результатов испытаний разработать опытный образец центробежной отсадочной машины ЦОМ-5 с устранением конструктивных недостатков, выявленных при испытании экспериментального образца.
3. При корректировке чертежей и изготовлении опытного образца машины выполнить следующие доработки ее конструкции:
 - увеличить глубину хвостового желоба;
 - изменить конструкцию гидроуплотнения на более надежное (износостойкое);
 - устранить дебаланс ротора.
4. Экспериментальный образец ЦОМ-5 отправить в ОАО «Иргиредмет» для устранения недостатков конструкции.

От ОАО «Покровский рудник» Завалюев А.С.

От ОАО «Иргиредмет»

Лучко М.С.

Патрин С.А.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акт
 проведения стендовых испытаний
 центробежной отсадочной машины ЦОМ-5

г. Иркутск

30 сентября 2009 г.

Мы, нижеподписавшиеся,
 от ОАО «Иргиредмет»:

Маньков В.М. - зав. лабораторией

Лучко М.С. - вед. инженер

Патрин С.А. - вед. инженер

от ООО «ЗНОМ «ЭНРОФ»:

Менщиков А.В. - гл. конструктор

составили настоящий акт о том, что в соответствии с Договором №1/2 ИР-07 и дополнительным соглашением №2 к нему выполнена доработка конструкции ЦОМ-5 по результатам первого этапа ее опытно-промышленных испытаний и проведены стендовые испытания доработанной конструкции аппарата.

При доработке конструкции была изменена система гидроуплотнения, способ подачи подрешетной воды и увеличена глубина хвостового желоба.

Для проведения стендовых испытаний была разработана и смонтирована технологическая схема, включающая ЦОМ-5, два песковых насоса П12,5/12,5, гидроциклон ККГЦ-120 и транспортные магистрали (рисунок 1, 2).

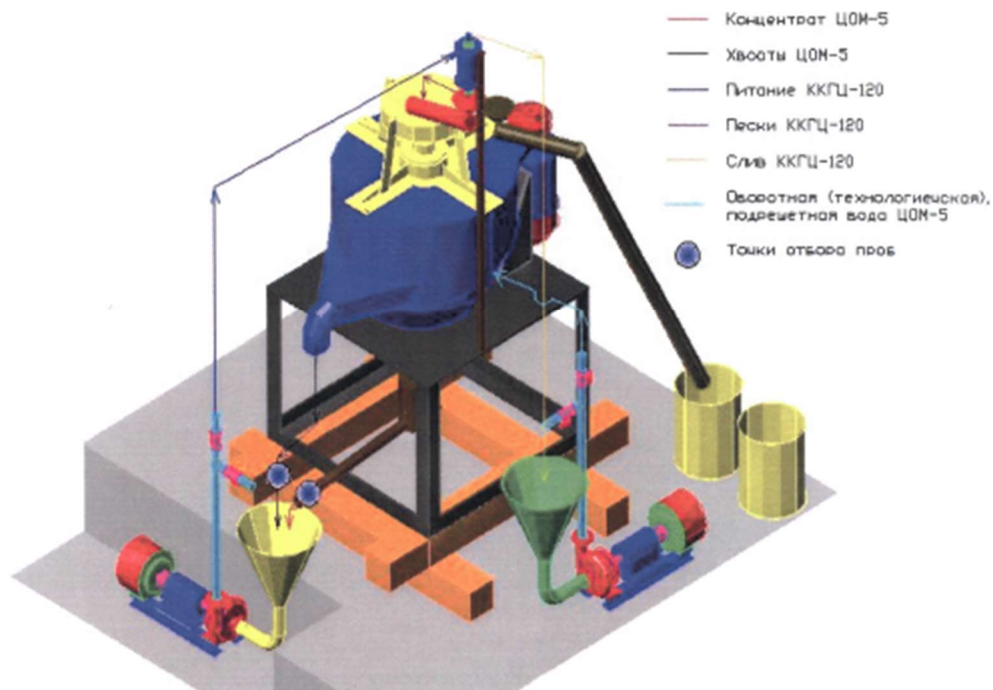


Рисунок 1- Технологическая схема установки для проведения стендовых испытаний ЦОМ-5



Рисунок 2 – Общий вид установки для проведения стендовых испытаний ЦОМ-5

Стендовые испытания проводились с 3 июля по 30 сентября с обогащением смеси золотосодержащих руд месторождений «Голец Высочайший», «Венера» и «Покровское» крупностью мельче 2-х мм. Время работы аппарата под нагрузкой составило 45 восьмичасовых смен или 15 суток. При этом было проведено 8 технологических опробований при различных режимах работы отсадки с определением содержания серы в продуктах обогащения, см. таблицу.

Таблица – Результаты стендовых испытаний.

Номер опыта	Наименование продукта обогащения	Выход продуктов обогащения, %	Содержание серы, %	Извлечение серы, %	Примечание
1	Концентрат	47,77			Частота вращения отсадочной камеры 130 мин ⁻¹
	Хвосты	52,23			Частота пульсации днища 200 мин ⁻¹
	Исходное	100,00			Амплитуда движения днища 14 мм
2	Концентрат	66,73			Частота вращения отсадочной камеры 150 мин ⁻¹
	Хвосты	33,27			Частота пульсации днища 200 мин ⁻¹
	Исходное	100,00			Амплитуда движения днища 14 мм
3	Концентрат	46,67			Частота вращения отсадочной камеры 180 мин ⁻¹
	Хвосты	53,33			Частота пульсации днища 200 мин ⁻¹
	Исходное	100,00			Амплитуда движения днища 14 мм
4	Концентрат	47,93			Частота вращения отсадочной камеры 200 мин ⁻¹
	Хвосты	52,07			Частота пульсации днища 200 мин ⁻¹
	Исходное	100,00			Амплитуда движения днища 14 мм
5	Концентрат	48,93	0,55	75,61	Частота вращения отсадочной камеры 130 мин ⁻¹
	Хвосты	51,07	0,17	24,39	Частота пульсации днища 200 мин ⁻¹
	Исходное	100,00	0,36	100,00	Амплитуда движения днища 12 мм
6	Концентрат	32,20	0,5	58,27	Частота вращения отсадочной камеры 150 мин ⁻¹
	Хвосты	67,80	0,17	41,73	Частота пульсации днища 200 мин ⁻¹
	Исходное	100,00	0,28	100,00	Амплитуда движения днища 12 мм
7	Концентрат	25,27	0,6	51,64	Частота вращения отсадочной камеры 180 мин ⁻¹
	Хвосты	74,73	0,19	48,36	Частота пульсации днища 200 мин ⁻¹
	Исходное	100,00	0,29	100,00	Амплитуда движения днища 12 мм
8	Концентрат	22,29	0,67	46,63	Частота вращения отсадочной камеры 200 мин ⁻¹
	Хвосты	77,71	0,22	53,37	Частота пульсации днища 200 мин ⁻¹
	Исходное	100,00	0,32	100,00	Амплитуда движения днища 12 мм

При проведении стендовых испытаний аппарата извлечение серы изменялось от 46,6% до 75,6% при выходе концентрата от 22,3 до 48,9%.

За время проведения стендовых испытаний отказов в работе машины не было, при этом износ гидроуплотнения происходил равномерно по всей площади резиновых колец и составил в среднем 1,2 мм (рисунки 3 и 4).



Рисунок 3 – Нижнее вращающееся кольцо гидроуплотнения ЦОМ-5 после окончания стендовых испытаний

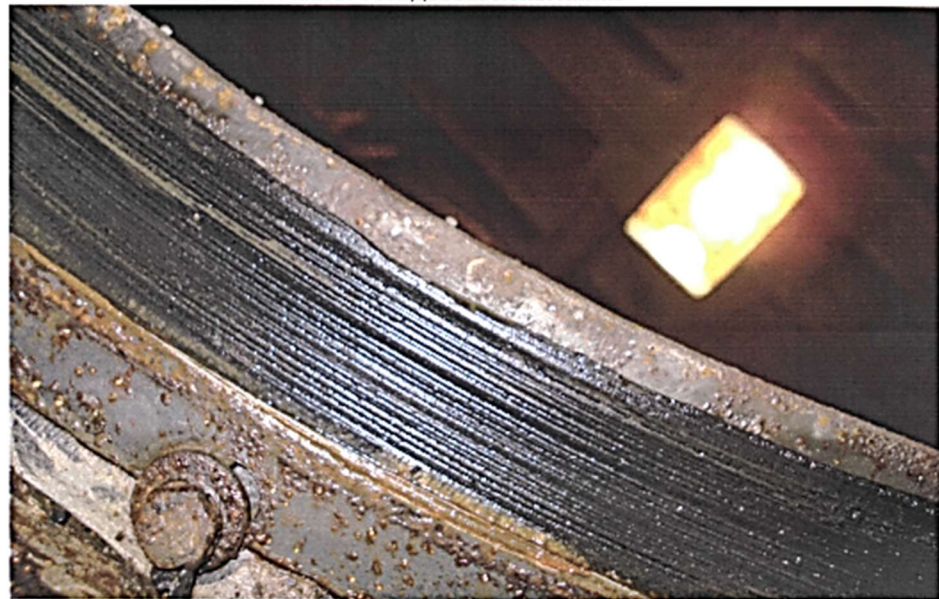


Рисунок 4 – Верхнее неподвижное кольцо гидроуплотнения ЦОМ-5 после окончания стендовых испытаний

В целом центробежная отсадочная машина ЦОМ-5 готова к продолжению опытно-промышленных испытаний на предприятии без проведения работ по совершенствованию ее конструкции.

Маньков В.М.	
Лучко М.С.	
Патрин С.А.	
Менщиков А.В.	

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Утверждаю

Главный инженер

ОАО «Высочайший»



А.И. Лазута

«28» декабря 2009г.

АКТ

**опытно-промышленных испытаний экспериментального образца
центробежной отсадочной машины ЦОМ-5**

Мы, ниже подписавшиеся, от ОАО «Высочайший»:

Д.А. Серебренников - главный обогатитель ОАО «Высочайший»

О.В. Дубков - начальник ЗИФ ОАО «Высочайший»

От ОАО «Иргиредмет»

М.С. Лучко - ведущий инженер ОАО «Иргиредмет»

С.А. Патрин - ведущий инженер ОАО «Иргиредмет»

Составили настоящий акт о том, что на ЗИФ ОАО «Высочайший» в период с 7 декабря 2009 по 25 декабря 2009 произведен монтаж и опытно-промышленные испытания экспериментального образца центробежной отсадочной машины ЦОМ-5 производительностью 15 т/ч.

Питанием экспериментального образца ЦОМ-5 служил хвостовой продукт ЗИФ ОАО «Высочайший» крупностью 79 – 83% менее 0,074 мм с содержанием золота 0,6 г/т и плотностью 12%. Подача питания в центробежную отсадочную машину осуществлялась самотеком.

Продолжительность работы центробежной отсадочной машины за время испытаний составило 168 ч, в т.ч. под нагрузкой 162 ч.

Эффективность работы отсадочной машины оценивали по извлечению золота в концентрат и хвосты аппарата с определением его содержания в указанных продуктах методами пробирного анализа, и по количеству золота

полученного при обогащении хвостов ЗИФ на ЦОМ-5 и сланного в кассу предприятия.

Извлечение золота в концентрат центробежной отсадочной машины составило 35,4% при:

- производительности – 9,62 т/ч;
- расходе подрешетной воды – 5,2 м³/ч на 1м² решета;
- выходе концентрата – 10,2%;
- частоте вращения отсадочной камеры – 225 мин⁻¹;
- частоте пульсации подвижного днища – 280 мин⁻¹;
- амплитуда колебаний подвижного днища – 9 мм;
- диаметре концентрационной насадки – 12 мм.

Полученные в результате опытно-промышленных испытаний показатели работы ЦОМ-5 приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Показатели работы ЦОМ-5 полученные в результате опытно-промышленных испытаний на ЗИФ ОАО «Высочайший».

Наименование показателей	Значение
Количество переработанного материала, тыс. т.	1,62
Производительность часовая, т/ч	9,06 - 10,34
Суммарная установленная мощность двигателей, кВт	22,5
Выход концентрата, %	8,2 – 12,2
Содержание золота в концентрате, г/т	2,1 – 2,9
Извлечение золота в концентрат, %	26,5 – 35,4
Расход технологической воды на 1 т обогащенного материала, м ³ /час/т	0,52 – 0,62

В ходе проведения опытно-промышленных испытаний ЦОМ-5 выявлены следующие конструктивные недостатки:

• отклонение плоскости подвижного кольца гидроуплотнения от перпендикуляра к оси вращения отсадочной камеры, что приводит к быстрому износу колец гидроуплотнения;

- дисбаланс отсадочной камеры;
- недостаточная пропускная способность пустотелого питающего вала при обогащении сильно обводненного продукта;

полученного при обогащении хвостов ЗИФ на ЦОМ-5 и сланного в кассу предприятия.

Извлечение золота в концентрат центробежной отсадочной машины составило 35,4% при:

- производительности – 9,62 т/ч;
- расходе подрешетной воды – 5,2 м³/ч на 1м² решета;
- выходе концентрата – 10,2%;
- частоте вращения отсадочной камеры – 225 мин⁻¹;
- частоте пульсации подвижного днища – 280 мин⁻¹;
- амплитуда колебаний подвижного днища – 9 мм;
- диаметре концентрационной насадки – 12 мм.

Полученные в результате опытно-промышленных испытаний показатели работы ЦОМ-5 приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Показатели работы ЦОМ-5 полученные в результате опытно-промышленных испытаний на ЗИФ ОАО «Высочайший».

Наименование показателей	Значение
Количество переработанного материала, тыс. т.	1,62
Производительность часовая, т/ч	9,06 - 10,34
Суммарная установленная мощность двигателей, кВт	22,5
Выход концентрата, %	8,2 – 12,2
Содержание золота в концентрате, г/т	2,1 – 2,9
Извлечение золота в концентрат, %	26,5 – 35,4
Расход технологической воды на 1 т обогащенного материала, м ³ /час/т	0,52 – 0,62

В ходе проведения опытно-промышленных испытаний ЦОМ-5 выявлены следующие конструктивные недостатки:

отклонение плоскости подвижного кольца гидроуплотнения от перпендикуляра к оси вращения отсадочной камеры, что приводит к быстрому износу колец гидроуплотнения;

- дисбаланс отсадочной камеры;
- недостаточная пропускная способность пустотелого питающего вала при обогащении сильно обводненного продукта;

- быстрый износ стенок пустотелого питающего вала.

Выводы

1. Экспериментальный образец центробежной отсадочной машины ЦОМ-5 является работоспособным и технологически эффективным аппаратом.

2. Рекомендуется на основании полученных результатов опытно-промышленных испытаний экспериментального образца центробежной отсадочной машины ЦОМ-5 разработать опытный образец центробежной отсадочной машины ЦОМ-5.

3. При корректировке чертежей и изготовлении опытного образца аппарата выполнить следующие доработки ее конструкции:

- устранить отклонение плоскости подвижного кольца нижнего гидроуплотнения от перпендикуляра к оси вращения отсадочной камеры;
- устранить дисбаланс отсадочной камеры;
- увеличить пропускную способность пустотелого питающего вала;
- обеспечить долговечность и износостойкость пустотелого питающего вала путем его футерования или другим способом.

4. Экспериментальный образец центробежной отсадочной машины оставить в постоянной эксплуатации на ЗИФ ОАО «Высочайший».

От ОАО «Высочайший»

Главного обогатителя ОАО

«Высочайший»

Серебrenиков Д.А.



Начальник ЗИФ ОАО «Высочайший»

Дубков О.В.

От ОАО «Иргиредмет»

ведущий инженер ОАО «Иргиредмет»

М.С. Лучко



ведущий инженер ОАО «Иргиредмет»

С.А. Патрин

