

*На правах рукописи*

**Потемкин Вадим Андреевич**



**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ СЕПАРАЦИИ  
ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ НА ОСНОВЕ  
НАПРАВЛЕННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ  
РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СУСПЕНЗИИ**

*Специальность 25.00.13 – Обогащение полезных  
ископаемых*

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт - Петербургский горный университет».

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, профессор

*Александрова Татьяна Николаевна*

**Официальные оппоненты:**

*Ксенофонтов Борис Семенович*

доктор технических наук, профессор, академик РЭА, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана», кафедра экологии и промышленной безопасности, профессор;

*Мезенин Антон Олегович*

кандидат технических наук, научно-производственная корпорация «Механобр-техника» (акционерное общество), руководитель отдела продаж.

**Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва.**

Защита состоится 29 сентября 2021 г. в 11:00 на заседании диссертационного совета Горного университета ГУ 212.224.03 адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21 линия В.О., д.2, ауд. 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте: [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru).

Автореферат разослан 29 июля 2021 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета



БОДУЭН  
Анна Ярославовна

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность темы исследования.** Россия, равно как и остальные мировые державы, стоит перед проблемой снижения качества минерального сырья как разрабатываемых, так и готовящихся к разработке месторождений. В этой связи руды, характеризующиеся низким содержанием компонентов, тонкой вкрапленностью полезного компонента и сложным составом выходят на первый план. Примерами таких месторождений являются месторождения Арктической зоны, такие как Майское и Нежданинское.

Становится ясно, что проблема переработки таких руд как никогда актуальна, ввиду складывающейся мировой обстановки. Важным является тот факт, что концентраты, производимые обогатительными фабриками, являются сырьём для гидрометаллургической переработки. В то же время руды с относительно высоким содержанием углерода или крупного золота не могут быть подвергнуты стандартным схемам переработки, ввиду угрозы потери ценного компонента – золота. Отсюда вытекает важная и актуальная задача современной промышленности – разработка таких технологических схем с современными решениями, которые позволят как минимизировать содержание вредных компонентов, так и повысить извлечение ценных, что позволит получить продукты, пригодные к металлургической переработке.

Значительный прогресс, достигнутый учёными многих стран в направлении переработки упорных руд, не отменяет того факта, что при эксплуатации подобного рода месторождений предприятия несут потери как на этапе обогащения, так и в дальнейшем при металлургической переработке. Это определяет возникающую необходимость расширения классификации упорных руд, разработку новых и модернизацию стандартных схем обогащения, применение современных методов численного и математического моделирования.

**Степень разработанности темы исследования.** Многие отечественные учёные посвятили долгие годы проблеме изучения упорных золотосодержащих руд. Наиболее известные среди них

Плаксин И.Н., Абрамов А.А., Лодейщиков В.В., Чантурия В.А. Среди зарубежных представителей научной среды выделяются следующие имена: Годэн А.М., O'Connor С., J.J. Cilliers. Данными учёными показана необходимость развития методов обогащения золотосодержащих руд.

В ходе аналитического обзора современной научной литературы установлена необходимость развития технологии обогащения золотосульфидных руд, к числу которых относятся месторождения Майское и Нежданинское. В этой связи разработка эффективных технологий переработки золотосодержащих руд Арктической зоны с целью повышения комплексности использования сырья и качества концентратов **является актуальной задачей** и имеет научную и практическую значимость в современных экономических условиях.

**Цель работы.** Обоснование и разработка технологических решений, обеспечивающих повышение эффективности переработки упорных золотосодержащих руд с учётом реологических особенностей минеральной суспензии и на основании использования методов математического моделирования.

**Идея исследования.** Для повышения комплексности использования повышения показателей обогащения золотосодержащего сырья Арктической зоны необходимо учитывать реологические свойства минеральных суспензий, а также факторы упорности, посредством применения современных методов численного моделирования и объектно-ориентированного программирования.

**Задачи исследований:**

1. Анализ отечественных и зарубежных источников литературы в области методов переработки упорных руд и их технологических особенностей.

2. Разработка методики оценки процесса сепарации углеродистых руд с учётом реологических особенностей минеральной суспензии с применением численного моделирования.

3. Разработка технологической схемы обогащения золотосодержащих руд Арктической зоны, в зависимости от



факторов упорности, с использованием методов объектно-ориентированного программирования и математического моделирования.

4. Экономическое обоснование разработанных методик и технологий.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования являлись упорные золотосодержащие руды Арктической зоны двух типов: содержащие свободное золото и содержащие углеродистое вещество. Предметом исследования являлись процессы переработки данного типа сырья.

**Методология и методы исследований.** Комплекс экспериментальных исследований проводился на базе лабораторий Санкт-Петербургского горного университета. В числе использованного оборудования применялся дифракционный анализатор крупности Malvern Mastersizer 2000 Hydro S, рентгенофлуоресцентный спектрометр EDX-7000 фирмы Shimadzu, установка с гидроциклоном, оснащённая зумпфом, манометром, насосом и устройством отбора проб, шаровые мельницы и ситовой анализатор, механические флотомашины НПК «Механобр-техника», пневмомеханическая флотационная машина Laarmann. Статистическая обработка экспериментальных данных осуществлялась посредством программного обеспечения STATISTICA 10.0 и Microsoft Office Excel. Численное моделирование осуществлялось в программном обеспечении Ansys Fluent, для построения трёхмерных геометрических моделей было использовано ПО Ansys SpaceClaim. Для разработки программного обеспечения для математического моделирования применялся язык объектно-ориентированного программирования Python 3.8.

**Научная новизна работы:**

1. Разработан алгоритм оценки обогатимости золотосодержащего сырья гравитационными методами на основе интерпретации данных численного и математического моделирования и методика его реализации.

2. Уточнена классификация золотосодержащего сырья, а именно расширена категория «А», к которой относятся легко

цианируемые руды.

3. Разработан алгоритм вычисления эмпирических коэффициентов реологического уравнения минеральной пульпы, модифицирующего уравнение движения Навье-Стокса.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Разработана методика оценки процесса сепарации углеродистого золотосодержащего сырья на основе интерпретации данных численного моделирования. Выявлен дополнительный новый критерий упорности золотосодержащего сырья – наличие крупного золота. Разработана программа для ЭВМ для расчёта эмпирических коэффициентов реологического уравнения минеральной суспензии (№2020618724 от 04.08.2020 г.). Разработана программа для ЭВМ для расчёта скорости осаждения минеральных сростков и классификации их по критерию обогатимости (№2019612243 от 13.02.2019 г.). Результаты исследований могут быть использованы в учебном процессе Санкт-Петербургского горного университета при проведении занятий по дисциплинам «Основы обогащения полезных ископаемых» и «Технология переработки руд цветных металлов».

#### **На защиту выносятся следующие положения:**

1. Разработанный критерий обогатимости на основе данных моделирования по разделению полиминеральных смесей позволяет выявить границы применимости гравитационных методов обогащения и определить дополнительный фактор упорности с учетом данных минералогического и вещественного состава руд для обоснования эффективной технологической схемы переработки.

2. Методика оценки процесса сепарации углеродистого золотосодержащего сырья на основе математического и численного моделирования позволяет учесть реологические особенности минеральной пульпы с целью повышения комплексности переработки минерального сырья.

**Связь темы диссертации с научно-техническими программами, отраслевыми планами министерств и т.д.**

Диссертация выполнена в соответствии с федеральной целевой программой «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России» на 2014-2020 гг., утвержденной Постановлением Правительства Российской Федерации № 426 от 21 мая 2013 г., № 14.574.21.0168 от 26.09.2017 г., уникальный идентификатор RFMEFI57417X0168.

**Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, содержащихся в диссертации,** основана на комплексе экспериментально-теоретического исследования, проведенного с использованием современных подходов и высокоточного оборудования.

**Апробация работы** проведена на следующих основных научно-практических мероприятиях с докладами:

1. XV Международный форум-конкурс студентов и молодых учёных «Актуальные проблемы недропользования», Санкт-Петербург, 13-17 мая 2019 года. Тема доклада: «Using simulation for substantiation of effective technological solutions for gold suspensions beneficiation»;

2. XVII Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов, Санкт-Петербург, 27-29 марта 2019 года. Тема доклада: «Применение методов численного моделирования для обоснования эффективных технологических решений в обогащении золотосодержащего сырья»;

3. Конференция молодых специалистов в области переработки минерального сырья в рамках XXIX Международного конгресса по обогащению полезных ископаемых (IMPC2018), Москва, 18 сентября 2018. Тема доклада: «Оценка эффективности флотационной сепарации методом интерпретации данных моделирования».

**Публикации по работе.** Основные результаты исследований опубликованы в 7 работах, в том числе 2 входят в перечень ведущих рецензируемых изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки; 3

опубликованы в изданиях, включенных в международные базы данных (Scopus); получено 2 свидетельства на программы для ЭВМ.

**Личный вклад автора в получении научных результатов** заключается в изучении отечественных и зарубежных источников по проблеме исследования; постановке целей и реализации соответствующих задач исследования; формулировке и обосновании защищаемых положений; разработке методики определения дополнительного критерия упорности золотосодержащих руд; проведении комплекса экспериментальных исследований; разработке методики оценки процесса сепарации минерального сырья с учётом реологических параметров пульпы; обработке экспериментальных данных, полученных с использованием лабораторного оборудования; реализации разработанных ранее математических моделей в виде программного обеспечения; экономическом обосновании разработанных методик.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав с выводами по каждой из них, заключения и библиографического списка. Содержит 141 страницу машинописного текста, 72 рисунка, 15 таблиц, список литературы из 118 наименований и 2 приложения на 2 страницах.

**Благодарности.** Автор глубоко признателен доктору технических наук, профессору Татьяне Николаевне Александровой и коллективу кафедры обогащения полезных ископаемых Горного университета за оказанную поддержку и научное консультирование на протяжении всей работы.

#### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** изложены проблематика и актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, основные защищаемые положения, а также научная и практическая значимость полученных результатов исследований.

**В первой главе** проведен анализ современной научно-технической, нормативной и методической литературы в области переработки упорных золотосодержащих руд и их классификации, методов численного моделирования и влияния реологических свойств минеральной суспензии на процессы обогащения.

**Во второй главе** представлена информация об объекте исследования, которым являются золотосодержащие руды месторождений Арктической зоны двух типов: содержащие свободное крупное золото и углеродистое вещество. Также описана методология проведения экспериментально-теоретического исследования.

**В третьей главе** описаны теоретические основы методов, математических моделей и подходов численного моделирования, которые были использованы при выполнении исследования.

**В четвертой главе** приведены данные о разработанной методике оценки процесса сепарации минеральной суспензии с учётом реологических свойств с применением методов математического и численного моделирования, в основе которых лежит трёхкомпонентная модель реологического поведения минеральной суспензии. В данной главе также описана технология обогащения руд, содержащих крупное золото, построенная на выделении дополнительного фактора упорности.

**В пятой главе** приводится экономическое обоснование разработанной методики и технологии обогащения с учётом мировой экономической обстановки.

**В заключении** даны обобщенные выводы по результатам диссертационного исследования.

Основные результаты исследований отражены в следующих защищаемых положениях:

**1. Разработанный критерий обогатимости на основе данных моделирования по разделению полиминеральных смесей позволяет выявить границы применимости гравитационных методов обогащения и определить дополнительный фактор упорности с учетом данных минералогического и вещественного состава руд для обоснования эффективной технологической схемы переработки.**

Объектом исследования являлись кварцево-сульфидные руды, в составе которых наблюдается наличие крупного золота. На рисунке 1 приведено изображение объекта исследования. Следует отметить, что крупное золото в данном типе руды представлено в

виде небольших округлых и овальных включений (рисунок 2).

На рисунке 3 представлен химический состав пробы. Также следует отметить содержание следующих компонентов:  $Al_2O_3$  – 17,24 мас. %;  $Fe_2O_3$  – 4,56 мас. %;  $CaO$  – 1,22 мас. %;  $CO_2$ , – около 2 мас. %; сера – 2,51 мас. %.

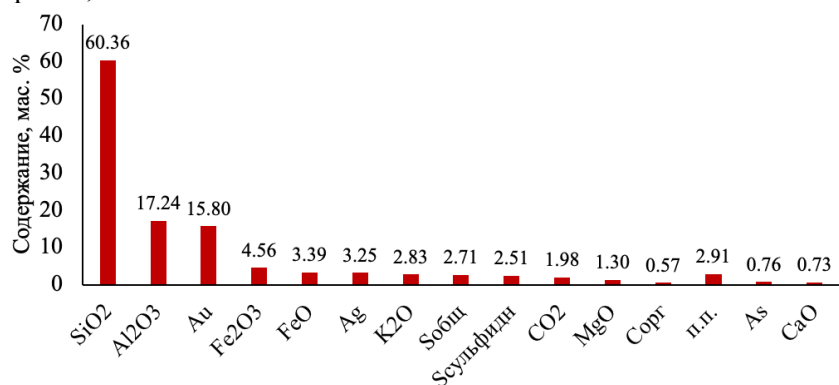


Рисунок 3 – Химический состав пробы

В большинстве своём основная форма нахождения золота – самородная, в то время как на твёрдый раствор в арсенопирите и пирите приходится меньшая часть. Это определяет необходимость применения методов гравитационного обогащения, предваряющих флотационные.

По результатам исследования влияния времени измельчения на распределение компонентов (таблица 1) можно отметить, что наибольшее количество золота содержится в классах крупности – 5+2 мм и –0,125+0,071 мм. Распределение золота по классам не равномерное, и содержится оно как в свободном виде, так и тонко вкраплено в минералы-концентраты. На рисунке 4 приведена графическая зависимость между крупностью классов и их выходом по минусу.

Для оценки обогатимости сырья гравитационными методами была разработана программа для ЭВМ (№2019612243 от 13.02.2019 г.), в основе которой лежит метод определения скорости падения минеральных ростков П.В. Лященко (уравнения (1)и(2)),

учитывающий стеснённый характер осаждения. Алгоритм работы программы приведён на рисунке 5.

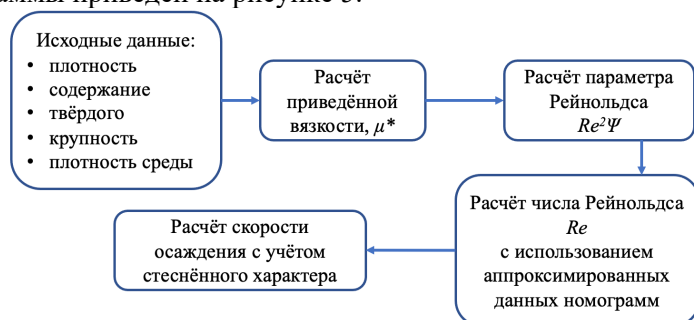


Рисунок 5 – Алгоритм расчёта скорости падения минеральных сrostков

$$Re_2\Psi = \frac{\pi \cdot d^3}{6} \cdot (\delta - \Delta) \cdot g \cdot \frac{\Delta}{\mu^*} \quad (1)$$

$$v_0 = \frac{Re \cdot \mu}{d \cdot \rho_{\text{ж}}} \quad (2)$$

где  $d$  – диаметр частицы, мм;  $\delta$  – плотность частицы кг/м<sup>3</sup>;  $\Delta$  – плотность среды, кг/м<sup>3</sup>,  $\mu$  – вязкость среды, н·с/м<sup>2</sup>,  $Re$  – число Рейнольдса.

С применением данной программы был проведён анализ скоростей падения минеральных сrostков, результатом которого являлись номограммы распределения скоростей осаждения, в зависимости от гранулометрического состава, содержания золота и содержания твёрдого в пульпе (рисунок 6).

В результате проведенного моделирования было установлено, что в режиме стеснённого осаждения концентрация твердого вещества вместе с разницей в плотности исследуемых минералов оказывают значительное влияние на характер распределения скоростей. Чем меньше разница в плотности, тем больше влияние вязкости на процесс разделения. Визуализация данных также позволила выявить три характерные зоны различий в скорости падения. Характерно, что эти зоны не зависят от минералов и имеют сходные формы. В результате можно ввести следующий критерий

(уравнение (3)) для градации применимости гравитационных методов обогащения:

$$K_G = \frac{\Delta v}{v_{100}^{\rho_{max}}} \quad (3)$$

где  $v_{100}^{\rho_{max}}$  – скорость падения наиболее плотного сrostка,  $\Delta v$  – разница скоростей падения конкретного и наиболее плотного сrostков.

На основе полученного критерия можно сделать вывод о возможной обогатимости минерального сырья гравитационными методами, классифицировав массив данных номограммы на три категории (рисунок 7): зона сепарации в тяжёлых суспензиях, осложнённая сепарация и зона лёгкой сепарации гравитационными методами.

Посредством GRG-теста по стандартизированной методике были выполнены исследования с целью определения уровня гравитационного извлечения золота и его распределения в продуктах измельчения. В таблице 2 представлены результаты данного теста. Согласно приведённым данным, наблюдается наличие свободного самородного золота, что является фактом, указывающим на применимость гравитационного метода обогащения.

Таблица 2 – Результаты GRG-теста

Наименование продуктов		$\gamma$ , %	$\beta$ , г/т	$\varepsilon$ , %
1 Этап	Концентрат	0,23	2099,56	47,32
	Хвосты	99,77	3,49	48,66
2 Этап	Концентрат	0,24	469,58	9,27
	Хвосты	99,53	3,98	38,77
3 Этап	Концентрат	0,19	139,65	2,11
	Хвосты	99,34	4,08	35,91
Сумм. концентрат		0,66	1033,01	58,57

Зависимость извлечения золота от крупности и стадии концентрации показана на рисунке 8, согласно которой можно сделать вывод о последовательном возрастании суммарного извлечения золота по мере снижения крупности питания, в



соответствии с регрессионными зависимостями, изображёнными на рисунке 9.

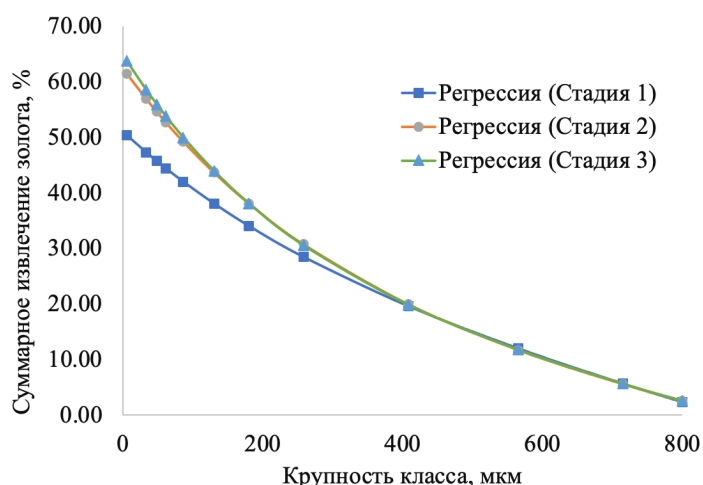


Рисунок 9 – Регрессионные зависимости извлечения от крупности класса

Регрессионные зависимости, изображённые на рисунке 10 имеют вид уравнения (4), а соответствующие коэффициенты приведены в таблице 3.

$$y = a + bc^x + rx \quad (4)$$

Таблица 3 – Коэффициенты регрессионных уравнений

Коэффициент	Стадия 1	Стадия 2	Стадия 3
a	27,789	19,308	24,747
b	23,193	43,063	39,988
c	-0,033	-0,024	-0,029
r	0,996	0,997	0,996
R <sup>2</sup>	0,998	0,997	0,998

Таким образом для руды, содержащей крупное золото, с применением установленного критерия обосновано применение гравитационного метода обогащения, целью которого является выделение сростков, крупность которых является дополнительным фактором, который необходимо учитывать.

Это позволило расширить имеющуюся классификацию золотосодержащих руд (рисунок 10), разбив технологический тип «А» на два подтипа: «А<sub>к</sub>» – руды, содержащие крупное золото; «А<sub>н</sub>» – руды без крупного золота.

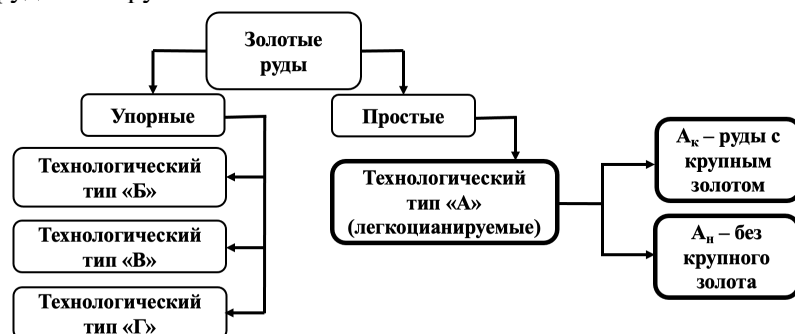


Рисунок 10 – Расширенная классификация золотосодержащих руд

Схема обогащения, соответствующая данному типу руды представлена на рисунке 11.

**2. Методика оценки процесса сепарации углеродистого золотосодержащего сырья на основе математического и численного моделирования позволяет учесть реологические особенности минеральной пульпы с целью повышения извлечения на стадии флотационного обогащения.**

Объектом исследования являлись углеродистые руды Майского месторождения, которые относятся к особо упорной золотосодержащей разновидности, основную ценность представляет золото, химический состав представлен в таблице 4.

Таблица 4 – Химический состав пробы

Компонент	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Проч.	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	C <sub>орг</sub>	CaO	MgO
<i>β</i> , %	65,2	12,7	8,05	5,63	3	2,27	1,72	1,43

Для определения оптимального метода обезуглероживания было проведено сравнение углеродистой флотации и дешламации на гидроциклоне, в соответствии со схемами, представленными на рисунке 12.

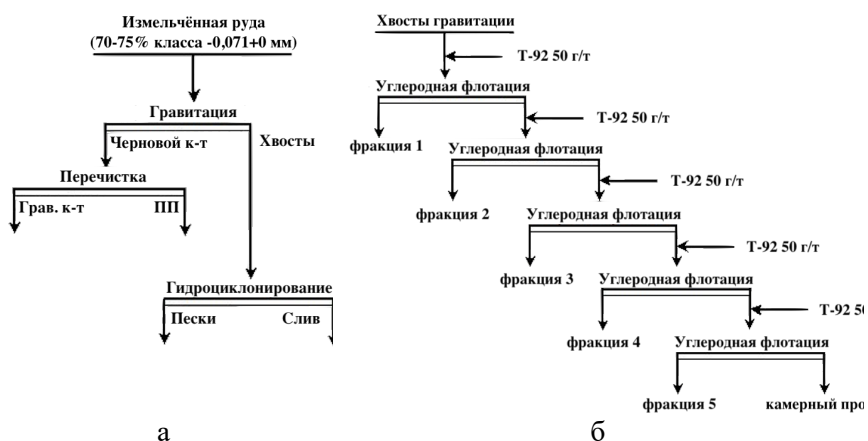


Рисунок 12 – Схемы проведения экспериментов по определению оптимального метода обезуглероживания:

а) дешламация на гидроциклоне; б) углеродистая флотация

Результаты экспериментов (рисунок 13 и таблица 4) показали преимущество применения дешламации в гидроциклоне в плане удаления углеродистого вещества.

Таблица 4 – Результаты исследования по обесшламливанию на гидроциклоне

Продукт	Выход	Содержание			Извлечение, %		
	д	Au, г/т	S <sub>Σ</sub> , масс. %	C <sub>орг</sub> , масс. %	Au	S <sub>Σ</sub>	C <sub>орг</sub>
	масс. %						
Грав. кон-т	0,68	605	28,9	0,66	59,5	5,7	0,4
Пром-т	4,5	41,8	21,4	1,13	23,6	26,9	3,7
Пески	73,5	1,54	1,4	1,10	14,2	52,0	29,3
Слив	21,32	0,54	1,0	2,60	1,9	10,1	59,0

Высокое содержание тонкого класса после стадии измельчения, оказывает значительное влияние на реологию минеральной суспензии, что необходимо учитывать при разработке технологий обогащения.

Соотношение между напряжением сдвига и скоростью сдвига отражается кривой течения, которая представлена трёхкомпонентной моделью на основе модели Бингама-Шведова (уравнение (5)).

$$\tau = A_1 e^{-\alpha_1 \dot{\gamma}} + A_2 e^{-\alpha_2 \dot{\gamma}} + \mu_T \dot{\gamma} \quad (5)$$

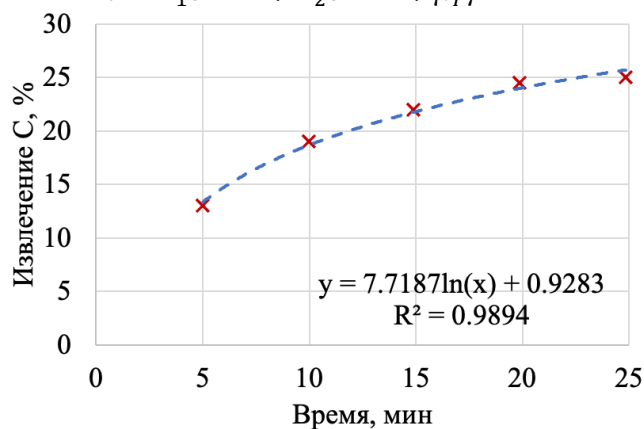


Рисунок 13 – Зависимость извлечения углерода от времени при углеродистой флотации

Расчёт коэффициентов реологического уравнения (5) осуществляется по алгоритму, представленному на рисунке 14, для реализации которого была разработана программа для ЭВМ. Исходными для вычислений являются данные, получаемые посредством вискозиметра – скорость сдвига и напряжение сдвига. Использование данной программы позволило получить реологические уравнения, теоретически отражающие динамику внутренних преобразований в пульпе при разных содержаниях твёрдого (400 г/л; 500 г/л; 700 г/л), которые были в дальнейшем использованы при моделировании процесса классификации в гидроциклоне (уравнения (6)–(8)):

$$\tau_{400} = 5,415e^{0,580\dot{\gamma}} - 4,415e^{0,931\dot{\gamma}} + 0,281\dot{\gamma} \quad (6)$$

$$\tau_{500} = 3,120e^{0,411\dot{\gamma}} - 2,190e^{0,881\dot{\gamma}} + 0,602\dot{\gamma} \quad (7)$$

$$\tau_{700} = 2,919e^{0,901\dot{\gamma}} - 1,989e^{0,765\dot{\gamma}} + 0,712\dot{\gamma} \quad (8)$$

Общее уравнение движения минеральной суспензии может быть получено из общеизвестного уравнения динамики жидкости с учётом реологии в виде трёхкомпонентного члена (9):

$$\rho \frac{d\bar{v}}{dt} = \rho \bar{F} - grad p + div \left( \sum_{k=1}^{n+1} \varphi_k e^{-t_k \gamma_{ij}} + \mu \gamma_{ij} \right) \quad (9)$$

Данное уравнение представляет собой модификацию уравнения Навье-Стокса, которая была использована при постановке многофазной задачи в программном обеспечении Ansys Fluent (рисунок 15). В основу численного моделирования также легли модель напряжений Рейнольдса для описания турбулентного потока внутри гидроциклона и модель Volume of Fluid, описывающая взаимодействие жидкой и газообразной фаз.

Результатом решения многофазной задачи классификации в гидроциклоне стало получение распределений скоростей потока, давления и скорости сдвига в профиле гидроциклона (рисунки 16-18).

На основе статистических данных, представленных в таблице 5 можно сделать вывод об оптимальном значении вязкости, при котором формируется необходимый скоростной профиль.

Таблица 5 – Статистические параметры распределений скоростей сдвига

Параметр	500 г/л	700 г/л	400 г/л
Среднее значение, с <sup>-1</sup>	380,557	419,911	523,791
Стандартное отклонение	173,211	158,942	134,699
Минимальное значение, с <sup>-1</sup>	97,994	165,287	339,266
Максимальное значение, с <sup>-1</sup>	757,120	796,984	885,536
Критическая скорость сдвига, с <sup>-1</sup>	602	712	281

При минимальном стандартном отклонении содержание твёрдого в питании 400 г/л обеспечивает достижение значения скорости сдвига в потоке большего, чем критическое (281 с<sup>-1</sup>), которое определяется трёхкомпонентным реологическим уравнением. При таких условиях обеспечивается максимальная диспергированность минеральной суспензии, а значит более точное разделение по классам крупности.

Таким образом было обосновано посредством экспериментально-теоретического исследования применение гидроциклона для операции обезуглероживания, применительно к рудам Майского, а также предложена принципиальная схема обогащения углеродистых золотосодержащих руд (рисунок 19).

Также предложена блочная схема обогащения золотосодержащих руд Арктической зоны (рисунок 20), включающая гравитационный блок или блок дешламации в зависимости от технологических показателей исходного сырья. Следует отметить, что обезуглероживание в гидроциклоне увеличивает коэффициент комплексности использования минерального сырья (уравнение (10)), если рассматривать углерод как ещё один ценный компонент.

$$\varphi = \frac{\sum \alpha_i \varepsilon_i P_i}{\sum \alpha_i P_i} \quad (10)$$

Увеличение комплексности использования сырья может быть найдено как отношение коэффициента комплексности после внедрения описанных решений ( $\varphi_2$ ) к коэффициенту комплексности до их внедрения ( $\varphi_1$ ) (11):

$$K = \varphi_2 / \varphi_1 \quad (11)$$

Расчёты по приведённым выше формулам показывают, что при условии извлечения ценных компонентов (золота – 89% и органического углерода – 59%) внедрение блока обесшламливания позволяет повысить коэффициент комплексности переработки сырья в 1,10 раза, то есть на 10%.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой предлагается решение актуальной научной задачи переработки руд Арктической зоны. В рамках данного исследования был проведён комплекс экспериментально-теоретических исследований в отношении золотосодержащих руд Арктической зоны. В частности, было рассмотрено два типа руд: руды, в составе которых наблюдается наличие природного органического углерода, а также руды, в составе которых обнаружено крупное золото.

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы и рекомендации:

1. На основе литературного обзора были определены технологические особенности руд Арктической зоны, благодаря чему стало возможным выделить две категории руд, который описаны выше.

2. Определён критерий обогатимости золотосодержащего сырья гравитационными методами, посредством разработанной программы для ЭВМ.

3. Разработана методика оценки процесса сепарации золотосодержащего сырья на основе математического и численного моделирования, а также данных экспериментальных исследований.

4. Уточнена классификация золотосодержащих руд типа «А» с определением дополнительного фактора – наличия крупного золота. Показано, что применение гравитационного блока обогащения для руд типа «Ак» позволяет выделить крупное золото, снижая его потери при дальнейшем флотационном обогащении.

5. Разработана и обоснована блочная технология обогащения золотосодержащих руд Арктической зоны двух типов, в зависимости от наличия факторов упорности. Данная технология подразумевает последовательную или параллельную схему переработки с извлечением крупного золота в гравитационном блоке и извлечение углеродистого вещества в блоке дешламации.

6. Рассмотренный в работе метод дешламации в гидроциклоне, роль которого заключается в извлечении углерода из минерального сырья, позволяет повысить коэффициент комплексности, если рассматривать углерод как полезный компонент, на 10%, по сравнению со стандартной схемой переработки.

7. В качестве перспектив дальнейшего исследования по теме диссертации можно отметить ещё более углубленное изучение влияния реологических свойств минеральной пульпы на процессы сепарации с учётом формы частиц, с применением комбинированных DEM-CFD расчётов. Также одним из вариантов развития исследования может быть переложение разработанной методики

оценки процесса сепарации на другие типы руд, а также применение данного подхода к оценке процесса флотационного обогащения.

## **СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Публикации в изданиях из Перечня ВАК:*

1. **Потемкин, В.А.** Моделирование реологических свойств минеральных суспензий с использованием методов вычислительной гидродинамики / **В.А. Потемкин, А.М. Элбэндари** // Маркшейдерия и недропользование. – 2018. – №. 1. – С. 58-61.

2. Александрова, Т.Н. Оценка эффективности флотационной сепарации методом интерпретации данных моделирования / Т.Н. Александрова, **В.А. Потемкин**, Д.Н. Семенихин, В.В. Кузнецов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – №12 (специальный выпуск 56). – М.: Издательство «Горная книга». С. 3-13.

*Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:*

3. **Potemkin, V.A.** Research of the rheological properties of pulps in the separation of mineral raw materials / **V.A. Potemkin, A.O. Romashev, T.N. Aleksandrova** // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018. Conference proceedings volume 18. Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining. – Issue: 1.4. – P. 131-138.

4. Aleksandrova, T.N. Justification of evaluation criteria of gold beneficiation ability by gravitational methods / T.N. Aleksandrova, **V.A. Potemkin**, A.O. Romashev // Journal of Applied Engineering Science. – 2020. – №18. P. 230-237.

*Патенты:*

5. Свидетельство и регистрации программы для ЭВМ №2019612243, Российская Федерация. Программа расчёта скорости осаждения частиц: №2018664698 : заявл. 18.12.2018 : опубл. 13.02.2019 / **Потемкин В.А.**, Александрова Т.Н. – 1 с. : ил.

6. Свидетельство и регистрации программы для ЭВМ №2020618724, Российская Федерация. Программа для расчёта эмпирических коэффициентов реологического уравнения: №2020617936 : заявл. 29.07.2020 : опубл. 04.08.2020 / **Потемкин В.А.**, Александрова Т.Н. – 1 с. : ил.



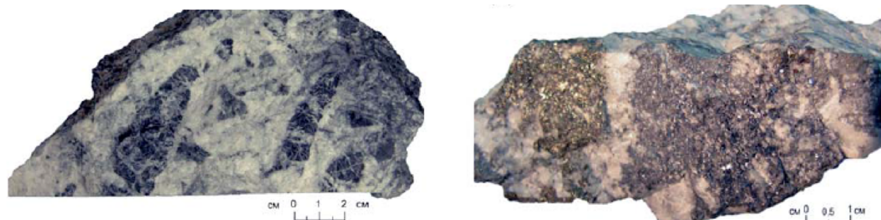
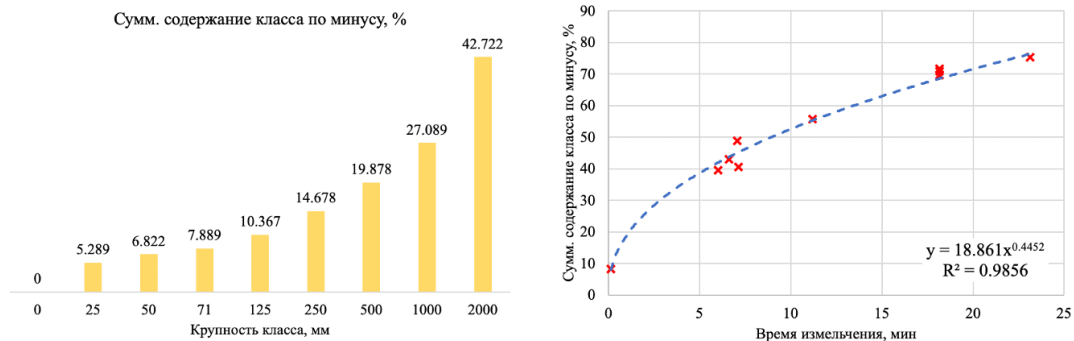


Рисунок 1 – Объект исследования – кварцево-сульфидные руды



а

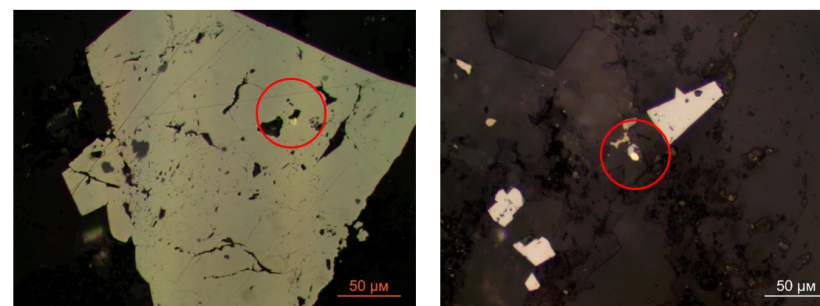
б

Рисунок 4 – Кинетика измельчения руды:

- а) суммарное содержание классов по минусу от крупности класса;  
б) суммарное содержание от времени измельчения

Таблица 1 – Содержание элементов по классам крупности

Крупн. класса	Содерж. класса	Содержание элементов						
		Au	S <sub>Σ</sub>	S <sub>сульфид</sub>	C <sub>Σ</sub>	C <sub>орг</sub>	Fe <sub>общ</sub>	As
мм	%	г/т	масс. %	масс. %	масс. %	масс. %	масс. %	масс. %
-5+2	57.67	11.5	2.04	2.02	1.67	1.08	2.89	0.77
-2+1	14.33	4.98	2.21	2.15	1.89	1.23	2.67	0.79
-1+0,5	6.99	5.41	2.33	2.31	1.78	1.22	3.11	0.87
-0,5+0,25	5.01	8.43	2.45	2.41	1.95	1.34	3.12	0.89
-0,25+0,125	5.24	9.41	3.31	3.36	2.03	1.35	4.16	1.45
-0,125+0,071	2.64	10.33	4.65	4.63	2.06	1.33	5.12	1.78
-0,071+0,045	1.87	13.98	6.77	5.24	2.05	1.41	4.45	1.66
-0,045+0,025	1.26	7.12	4.46	4.67	2.17	1.61	4.42	1.68
-0,025+0	4.99	3.21	2.02	1.67	3.01	2.56	3.78	1.14



а

б

Рисунок 2 – Места кристаллизации свободного золота:  
а) включения в пирите; б) свободное от сростаний золото

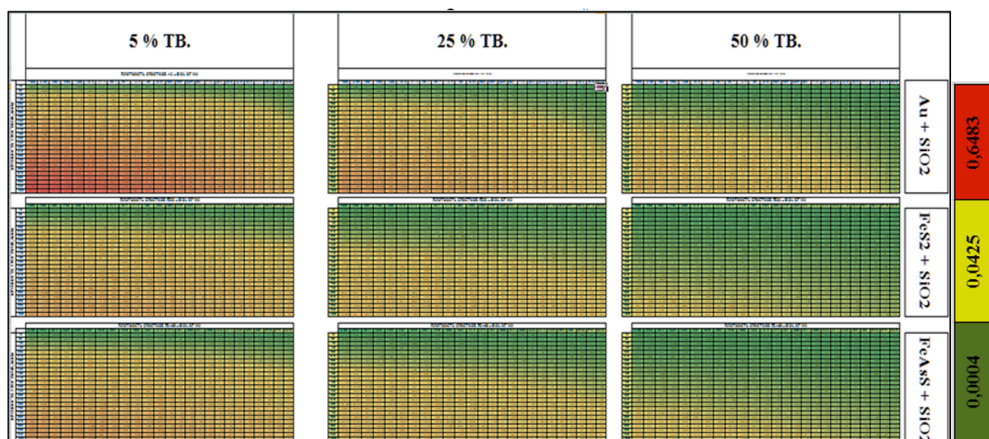


Рисунок 6 – Номограммы распределения скоростей осаждения минеральных сростков

**Коэффициент селективности**

$K_G$	100	92	83	75	67	58	50	42	33	25	17	8
40	0,993	0,903	0,816	0,731	0,648	0,565	0,483	0,402	0,321	0,240	0,160	0,080
80	2,680	2,439	2,204	1,975	1,749	1,525	1,304	1,084	0,866	0,649	0,432	0,216
120	4,791	4,360	3,941	3,531	3,126	2,727	2,331	1,939	1,548	1,160	0,772	0,386
160	7,236	6,585	5,952	5,332	4,721	4,118	3,521	2,928	2,338	1,751	1,167	0,583
200	9,963	9,067	8,195	7,341	6,500	5,670	4,847	4,031	3,219	2,411	1,606	0,803
240	12,937	11,774	10,642	9,533	8,441	7,363	6,294	5,234	4,180	3,131	2,086	1,042
280	16,135	14,684	13,273	11,890	10,528	9,183	7,850	6,528	5,214	3,905	2,601	1,300
320	19,538	17,781	16,072	14,397	12,748	11,119	9,506	7,905	6,313	4,729	3,150	1,574
360	23,130	21,050	19,027	17,044	15,092	13,164	11,254	9,358	7,474	5,599	3,729	1,864
400	26,900	24,481	22,127	19,822	17,552	15,309	13,088	10,883	8,692	6,511	4,337	2,167
440	30,837	28,063	25,366	22,723	20,120	17,549	15,003	12,476	9,964	7,464	4,971	2,484
480	34,932	31,790	28,734	25,740	22,792	19,880	16,995	14,133	11,288	8,455	5,632	2,814
520	39,177	35,653	32,226	28,868	25,562	22,296	19,061	15,851	12,620	9,483	6,316	3,156
560	43,567	39,648	35,837	32,103	28,426	24,794	21,197	17,627	14,078	10,545	7,024	3,510
600	48,094	43,768	39,561	35,439	31,380	27,371	23,399	19,458	15,541	11,641	7,754	3,875
640	52,754	48,007	43,395	38,873	34,421	30,023	25,667	21,344	17,047	12,769	8,505	4,250
680	57,542	52,367	47,323	42,401	37,545	32,748	27,996	23,281	18,594	13,928	9,277	4,636
720	62,454	56,836	51,373	46,020	40,750	35,543	30,386	25,268	20,181	15,116	10,069	5,032
760	67,485	61,415	55,512	49,727	44,032	38,406	32,834	27,304	21,806	16,334	10,880	5,437
800	72,632	66,099	59,746	53,520	47,391	41,335	35,338	29,386	23,470	17,580	11,710	5,852
840	77,892	70,886	64,073	57,396	50,823	44,329	37,897	31,514	25,169	18,853	12,558	6,275
880	83,261	75,773	68,489	61,353	54,326	47,385	40,510	33,687	26,904	20,153	13,423	6,708
920	88,738	80,756	72,994	65,388	57,899	50,501	43,174	35,902	28,674	21,478	14,306	7,149
960	94,318	85,835	77,584	69,500	61,540	53,677	45,889	38,160	30,477	22,829	15,206	7,599
1000	100,000	91,006	82,258	73,687	65,248	56,911	48,654	40,459	32,313	24,204	16,122	8,057

Зона 1: Осложненная separация,  $K_g = 0..10$

Зона 3: Эффективная separация,  $K_g = 48..100$

Зона 2: Вероятная separация,  $K_g = 10..48$

Рисунок 7 – Обработка данных математического моделирования

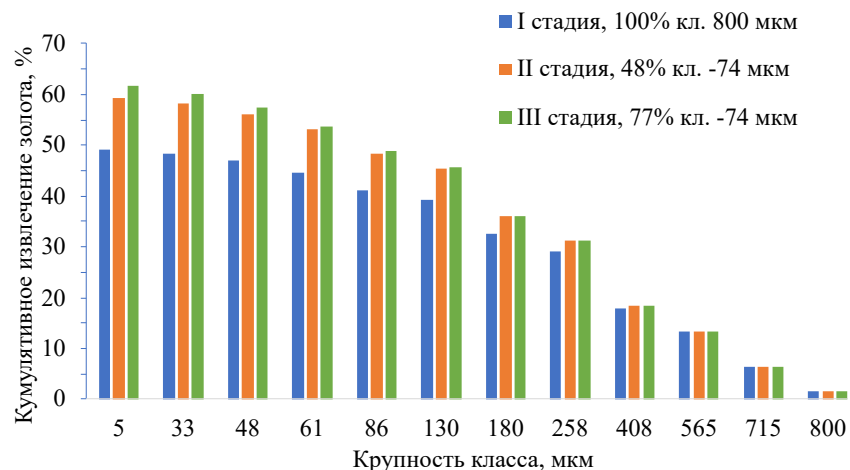


Рисунок 8 – Суммарное извлечение золота во время GRG-теста

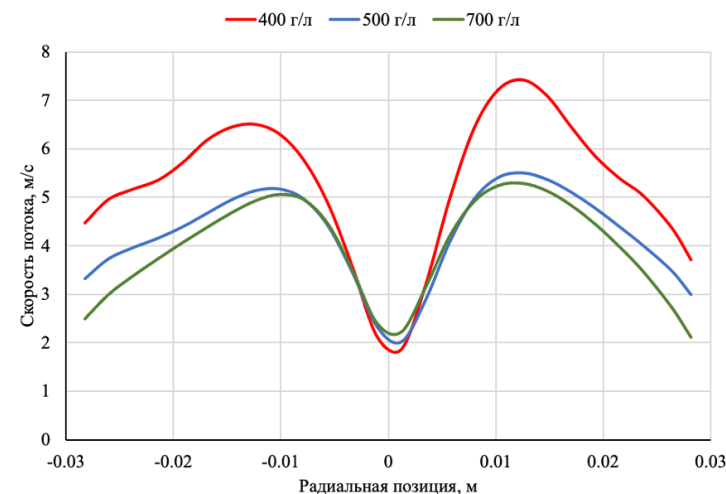


Рисунок 16 – Распределение скоростей в верхней части гидроциклона при различных значениях вязкости

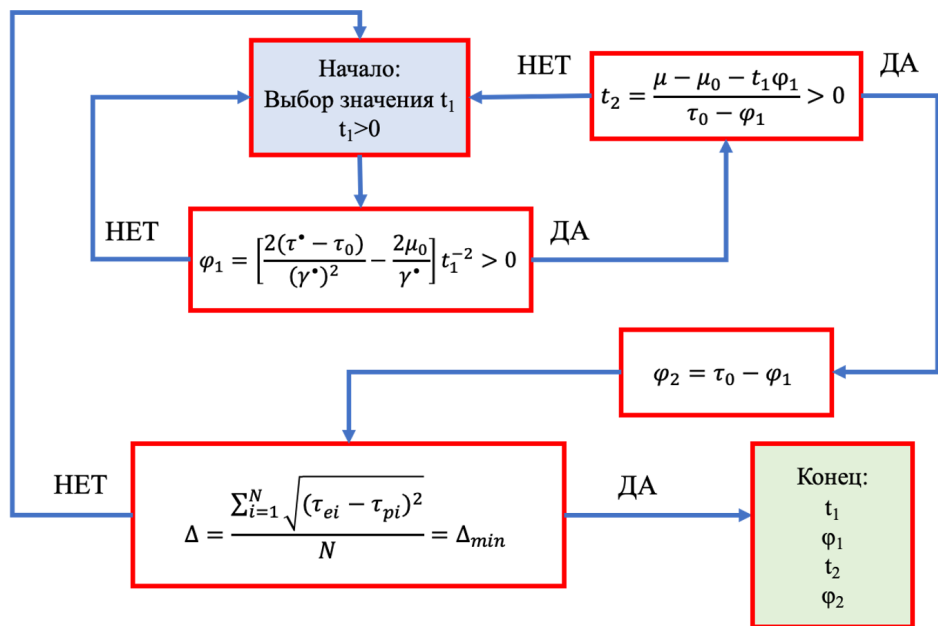
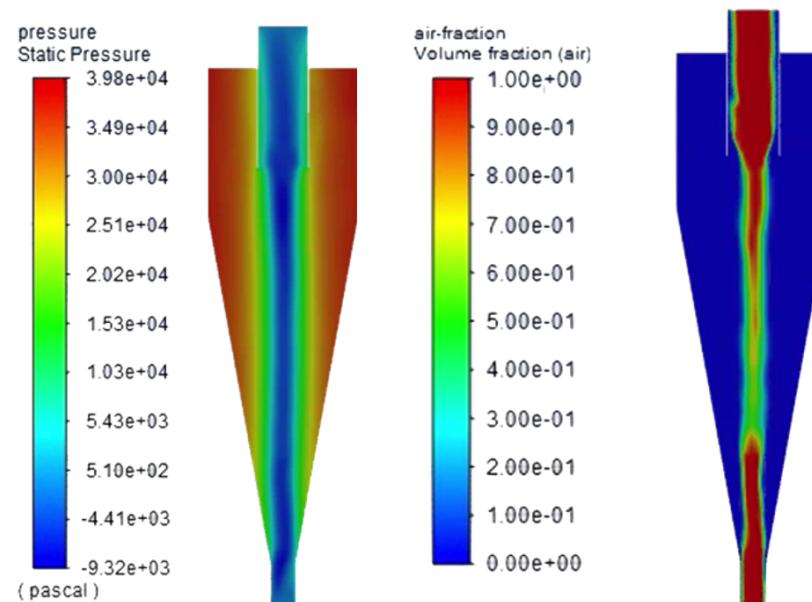


Рисунок 14 – Алгоритм расчёта коэффициентов реологического уравнения



а

б

Рисунок 15 – Расчёт многофазной задачи в Ansys Fluent:  
а) распределение давления; б) формирования воздушного столба

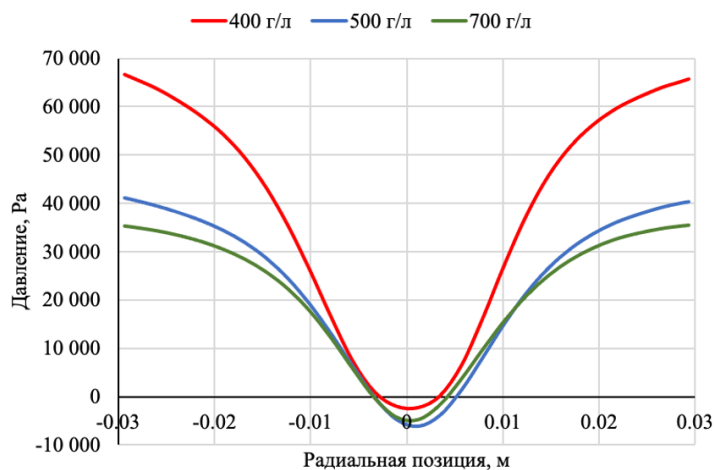


Рисунок 17 – Распределение давления в верхней части гидроциклона при различных значениях вязкости

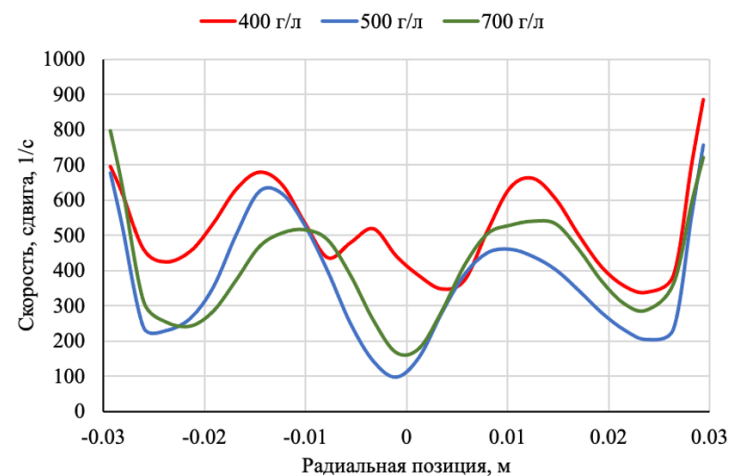


Рисунок 18 – Распределение скоростей сдвига

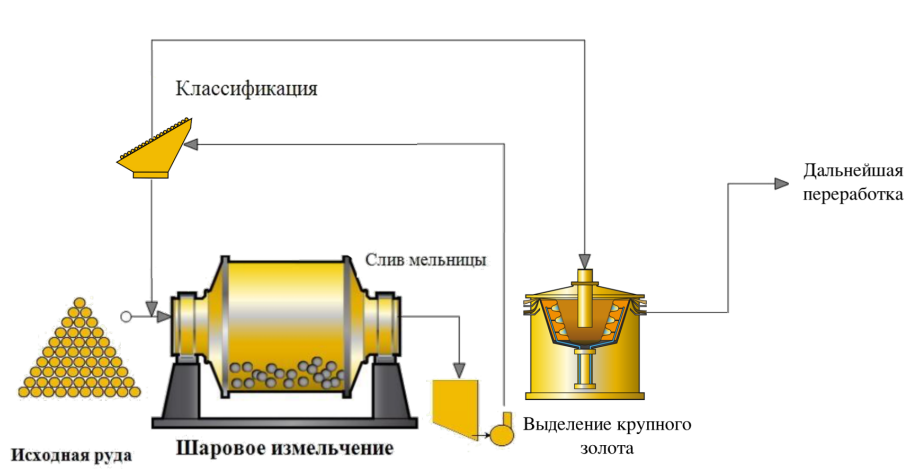


Рисунок 11 – Принципиальная схема обогащения золотосодержащего сырья с наличием крупного золота

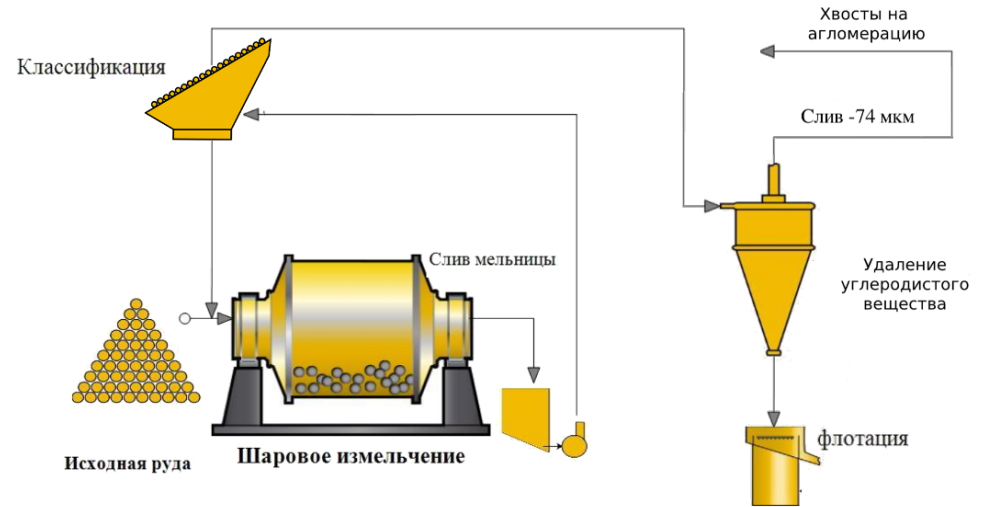


Рисунок 19 – Принципиальная схема обогащения углеродистых руд

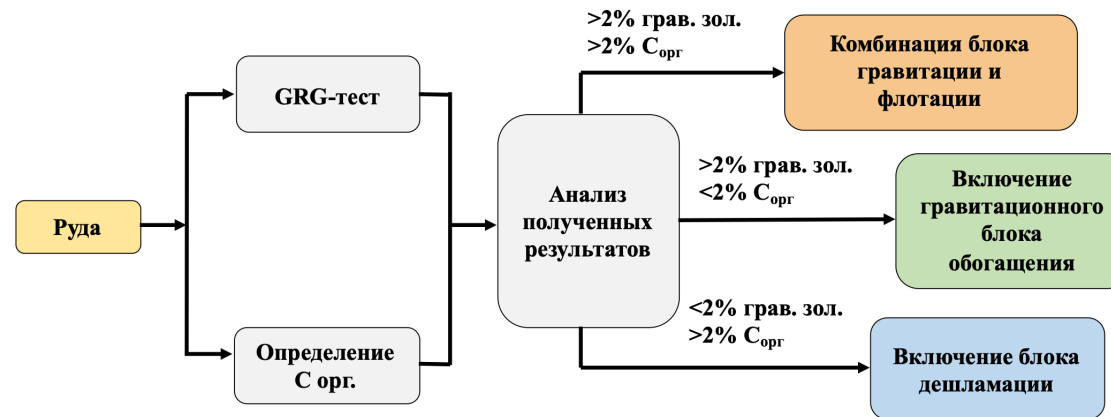


Рисунок 20 – Принципиальная схема обогащения золотосодержащих руд Арктической зоны