

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования «Санкт-Петербургский горный университет»

На правах рукописи

Зубкова Ольга Сергеевна



**КОМПЛЕКСНАЯ ПЕРЕРАБОТКА САПОНИТОВЫХ РУД
С ДОБАВКОЙ ЩЕЛОЧНОГО АЛЮМОСИЛИКАТНОГО СЫРЬЯ**

Специальность 05.17.01 – Технология неорганических веществ

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Алексеев А.И.

Санкт-Петербург – 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1 ОБЗОР НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ ПО ИЗУЧЕНИЮ САПОНИТА И МЕТОДИКАМ ЕГО ОСАЖДЕНИЯ.....	13
1.1 Общие сведения о предприятии ПАО «Севералмаз»	13
1.2 Расчет материального баланса переработки руды	15
1.3 Имитационное моделирование условий накопления осадков и роста дамбы с использованием программного обеспечения MODDE Pro	17
1.4 Анализ научно-технической литературы	22
1.5 Существующие способы сгущения сапониновой суспензии коагулянтами и флокулянтами	26
1.5.1 Сгущение сапониновой суспензии солями сернокислого алюминия и железа	26
1.5.2 Сгущение сапониновой суспензии полиакриламидными флокулянтами.....	28
1.6 Выводы по главе 1.....	29
ГЛАВА 2 ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	31
2.1 Объекты экспериментальных исследований.....	31
2.2 Моделирование процесса осаждения сапониновой пульпы в цилиндрах.....	31
2.3 Установка осаждения сапониновой пульпы.....	32
2.4 Исследования химического и минерального состава образцов рентгеноструктурной, рентгенофлуоресцентной спектроскопией	33
2.5 Гранулометрический анализ.....	34
2.6 Термогравиметрический анализ	34
2.7 Анализ оборотной воды, пульпы хвостохранилища и природной воды до и после обработки коагулянтами.....	34
2.8 Выводы по главе 2.....	37
ГЛАВА 3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ МИНЕРАЛА САПОНИТА ПО УЧАСТКАМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ЦИКЛА ОБОГАЩЕНИЯ АЛМАЗОНОСТНОЙ РУДЫ	38
3.1 Кристаллохимическое описание строения глинистого минерала сапонита	38
3.2 Сапониновая руда кимберлитовых трубок Архангельская и им. Карпинского-1	40
3.2.1 Рентгеноструктурный и рентгенофлуоресцентный анализ.....	40
3.2.2 Термогравиметрический анализ сапониновых алмазоносных руд	47
3.3 Исследования сапониновой руды после слива с классификаторов спиральных наклонных	50

3.3.1 Минеральный и химический состав пульпы после классификаторов.....	50
3.3.2 Гранулометрический анализ пульпы после слива с классификаторов спиральных наклонных.....	52
3.4 Исследования взвесей в оборотной воде, поступающей на обогащение руды	52
3.4.1 Химический состав взвесей оборотной воды	52
3.4.2 Гранулометрический анализ взвесей оборотной воды.....	54
3.5 Исследования пульпы по глубине чаши хвостохранилища	55
3.5.1 Химический состав сапонитовой пульпы.....	55
3.5.2 Гранулометрический состав и плотность сапонитовой пульпы	55
3.6 Дренажная (карьерная) вода Ломоносовского ГОКа.....	56
3.6.1 Химический состав взвесей дренажной (карьерной) воды	57
3.6.2 Гранулометрический анализ взвесей карьерной воды.....	59
3.7 Выводы по главе 3.....	59
ГЛАВА 4 ПЕРЕРАБОТКА ЩЕЛОЧНОГО АЛЮМОСИЛИКАТНОГО СЫРЬЯ С ПОЛУЧЕНИЕМ РЕАГЕНТА ДЛЯ ПРОЦЕССА СГУЩЕНИЯ САПОНИТОВОЙ ПУЛЬПЫ.....	61
4.1 Расчёт скорости осаждения взвешенных частиц сапонита в сливе после классификаторов без использования реагентов.....	61
4.2 Теоретические основы синтеза кальцийалюмосиликатного реагента из щелочного алюмосиликатного сырья	62
4.2.1 Общая характеристика сырья.....	62
4.2.2 Химический состав кальцийсодержащего сырья для синтеза реагента	63
4.2.3 Химический состав глиносодержащего сырья для синтеза реагента	64
4.2.4 Химический состав уплотнителя сапонитового осадка	64
4.3 Синтез неорганического минерального реагента	66
4.3.1 Механизм действия кальцийалюмосиликатного реагента.....	70
4.4 Осаждение взвесей оборотной воды. Определение минимальной дозировки кальцийалюмосиликатного реагента.....	72
4.5 Осаждение взвесей оборотной воды. Определение максимальной дозировки кальцийалюмосиликатного реагента.....	74
4.6 Выбор уплотнителя для устойчивости осадка после осветления оборотной воды кальцийалюмосиликатным реагентом	77
4.7 Определение оптимальной концентрации взвесей в пульпе для осаждения кальцийалюмосиликатным реагентом и уплотнения осадка	78

4.8 Определение оптимальных дозировок реагентов для осаждения взвешенных веществ карьерного водоотлива	80
4.8.1 Осаждение сапонитовых взвесей карьерного водоотлива солями алюминия.....	80
4.8.2 Осаждение сапонитовых взвесей карьерного водоотлива флокулянтom	83
4.8.3 Осаждение сапонитовых взвесей карьерного водоотлива кальцийалюмосиликатным реагентом	84
4.9 Научно-технологические исследования, проведённые на Ломоносовском ГОКе ПАО «Севералмаз»	86
4.9.1 Осаждение взвешенных веществ карьерного (дренажного) водоотлива Ломоносовского ГОКа с использованием реагентов	86
4.9.2 Осаждение взвешенных веществ оборотной воды Ломоносовского ГОКа с использованием разного типа реагентов	89
4.10 Осаждение сапонитовой взвеси с применением кальцийалюмосиликатного реагента и уплотнителя на лабораторном стенде	93
4.11 Осаждение глинистых веществ другого химического состава кальцийалюмосиликатным реагентом.....	96
4.12 Исследование сгущённого продукта после осаждения кальцийалюмосиликатным реагентом и уплотнителем.....	97
4.13 Выводы по главе 4.....	98
ГЛАВА 5 ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ САПОНИТОВЫХ РУД С ДОБАВКОЙ ЩЕЛОЧНОГО АЛЮМОСИЛИКАТНОГО СЫРЬЯ.....	100
5.1 Новые технологические решения для ПАО «Севералмаз»	100
5.2 Водный баланс с учётом разбавления	101
5.3 Принципиальная технологическая схема и технические параметры использования кальцийалюмосиликатного реагента и уплотнителя для осветления оборотной воды .	103
5.4 Технико-экономический анализ эффективности разработки.....	107
5.5 Выводы по главе 5.....	112
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	113
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	115
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	116
ПРИЛОЖЕНИЕ А	126
Акт отбора автолитовой брекчии с месторождения им. Ломоносова, г. Архангельска	126
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	127

Акт отбора автолитовой брекчии с месторождения им. Ломоносова, г. Архангельска	127
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	128
Гистограмма гранулометрии слива с классификаторов спиральных наклонных.....	128
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	129
Акт отбора образцов (проб) карьерной воды Ломоносовского ГОКа, г. Архангельск	129
ПРИЛОЖЕНИЕ Д	130
Акт о промышленном опробовании результатов кандидатской диссертационной.....	130
работы	130
ПРИЛОЖЕНИЕ Е.....	131
Акт о внедрении в учебный процесс	131

ВВЕДЕНИЕ

Любое вмешательство в природу не проходит бесследно, человечество за годы своего существования на планете Земля успело неоднократно убедиться в этом. С развитием горнодобывающей промышленности человек в погоне за прибылью всё чаще проявляет недобросовестное отношение к природе.

Открытый способ добычи полезных ископаемых вызывает наиболее сильные разрушения поверхности земли, под разработку месторождений отводят большие территории, которые в большинстве случаев после окончания работ оказываются исключенными из местных экологических систем. Главным процессом горнодобывающего предприятия является обогащение полезного ископаемого, в котором задействована вода. Вода, участвующая в процессе обогащения, чаще всего поступает на хвостохранилища в виде пульпы, затем после отстаивания заново поступает на предприятие.

В зависимости от климатических условий в прудке хвостохранилища фиксируется либо минимальный объем воды, либо и вовсе дефицит, что вызовет повышенное содержание взвешенных веществ, которые, поступив в процесс обогащения, не только затруднят эту процедуру, но и приведут к потере концентрата.

Иллюстрацией может служить ситуация с водой после обогащения алмазной руды ПАО «Севералмаз», где из-за увеличения производственных мощностей возрастает потребление оборотной воды, которая не успевает отстояться в хвостохранилище.

Недостаток архангельской алмазоносной провинции заключается в том, что в минеральном составе преобладает глинистый минерал сапонит ($\approx 70\%$ объема), который обладает исключительно высокой устойчивостью в водной среде из-за высокой дисперсности и развитого диффузного слоя ионов, находящихся в межпакетном пространстве. По данным ПАО «Севералмаз», получение слива оборотной воды требуемого качества (500 мг/л или 0,5 г/л) не представляет сложности, однако получение сгущенного продукта с плотностью 70% по массе на сгустителях невозможно.

Также стоит учитывать месторасположение месторождений, которые находятся в сложных гидрогеологических условиях; система водопонижения и водоотлива откачивает каждый день по 6,5 м³/ч воды из карьера с повышенным содержанием тонкодисперсных частиц сапонита менее 5–7 мкм, который сильно набухает в воде и в виде устойчивой взвеси месяцами лежит на поверхности водоема. Планировалось, что карьерная вода, которая поступает на торфяную дамбу, будет естественным путём фильтроваться за счёт заболоченной местности, но, как оказалось, дамба, которая была сделана из насыпных грунтов, не справляется с поставленной задачей.

Кроме того, для возможности добычи алмазов было сделано искусственное русло реки Золотицы, которая протекает по карьере трубки «Архангельская» и «Карпинского-1», река является нерестовой и впадает в Белое море, и обезопасить её от нарушений природоохранного законодательства, обеспечив соблюдение СанПиН 2.1.5.980-00, является в некоторых случаях приоритетной задачей.

Таким образом, возникает необходимость в изучении минерала сапонита и его поведения в воде на всех стадиях технологического процесса обогащения алмазов, получения и применения нового вида неорганического коагулянта с учётом минерального состава взвесей, находящихся в свободно-взвешенном состоянии, разработке эффективной интенсификации процесса осаждения и создании замкнутой водной системы с участием всех видов технологических и природных вод на месторождении им. Ломоносова ПАО «Севералмаз».

Актуальность работы

Повышенное содержание минералов монтмориллонитовой группы, преимущественно глинистого минерала сапонита, является особенностью месторождений ПАО «Севералмаз», отличающей его от месторождений алмазов Якутии. Частицы имеют крупность 0,4 – 7 мкм и образуют тонкодисперсную гелеобразную суспензию. При взаимодействии с водной средой минералы монтмориллонитовой группы обладают низкой скоростью осаждения, в свою очередь, это ведёт к большим сложностям в обеспечении замкнутого водооборота на обогатительной фабрике ОФ № 1 Ломоносовского горно-обогатительного комбината (ГОКа).

Недостатками сгущения сапонитсодержащей пульпы с использованием сгустителей высокого сжатия являются: значительные финансовые затраты на оборудование и обслуживание сгустителей, расход реагентов, электроэнергии и ряд других. Использование отечественных и зарубежных коагулянтов и флокулянтов для осаждения взвесей из-за их высокой ионообменной способности пока не дало эффективного результата по сгущению и очистке воды от взвешенных глинистых веществ, причем выявлены факты повторной стабилизации суспензии после добавления коагулянтов.

В связи с вышеизложенным, разработка технологии комплексной переработки сапонитового шлама исходя из минерального и химического состава отхода и взвесей, которые находятся в свободном неосаждённом состоянии в природной воде, участвующей в процессе обогащения, является **актуальной**. За счёт ввода новых технологических добавок, которые в своём составе исходного соединения имеют одновременно и неорганический минеральный осадитель, и уплотнитель. Данный минеральный осадитель позволит не только осадить взвешенные глинистые минералы в воде (преимущественно сапонит) и уплотнить сгущённый продукт, но и получить новые технические продукты с заданными физико-химическими и минеральными свойствами, товары,

востребованные на рынке РФ и за рубежом. Данные по осаждению, минеральному и фракционному составу глинистого минерала сапонита на протяжении всего технологического цикла весьма малочисленны, а утилизация твёрдой фазы шлама на территории РФ пока не нашла применения.

Осуществление процесса коагулирования воды как с введением добавок – неорганических минеральных осадителей и уплотнителя, так и без них зависят, в первую очередь, от состава и качества обрабатываемой воды и условий её обработки. Решение проблемы осаждения сапонитовых частиц в оборотной воде и пульпе хвостохранилища требует проведения специальных комплексных исследований особенностей технологического процесса указанного метода, в частности, при обработке сапонитовой руды, чем и обусловлена актуальность настоящей работы.

Степень разработанности темы исследования. Изучением свойств сапонита и химического влияния на глинистый минерал сапонит занимались А.М. Айзенштадт и А.С. Тутыгин. Влияние природы электролита на процесс коагуляции сапонита, а также его обработки соляной кислотой на кислотно-основные и сорбционные свойства исследовал Ю.А. Дмитренко. Д. В. Шпилевой принадлежат основные работы, связанные с геологическим строением рудного тела трубок Архангельской и Пионерской, а также выявление их сапонитизации. А.Л. Невзоров исследовал свойства хвостовых отложений при обогащении кимберлитовых руд, а Ф.С. Карпенко – условия накопления сапонитсодержащих осадков и технологию их сгущения в хвостохранилище месторождения алмазов им. М. В. Ломоносова. В трудах М.А. Пашкевич изложены способы обработки илового осадка и наращивания хвостохранилищ, направленные на снижение экологической нагрузки на регион добычи. Изучением переработки алюмосиликатного сырья, ионного обмена в глинистой суспензии, комплексной переработки апатит-нефелиновых руд на основе создания замкнутых технологических схем занимался А.И. Алексеев; модернизация технологии комплексной переработки кольских нефелиновых концентратов на Пикалевском глиноземном комбинате рассмотрена в работах В.М. Сизякова.

Цель исследования

Цель исследования – синтез минерального неорганического осадителя на основе щелочного алюмосиликатного сырья и подбор уплотнителя, который включит в себя свойства флокулянта и коагулянта с дальнейшим его применением в созданной замкнутой системе водооборота с конкретными технологическими условиями предприятия ПАО «Севералмаз».

Задачи исследования:

1. Проанализировать литературные данные по коагуляционной и флокуляционной обработке сапонитсодержащей воды и способов утилизации хвостов процесса обогащения.
2. Оценить минеральные и кристаллохимические характеристики минерала сапонита

на протяжении всего технологического процесса.

3. Исходя из минерального и гранулометрического состава минерала синтезировать неорганические соединения, которые включают в себя свойства флокулянта и коагулянта.

4. Выбрать аналоги добавок-осадителей отечественного производства, провести экспериментальные исследования по определению эффективности коагуляционной очистки сапонитсодержащих вод с добавлением разных видов добавок-осадителей.

5. Используя новые виды синтезированного коагулянта для осаждения сапонитового шлама, исследовать ионный состав водной фазы до и после применения.

6. Выявить технологические параметры и области применения различных видов добавок-осадителей, определить оптимальные дозы и фракционный состав, порядок их ввода в обрабатываемую воду; определить условия перемешивания при проведении процесса коагуляции сапонит содержащих вод с добавлением разных осадителей.

7. Разработать технологию комплексной переработки сапонитового шлама исходя из минерального и химического состава отхода $(\text{Ca}_{0,5}\text{Na})_{0,3}(\text{Mg},\text{Fe})_3(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, отвечающего многокомпонентной системе $(\text{Ca},\text{Mg})\text{O} - (\text{Na},\text{K})_2\text{O} - (\text{Fe},\text{Al})_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{F} - \text{P}_2\text{O}_5 - \text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O}$.

8. Провести производственные испытания по очистке сапонитсодержащих вод с применением неорганических минеральных осадителей.

9. Обобщить и проанализировать экспериментальные данные, получить расчетные зависимости для определения эффективности очистки сапонитсодержащих вод при проведении процесса коагуляции с применением неорганического минерального осадителя.

10. Разработать технический регламент для процесса осаждения с применением осадителей и уплотнителей данного вида, выбрать технологические схемы обработки сапонитсодержащих и природных вод и определить области их применения.

11. Разработать технологическую добавку, которая при смешивании с сапонитовой пульпой позволит получить новый технический продукт с заданными физико-химическими и минеральными свойствами, востребованный на рынке РФ и за рубежом.

Научная новизна и значимость проведённых исследований заключается в следующем:

1. Разработаны научные основы методического определения минерального состава сапонитовой руды кимберлитовых алмазоносных трубок Архангельская и им. Карпинского-1 с использованием рентгеновского дифрактометра XRD-7000, баз кристаллографических данных rruff.info, диагностических констант минералов В.Г. Фёкличева, рентгенометрического определителя минералов В.И. Михеева.

2. Определен минеральный состав сапонитовой руды кимберлитовых алмазоносных

трубок Архангельская и им. Карпинского-1, который позволил рассчитать количественное содержание различных минералов в руде влияющих на процесс размола.

3. На основании выполненных исследований определены причины невозможности разделения суспензии сапонит-вода без применения кальцийалюмосиликатного реагента.

4. На основании изученного минерального состава на всём протяжении технологического цикла установлены оптимальные физико-химические показатели получения и проведения синтеза кальцийалюмосиликатного реагента осадителя для обработки сапонитсодержащих вод, при котором обеспечивается лучшее качество осветлённой воды (снижение концентрации содержания взвешенных веществ).

5. Определены условия получения кальцийалюмосиликатного коагулянт из кальцийсодержащего материала (известняка), с учётом минерального состава шламсодержащей сапонитовой пульпы путём смешивания его с кремнеземсодержащим минералом, в качестве которого используется каолинит, и дальнейшей термообработке при 1285–1300°C в течение 1ч.

6. С учётом климатических особенностей (температурного режима) Архангельского региона разработана технологическая схема сгущения сапонитсодержащего шлама.

Положения, выносимые на защиту:

1. Определение физико-структурных особенностей состава пульпы хвостохранилища и расчёты реальной скорости осаждения частиц сапонита в чаше хвостохранилища позволили предложить способ сгущения сапонитовой пульпы минеральными осадителями.

2. Применение кальцийалюмосиликатного реагента в качестве коагулянта для осаждения разбавленной сапонитовой пульпы от микровзвесей (мутность) и уплотнителя позволяют достигнуть высокую степень очистки на 95 % и уплотнение осадка до 1,057 г/см³.

3. На основании выявленной закономерности гранулометрического и минерального состава руд определён диапазон оптимальных условий осаждения и сгущения взвешенных веществ в сапонитсодержащей оборотной воде.

Объектом исследования является алмазонасная руда кимберлитовых трубок Архангельская и Карпинского-1, шламсодержащая вода после процесса обогащения алмазонасной сапонитовой руды обогатительной фабрики Ломоносовского ГОКа, ПАО «Севералмаз», г. Архангельск, пульпа хвостохранилища.

Предметом исследования выступает способ интенсификации процесса коагуляции сапонитсодержащих вод путем её разбавления очищенной карьерной водой и введение в обрабатываемую воду осадителя и уплотнителя отечественного производства.

Методология и методы диссертационного исследования

Для осуществления поставленной цели использовалась современная лабораторная база кафедры химических технологий и переработки энергоносителей Санкт-Петербургского горного университета и современные стандартизированные отечественные и международные методики определения взвешенных веществ в воде. Для исследований руды трубок Архангельская и им. Карпинского-1 и пульпы хвостохранилища использованы различные современные физико-химические методы: DTA-TGA, XRD-дифрактометрия, рентгенофазовый анализ, электронная микроскопия, гранулометрия.

Степень достоверности. Достоверность полученных результатов диссертационной работы основывается на применении стандартизированных и современных физико-химических методов исследования и поверенных приборов, воспроизводимости и сходимости экспериментальных данных.

Теоретическая и практическая значимость и реализация результатов исследования состоит в следующем: изучен минеральный состав необработанной сапонитсодержащей руды кимберлитовых алмазонасных трубок. Исследован гранулометрический, химический и минеральный состав пульпы поступающий на хвостохранилище, на основе этих данных синтезирован минеральный кальцийалюмосиликатный реагент и подобран уплотнитель (белитовый шлам). Предложена технологическая схема осаждения сапонитовой пульпы с использованием разработанного реагента для получения очищенной от взвесей оборотной воды для обогатительной фабрики. Разработана схема безотходного производства с получением товарного продукта из сгущённого сапонитсодержащего осадка.

Новизна работы подтверждена тремя патентами: №2669272 РФ «Способ сгущения сапонитовой суспензии»; № 2675871 РФ «Способ осаждения сапонитовой пульпы с применением кальцийалюмосиликатного реагента»; № 2683082 РФ «Способ получения кальцийалюмосиликатного неорганического коагулянта».

Личный вклад автора состоял в анализе литературных источников, составлении методики и проведении экспериментальных исследований и проведение лабораторно-промышленных опытов по осаждению сапонитсодержащей воды, обобщении полученных экспериментальных результатов, анализе и обсуждении их с научным руководителем, составлении и оформлении публикаций и апробации основных положений работы.

Апробация работы

Основные положения диссертационных исследований докладывались на III заседании круглого стола «Высокие технологии: потенциал и перспективы», 14.11.2017 г, СПбГЭУ. г. СПб.;

на Web of Conferences: IInd International Innovative Mining Symposium (Devoted to Russian Federation Year of Environment). Kemerovo, RF, November 20-22, 2017 г; на международной научно-практической конференции «Научно-технический потенциал как основа социально-экономического развития», 28.02.2018 г, г. Москва; на международном научно-практическом форуме молодых ученых на базе Фрайбергской Горной академии. Германия, Фрайберг, 6-7. 06. 2018 г; на XXIX международной научной конференции «Техноконгресс», г. Кемерово, 23.07.2018 г; на 62-ой международной конференции на базе Горно-геологического университета им. И. Рылъски. София. Болгария, 18.10.2019 г; на XXVII международной научном симпозиуме «Неделя горняка 2020» НИТУ МИСиС, г. Москва 29.01.2020 г.

Публикации

Результаты исследований, описанные в диссертационной работе, опубликованы в 17 печатных работах, в том числе в 3 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК) (из них в 1 статья – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus) и, в 2 статьях - в изданиях, входящие в международные базы данных и системы цитирования Scopus; получено 3 патента; 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Благодарности. Автор глубоко признателен научному руководителю доктору технических наук, профессору кафедры ХТПЭ А.И. Алексееву, начальнику отдела научно-методического обеспечения исследований доктору химических наук, профессору В.Г. Поварову, А.С. Полянскому, Т.В. Лаврищевой, А.С. Волковой за продолжительную совместную работу и научно-исследовательскую деятельность. Автор выражает благодарность коллективу компании ПАО «Севералмаз» и Ломоносовского ГОКа за содействие в выполнении диссертационной работы.

Структура и объём работы.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, биографического списка и 6 приложений. Работа изложена на 131 листе машинописного текста, содержит 38 таблиц и 56 рисунков. Библиография включает 111 наименований.

ГЛАВА 1 ОБЗОР НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ ПО ИЗУЧЕНИЮ САПОНИТА И МЕТОДИКАМ ЕГО ОСАЖДЕНИЯ

1.1 Общие сведения о предприятии ПАО «Севералмаз»

На территории Приморского района Архангельской области в относительной близости от Белого моря в 100 км к северу от Архангельска располагается месторождение алмазов, названное в честь М. В. Ломоносова [21,46,96,98].

Ломоносовский ГОК представлен шестью сближенными кимберлитовыми трубками: Архангельская, им Карпинского-1, им. Карпинского-2, Пионерская, Поморская, им. Ломоносова, растянувшимися цепочкой на 9,5 км, но добыча ведётся только на двух трубках Архангельская и им. Карпинского-1(рисунок 1.1).

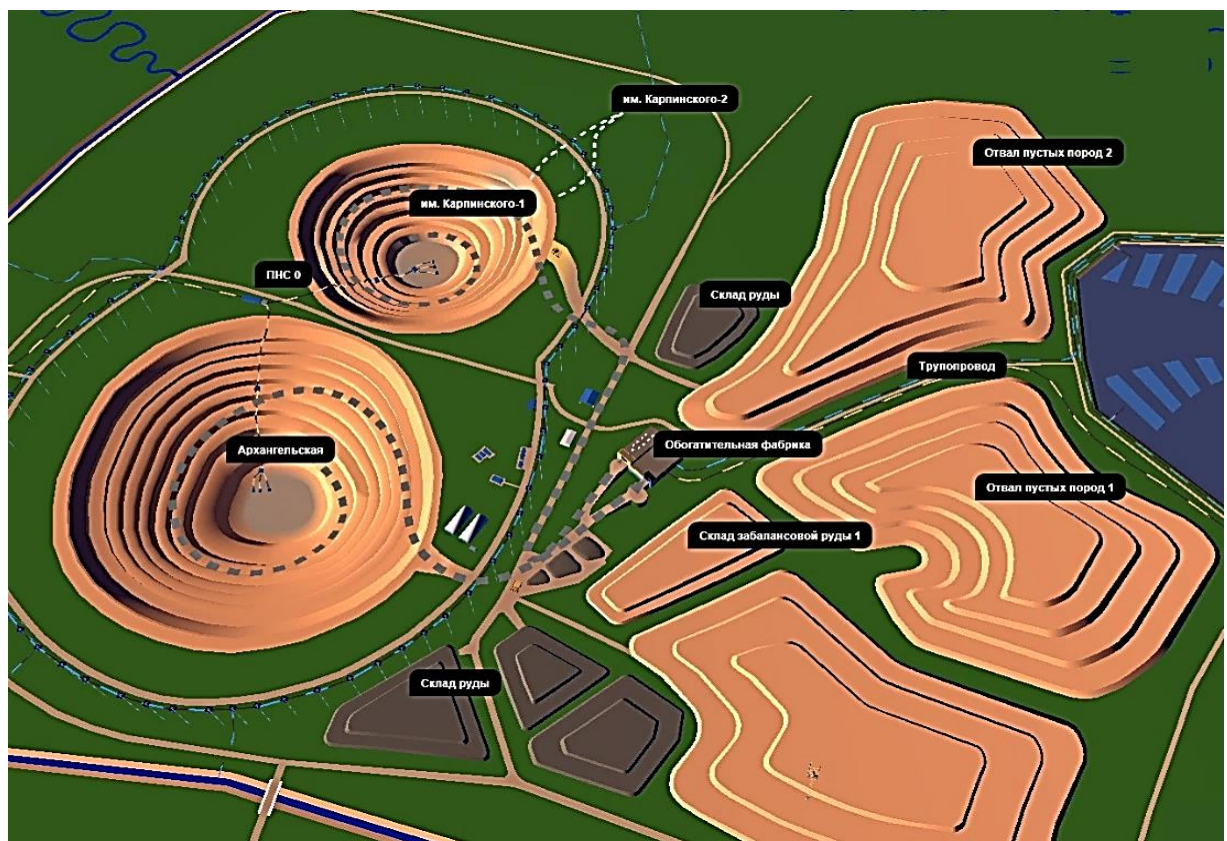


Рисунок 1.1 – Схема месторождения им. Ломоносова¹

Внутри цепочки 6 кимберлитовых тел месторождения, расстояние между рудными залежами колеблется от 130 м до 2 км. По своим масштабам оно относится к разряду крупных, общая площадь составляет 28 км². Беломорские алмазы по своему качеству не уступают алмазам других месторождений мира. Значительная их часть бесцветна и прозрачна и относится к типу «чистой

¹ Здесь и далее по тексту карта месторождения взята с сайта <http://www.severalmaz.ru/proizvodstvo/protsess-proizvodstva/map/severalmaz.html>

воды». Около 60 % алмазного сырья имеет ювелирное качество [21,46,96,98]. Производительность обогатительной фабрики рассчитана на 4,0 млн. т руды в год.

В 2002 г. на трубке Архангельской был опробован гидромеханизированный способ ведения вскрышных работ и добычи полезного ископаемого. Результаты работ показали, что этот способ добычи неэффективен [21,46,96,98]. Для месторождения им. М. В. Ломоносова целесообразным признано применение традиционного горно-комбинированного способа отработки запасов руды.

В 2005 г. введена в эксплуатацию I очередь обогатительного комбината производственной мощностью 1 млн. т руды в год, с 2008 г. начаты горнодобывающие работы на трубке им. Карпинского-1 [21,46,96,98].

На основе технико-экономического обоснования, выполненного институтом «Якутнипроалмаз», составлен проект разработки «ГОК на месторождении им. М.В. Ломоносова. Пусковой комплекс производительностью 4,0 млн. тонн руды в год», проект предусматривает разработку карьеров первой очереди южной группы трубок: «Архангельская» и «им. Карпинского-1», «им. Карпинского-2». Срок окончания реализации проекта по добыче алмазов в трубках Архангельская и Карпинского-1 – конец 2026 г. [70,82,103].

Добыча алмазов на месторождении ведется открытым способом в сложных гидрогеологических и горнотехнических условиях. Горные работы выполняются под защитой внешнего дренажного контура вокруг карьеров и карьерного водоотлива с целью осушения кимберлитовых трубок [21,46,96,98]. Технологическая схема обогащения и доводки руды разработана специалистами ПАО «Севералмаз», Metso Minerals и института «Механобр инжиниринг». Извлечение алмазов по классу +3 у.с.к. (условно-ситовый класс, по международной системе приравнивается к размеру -1,2 мм) составляет 96 % [21,46,96,98].

Складирование хвостов обогатительной фабрики осуществляется в хвостохранилище с замкнутым оборотным водоснабжением (рисунок 1.3).

Карьерный водоотлив на трубке Архангельская обеспечивается работой трех насосных установок в составе главной насосной станции карьерного водоотлива на дне карьера (абс. отм. -44,0 м) и тремя насосными установками в составе перекачивающей насосной станции 2-го подъема, оборудованной на северо-западном борту карьера, на горизонте +10 метров [70,82,103].

Карьерный водоотлив на карьере тр. им. Карпинского-1 обеспечивался в 2016 году в два подъема из трех тандемов с различными насосами. Станция второго подъема обустроена на горизонте +42 м [70,82,103].

Суммарный дебит водоотлива на примере декабря 2016 г. составил 6335 м³/ч, в том числе:
– производительность карьерного водоотлива по тр. «Архангельская» – 826 м³/ч;

- производительность карьерного водоотлива по тр. «им. Карпинского-1» – 375 м³/ч;
- производительность дренажного контура водопонижающих скважин (ВПС) – 5134 м³/ч.

Суммарный объем откачиваемых вод, включая карьерные воды по двум карьерам, дренажные воды ВПС и воды с отвалов, в 2016 г. составил 54 067 тыс. м³, в т. ч. дренажных вод ВПС – 42 020 тыс. м³ [70,82,103].

1.2 Расчет материального баланса переработки руды

В таблице 1.1 приведены данные о запасах алмазов Ломоносовского ГОКа.

Таблица 1.1 – Данные о месторождениях алмазов и их запасах

Месторождение	Геолого-промышленный тип	Запасы, млн. кар.		Доля в балансовых запасах РФ, %	Содержание, кар/т	Добыча в 2014 г, млн. кар
		A+B+C ₁	C ₂			
Трубка Архангельская	коренной	95,634	0	4,4	0,9	1,373
Трубка Карпинского-1	коренной	30,156	0	4,4	1,11	266

Обогатительная фабрика спроектирована финско-шведской фирмой Metso minerals, ее проектная мощность первоначально составляла 1 млн. т/г, но в период 2014–2015 гг. была введена в эксплуатацию вторая очередь с производительностью 3 млн. т, при этом существующая фабрика не была демонтирована, а продолжила свою работу как составная часть нового обогатительного комбината. По данным, предоставленным в годовых отчётах руководством ПАО «Севералмаз», была построена гистограмма производительности фабрики за 3 г. (рисунок 1.2) [70,82,103].

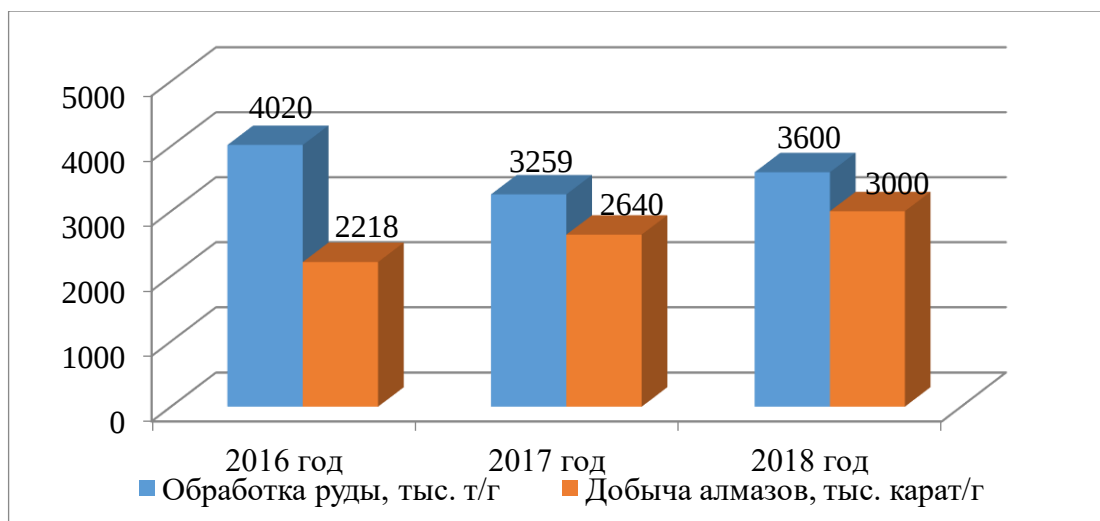


Рисунок 1.2 – Обработка руды, тыс. т в год

Всего за время работы обогатительной фабрики было обогащено более 20 млн. т руды и получено при этом более 10 млн. карат алмазов. Для расчётов данных соотношений следует использовать новейшие сведения о работе компании ПАО «Севералмаз» [70,82,103]. По данным о результатах деятельности ПАО «Севералмаз» за 2017 год, в указанный период было добыто 2 млн. 640 тыс. карат алмазов (рисунок 1.3). Количество обработанной на обогатительной фабрике руды за тот же год составляет 3259 тыс. т (рисунок 1.2). Чтобы рассчитать соотношения, необходимо перевести полученные данные в единицы СИ, а именно в килограммы.

Имея соотношение 1 карат = 0,0002 кг, вычисляем массу всех добытых алмазов:

$$\text{Масса всех алмазов} = 2640000 \text{ карат} \times 0,0002 = 528 \text{ кг}$$

Переводим массу обработанной на обогатительной фабрике руды в килограммы:

$$\text{Масса руды} = 3259000 \text{ т} \times 1000 = 3259 \times 10^6 \text{ кг}$$

Вычисляем соотношение массы всех полученных алмазов к массе обработанной руды:

$$\text{Масса всех алмазов/Масса руды} = 528 \text{ кг} / (3259 \times 10^6 \text{ кг}) \approx 1,62 \times 10^{-7}$$

Таким образом, в 1 кг руды, поступившей на обогатительную фабрику, содержится $1,62 \times 10^{-7}$ кг алмазов. Интересным также будет и примерное соотношение массы алмазов ювелирного качества к массе обработанной руды. Алмазы ювелирного качества составляют 10% от общего количества добытых на обогатительной фабрике алмазов.

Таким образом, вычислить данное соотношение можно, взяв 10% от предыдущего:

$$\text{Масса юв. алмазов/Масса руды} = 1,62 \times 10^{-7} \times 0,1 = 1,62 \times 10^{-8} \text{ кг}$$

Получаем, что в 1 кг руды, поступившей на обогатительную фабрику, содержится $1,62 \times 10^{-8}$ кг алмазов ювелирного качества.

528 кг алмазов – число ничтожно малое в сравнении с 3259×10^6 кг добытой руды. Таким образом, после процесса переработки в хвостохранилище поступает практически такая же масса отходов, какая масса руды была доставлена на обогатительную фабрику, в среднем около 3,5 млн. т отходов в год (рисунок 1.2).

Согласно полученным данным, основным недостатком существующего способа обогащения сапонитовых руд, является то, что из-за физико-химических свойств минерала сапонита не достигается норма чистой для обогащения воды, и весь горнорудный массив, который проходит обогащение, складывается после мокрого способа измельчения в чаше хвостохранилища. При условии, что норма взвешенных веществ не достигается, каждый год увеличивается высота насыпной дамбы, на 2019 г. высота дамбы составляет 138,0 м, а стоимость работ по строительству гидротехнического сооружения – 447 446 619,00 руб. Условия накопления осадков и рост дамбы можно спрогнозировать, что и будет представлено ниже по данным, предоставленным ПАО «Севералмаз» за 2017 год.

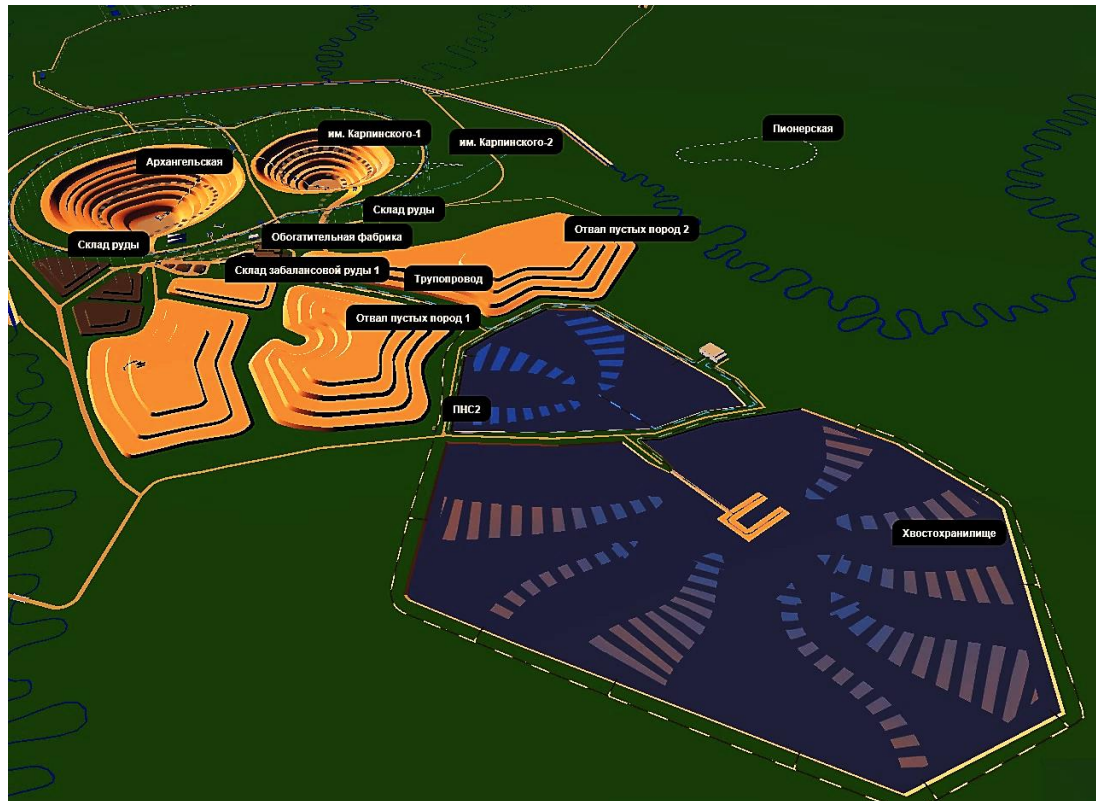


Рисунок 1.3 – Схема хвостохранилища месторождения им. Ломоносова

1.3 Имитационное моделирование условий накопления осадков и роста дамбы с использованием программного обеспечения MODDE Pro

MODDE Pro – это передовое высококачественное решение DOE (план экспериментов) от Umetrics. Программа извлекает информацию из больших наборов данных и представляет результаты в виде интерпретируемых графиков, основанных на математическом принципе проекции. Даже данные, характеризующиеся тысячами переменных, могут быть сведены к нескольким графикам, насыщенным информацией.

Программное обеспечение MODDE Pro использует два метода регрессии для подгонки модели к данным, такие как множественная линейная регрессия (MLR) и частичная регрессия наименьших квадратов (PLS). Обе эти модели могут обеспечивать прогноз одной (или нескольких) зависимых переменных, которые также называются откликами, с помощью регрессионной модели из набора независимых переменных, которые называются факторами. В случае плохо обусловленной задачи, когда переменные соотносятся друг с другом, для стабилизации модели и предельного подгонки требуется регуляризация или сортировка. Для этих случаев используется регрессия частичных наименьших квадратов, которая может быть определена как метод скрытых переменных, который обеспечивает регуляризацию путем представления зависимых переменных

с помощью небольшого набора линейных комбинаций (скрытых переменных). В результате размер пространства, охватываемого независимыми переменными, уменьшается.

Частичная регрессия наименьших квадратов также обеспечивает улучшенную интерпретацию регрессионной модели. Эта программа обеспечивает анализ эксперимента и данные оценки риска, которые означают определение оптимальных параметров. Также можно анализировать значения, которые оказывают наиболее существенное влияние на исследуемые параметры.

За основу взят массив данных, полученных в ходе измерения содержания взвешенных веществ в оборотной воде в 2017 г., основные точки отбора: линии № 1, № 2, водоприёмные колодцы № 2, 3, 4 (г/л) Ломоносовского ГОКа ПАО «Севералмаз», температура окружающей среды (°C), при которой происходил процесс обогащения руды, расход обработанной руды за сутки (т/сут.). На рисунке 1.4 приведён статистический анализ, представленный в виде графической зависимости влияния температуры и расхода руды, показаны области влияния образования (нормированная зона представлена голубым цветом) взвешенных веществ в оборотной воде для всех точек, с которых вода поступает на обогащение. Для всех точек отбора максимально допустимое содержание взвешенных веществ составляет 10–30 г/л, температура в диапазоне от 5 до 25°C при среднем оптимальном расходе руды 13 500 т/сут., таким образом, можно с уверенностью сказать, что при большем расходе руды и при понижении температуры окружающей среды, при которой происходит размол алмазоносной руды, потребуется разбавление оборотной воды с целью эффективного обогащения и извлечения алмазов. На рисунке 1.5 показан статистический анализ влияния температуры окружающей среды, расхода руды и содержание взвесей основной точки отбора (линия № 2) в оборотной воде на уровень роста дамбы (на момент составления статистического анализа уровень дамбы фиксировался на уровне 132 м), зелёная зона отвечает за отсутствие рисков повышения уровня, таким образом, условия риска находятся в интервале температур -30 – +17°C, содержание взвесей 0,6–158 г/л при любом расходе руды, в красной зоне видно, на какой процент вырастет уровень стенки.

Кроме того, была построена модель рисков и условий повышения уровня дамбы для восточной секции хвостохранилища (для примера было взято содержание взвешенных веществ линии №1), представленная на рисунке 1.6, условия для восточной секции имеют такие же характеристики, как и для северной секции хвостохранилища, диапазон температур -40–10°C, содержание взвесей 0,6–163,0 г/л. Таким образом, видно, что, соблюдая условия обогащения руды, можно уменьшить риски прорыва дамбы и сделать прогноз по строительству стен дамбы, данные условия приведут к минимальным экономическим затратам и снижению нагрузки на экологию.

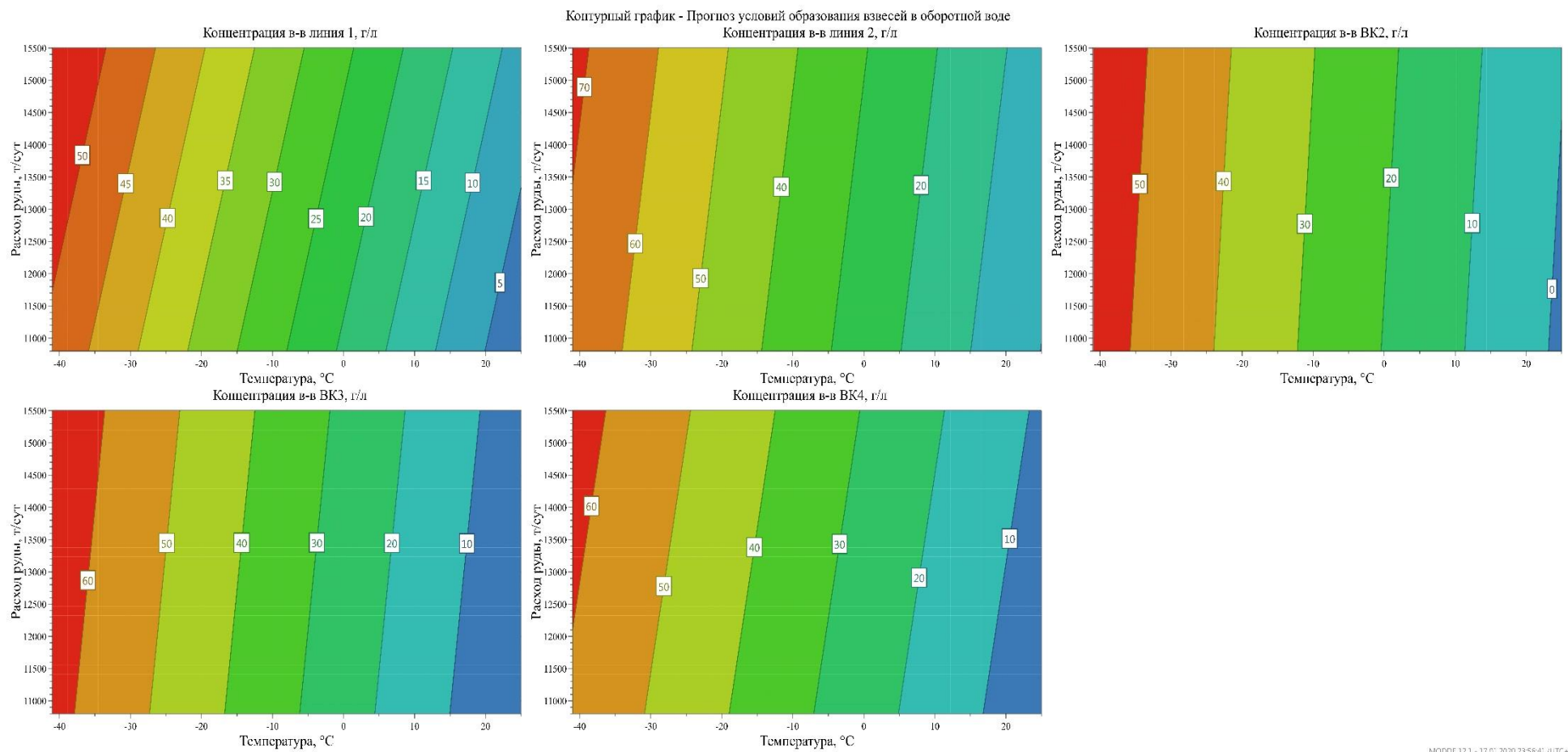


Рисунок 1.4 – Контурные графики влияния температуры и расхода руды на содержание взвесей в оборотной воде

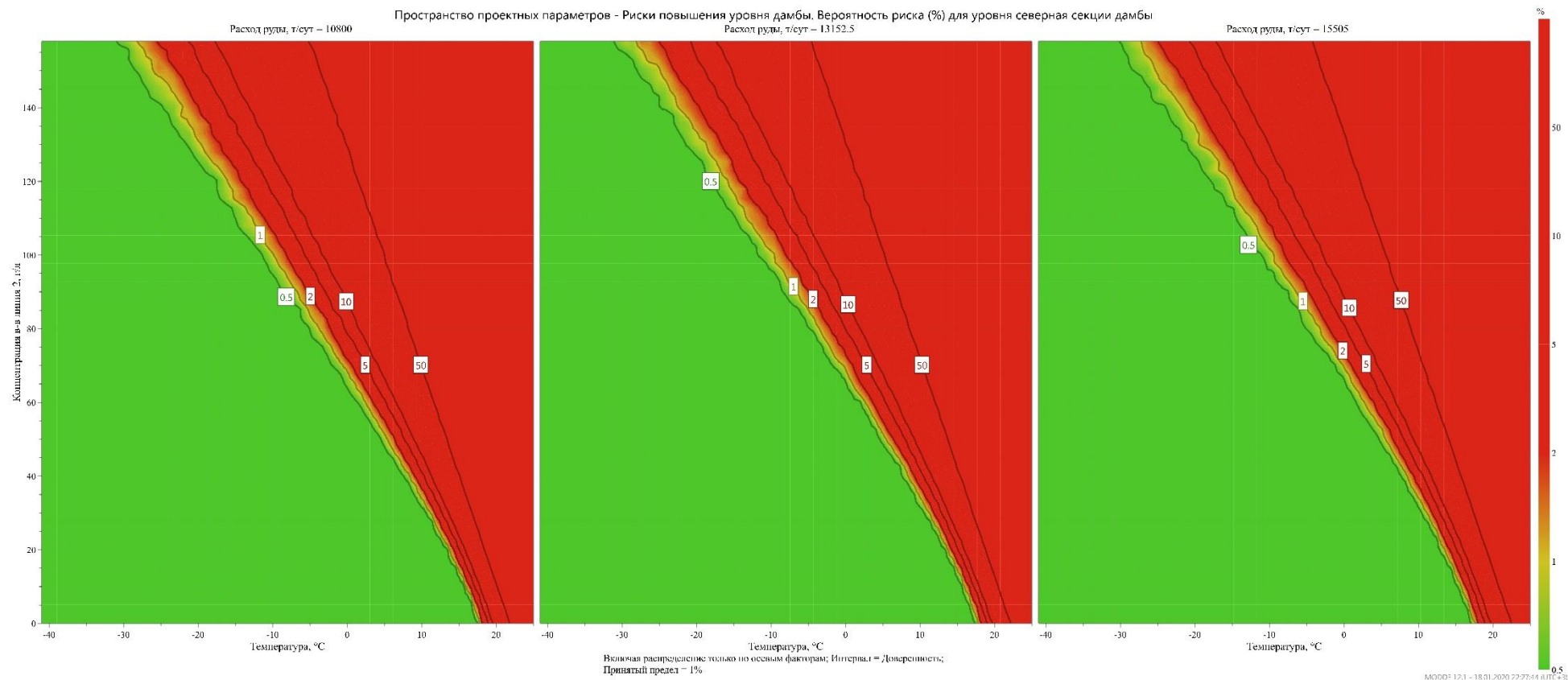


Рисунок 1.5 – Статистический анализ влияния температуры окружающей среды, расхода руды и содержания взвесей в оборотной воде на уровень роста дамбы, северная секция хвостохранилища Ломоносовского ГОКа ПАО «Севералмаз»

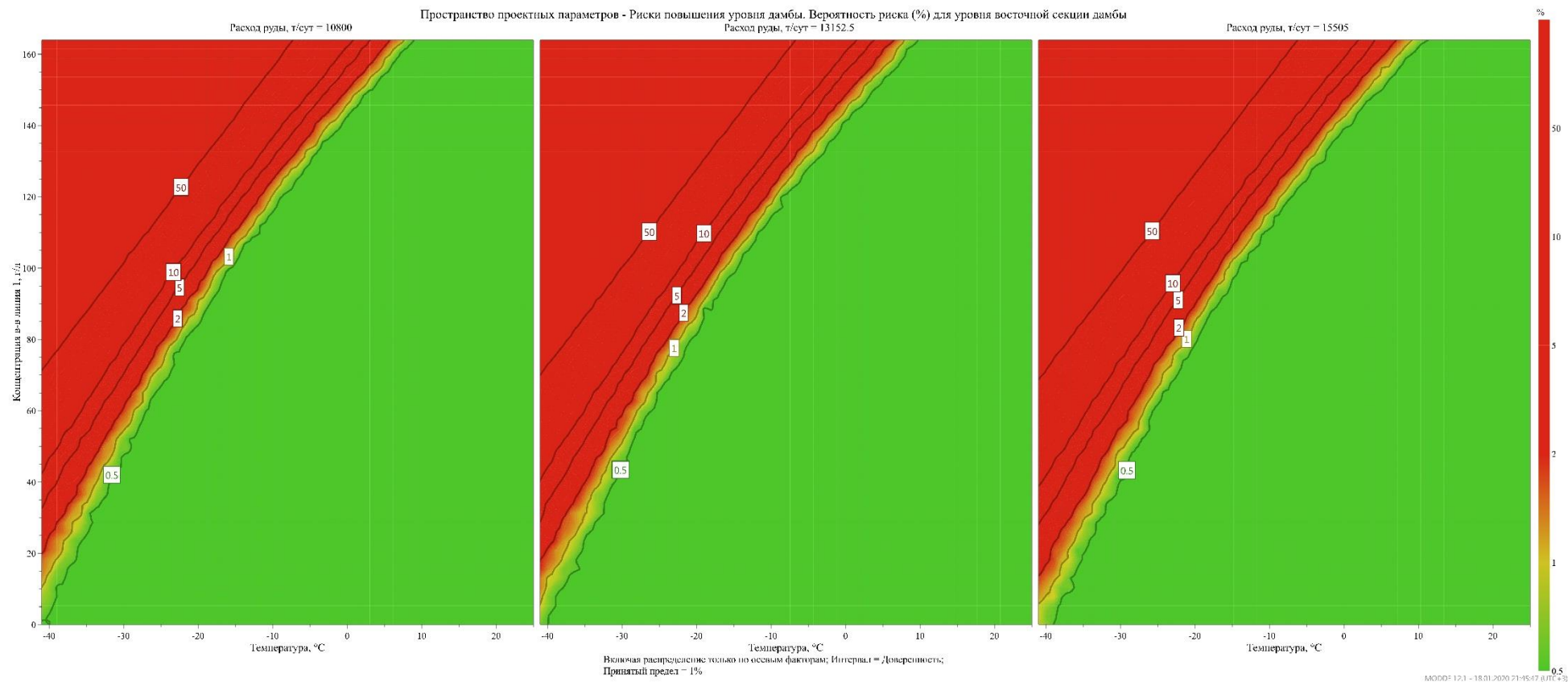


Рисунок 1.6 – Статистический анализ влияния температуры окружающей среды, расхода руды и содержания взвесей в оборотной воде на уровень роста дамбы, восточная секция хвостохранилища

1.4 Анализ научно-технической литературы

На основании обзора научно-технических работ, представленных ниже и затрагивающих области разработки технологических схем переработки и обогащения алмазосодержащих руд, опыта их эксплуатации, установлено, что нерешенными остаются такие проблемы, как надежность технологических схем, показатели технологичности, экологичности и экономичности при создании замкнутых схем на основе комплексной переработки сапонитовых отходов.

В данной главе проанализированы основные научные исследования по добыче и обогащению алмазосодержащей руды Архангельского месторождения, выстроенные в хронологическом порядке.

В 1951 г. в учебной монографии А.Г. Бетехтин привел основные технологические параметры переработки алмазосодержащей руды основного месторождения: описал, что добытая руда («синяя земля») дробится и промывается на специальных обогатительных фабриках, а также определил содержание алмаза в породе, которое составило 0,000052% (по весу). Основное месторождение алмазов расположено в Якутской части России [13].

Открытая в 1980 г. Архангельская алмазосодержащая провинция по своим природным запасам является второй сырьевой базой алмазов в России после Якутии и включает два месторождения алмазов – им. В. П. Гриба и им. М. В. Ломоносова. Месторождение им. М. В. Ломоносова является крупнейшим коренным месторождением алмазов в Европейской части РФ, включает в себя десять кимберлитовых трубок (Снегурочка, Архангельская, Пионерская, им. Ломоносова и др.) и характеризуется высоким качеством алмазного сырья, в котором на долю ювелирного ряда приходится более 60 % ценных кристаллов [24,58].

В 1994 г. было создано хвостохранилище Поморского ГОКа. А.А. Чистяков в диссертации «Процессы структурообразования и консолидации техногенных сапонитовых осадков» выдвинул научные положения об осадке хвостохранилища, подкрепленные лабораторными опытами. Им был установлен размер песчаных частиц (0,5–0,05 мм), находящихся в хвостохранилище, определено, что частицы достаточно быстро осаждаются в непосредственной близости от сброса в чашу хвостохранилища и формируют плотный осадок $\rho_{\text{ск}} = 1,31 \text{ г/см}^3$. Частицы размером 0,06–0,01 мм классифицированы как тонкодисперсные крупно-пылевидные, данный размер частиц составляет 50% твёрдых частиц исходной пульпы, они формируют высокопористый гелеобразный осадок ($\rho_{\text{ск}} = 0,14 \text{ г/см}^3$) [48,101].

Это позволило рассчитать количество отходов в планируемом хвостохранилище Поморского ГОКа. Общий объем отходов составил $1,9765 \text{ км}^3$, из них объем песчаного осадка – $0,1908 \text{ км}^3$ (10,0 % масс.), тонкодисперсного осадка – $1,7857 \text{ км}^3$ (90,0 % масс.) [48,101].

Технологические расчеты, выполненные А. А. Чистяковым, показали, что величина уплотнения сапонитовой пульпы за время наполнения хвостохранилища в этом случае составит 2,87 м. Время «полной» теоретической консолидации 150-метровой толщи сапонитового осадка составит около 3 тыс. лет.

Выполненные исследователем научные эксперименты показали, что порог коагуляции тонкодисперсной сапонитовой суспензии составляет 6 % масс. При введении карьерных и природных минерализованных вод достигается содержание взвешенных частиц 0,25–1,0 г/л. Средняя скорость осветления сапонитовых суспензий, приготовленных в растворах минерализованных вод, в течение первых суток достигает 0,38 см/ч; величина осветленного столба жидкости составляет до 70 % от первоначального объема суспензий. Средняя скорость седиментации 6 % масс. пульпы в производственном хвостохранилище на обогатительной фабрике составляет 0,004 см/ч [48,101].

Д.В. Шпилёвой в 2008 г. было установлено, что при разведке трубок месторождения им. М.В. Ломоносова соотношение «твердой» и «жидкой» частей сбрасываемой с обогатительной фабрики в виде пульпы в хвостохранилище при обогащении алмазоносной руды составит 1:5. Такое соотношение обусловило содержание взвесей в пульпе в количестве до 400 г/л, а тонкой взвеси – 1 г/л [104]. Исследовательница сумела предвидеть все трудности эксплуатации алмазосодержащей Архангельской руды. Было установлено, что для того, чтобы извлечь из руды содержащиеся в них алмазы с учетом мокрого самоизмельчения и гравитационной технологии извлечения алмазов из 1 т исходной руды, из пород кратерной части трубки получают так называемый концентрат весом максимум 50 кг. В составе концентрат объединяет тяжелую фракцию – фрагменты породы плотностью более $2,5\text{--}3,0 \text{ г/см}^3$, включая сам алмаз. Остальные более чем 950 кг от исходной пробы объемом 1 т представляют собой «пустую породу». Было выявлено, что «пустая порода» направляется в обводненном состоянии в виде пульпы в хвостохранилище, подавляющая масса поступающих в хвостохранилище хвостов представляет собой глинистый минерал сапонит.

Д.В. Шпилева определила, что сапонит отличает высокодисперсное аморфное состояние, для которого характерны свойства коллоидов, и, соответственно, он имеет очень маленькие размеры частиц; характеризуется гидрофильностью, способностью к ионному обмену, адсорбции, набуханию и проявлению упруго-вязко-пластичных и тиксотропных свойств в разбавленных и концентрированных суспензиях.

В 2006 г. В.Ф. Монастырский, Г.П. Двойченкова, А.В. Зуев, С.О. Луйк опубликовали статью, в которой представлены результаты исследований вещественного состава алмазосодержащих руд различных месторождений, разработаны алгоритмы и методы выбора технологических схем обогащения на основе контрастности свойств ценного компонента и пустой породы применительно к условиям конкретных месторождений.

Авторы на основании анализа и обобщения результатов исследований вещественного состава вмещающих пород анализируемого месторождения создали основы методов переработки и обогащения алмазосодержащего сырья для извлечения конечного продукта (алмаза) и подготовили исходные данные для моделирования качества технологических схем [61].

В 2008 г. Ф.С. Карпенко в работе «Условия накопления сапонитсодержащих осадков, и технология их сгущения в хвостохранилище месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова» предложил технологическую схему осветления хвостохранилища методом уплотнения (сгущения) осадка сапонита при замораживании и оттаивании суспензии. Использование данной технологии позволило бы не только снизить объем складываемого в хвостохранилище сапонита, но и дало бы возможность извлечь и складировать его для дальнейшего использования в различных областях хозяйственной деятельности [47].

Метод замораживания и оттаивания позволил бы организовать функционирование хвостохранилища, что, в свою очередь, позволило бы значительно снизить глубину хвостохранилища и высоту ограждающих дамб и, соответственно, повысить их экологическую безопасность. Было выявлено, что теплофизические свойства сапонита позволяют осуществлять замораживание и оттаивание суспензии сапонита за счет климатических особенностей района без использования дополнительных источников энергии [47].

Значительный вклад в исследование месторождений Архангельской алмазоносной провинции внесла лаборатория алмаза на базе геологического факультета МГУ, на которой велись разработки вплоть до 2010 г.; за 30 лет накоплен огромный фактический материал и выполнены обширные оригинальные аналитические исследования всего комплекса щелочного-ультраосновного магматизма Архангельской алмазоносной провинции. Лаборатория занимается исследованиями широкого ряда фундаментальных вопросов природного алмазообразования и образования высокоазотных алмазов, не характерных для других кимберлитовых трубок мира, формирования щелочно-ультраосновных пород, а также решением прикладных задач поиска месторождений алмаза и оценки алмазоносности пород [14,99].

В 2011 году АО «Механобр Инжиниринг» выполнил проект под названием «Пусковой комплекс производительностью 4,0 млн. тонн руды в год. Хвостовое хозяйство с оборотным водоснабжением». В соответствии с проектом предусматривалась водоподготовка

оборотной воды с использованием флокулянта Магнафлок М-156 и установка станции подачи флокулянта на фабрике, станции разведения и подачи флокулянта непосредственно в хвостохранилище, в сосредоточенные (торцевые) сбросы распределительного пульповода. В связи с проводимыми на тот момент опытно-промышленными испытаниями с применением карт намыва, акустического метода осаждения взвесей и т.д. в поисках эффективного и менее затратного варианта, работы по строительству станций подготовки и подачи флокулянта были отложены до 2020 года [14,99].

В 2012 г. А.Ю. Облицов в диссертации «Утилизация отходов обогащения алмазосодержащей руды месторождения имени М.В. Ломоносова» описал пути повышения эффективности разработки Ломоносовского месторождения алмазов через внедрение рациональной технологии утилизации отходов обогащения. Целью снижения техногенной нагрузки на окружающую среду была новая технология утилизации отходов ПАО «Севералмаз» на основе обжига сгущенных хвостов обогащения с получением на выходе керамического кирпича или цементного клинкера (в зависимости от температурных режимов, минерального и химического состава отходов, и добавок, а также времени обжига) [67].

В 2013 г. АК «АЛРОСА» объявила конкурс инновационных проектов в области горнодобывающей промышленности. Основной темой стало экономически рентабельное экологически безопасное обесшламливание оборотных вод обогатительной фабрики № 1 Ломоносовского горно-обогатительного комбината ПАО «Севералмаз». В резюме конкурса указано, что в ходе технологических процессов с использованием воды на обогатительной фабрике образуются отходы (шламы) с большой концентрацией глинистых частиц (в основном минерала – сапонита). Эти глинистые частицы долгое время не осаждаются и находятся в свободном взвешенном состоянии, в результате чего возникает проблема переполнения хранилища отходов обогатительной фабрики (хвостохранилища), а также повторного использования вод хвостохранилища для технических нужд (оборотная вода для обогащения кимберлитовой руды). Компания с привлечением разных подрядчиков пробовала применять различные способы осветления оборотных вод обогатительной фабрики (центрифугирование, сгущение, электрохимическая сепарация), но все эти методы оказались нерентабельными, в первую очередь из-за затрат на электроэнергию [12, 45, 49, 51, 59,62,68,77].

Шламсодержащие воды Ломоносовского ГОКа содержат сапонит в водной фазе от 10 г/л до 270 г/л. Физико-химическая характеристика жидкой фазы изученных проб характеризуется щелочными значениями pH, равными 8,1–8,5, низким окислительно-восстановительным потенциалом и малой величиной минерализации [12, 45, 49, 51, 59,62,68,77].

Установлено, что с увеличением содержания твёрдой фазы в виде сапонита в исследуемых шламосодержащих водных системах от 101,8 до 270 г/л величина их плотности возрастает от 1075 до 1235 кг/м³. Приведенные данные о составе воды показывают, что независимо от количества твердой фазы в воде pH составляет 8,1–8,5 [12, 45, 49, 51, 59, 62, 68, 77].

В 2015 г. Н.В. Антонов в магистерской диссертации «Комплекс гидротехнических сооружений на месторождении им. М.В. Ломоносова ПАО «Севералмаз»» произвел сравнительный анализ вариантов хвостохранилища наливного и намывного типа для их дальнейшей реализации, определил состав комплекса проектируемых гидротехнических сооружений и конструктивное решение; разработал технические решения по организации намывной дамбы хвостохранилища [8].

Данный проект включает в себя проектирование комплекса гидротехнических сооружений, предназначенных для организации складирования отходов производства горно-обогатительного комбината на месторождении им. М.В. Ломоносова ПАО «Севералмаз» [8].

В том же, 2015 г. С.А. Бахаревым были проведены исследования по осаждению взвешенных веществ с применением акустических волн в чаше хвостохранилища. Удалось снизить общее содержание взвешенных глинистых частиц с 150 г/л до концентрации 40–50 г/л, но частицы размером от 0,5 до 50 мкм и коллоиды меньше 0,5 мкм не осаждались. Автором было предложено совмещать акустический метод очистки оборотной воды от взвешенных частиц с реагентной очисткой [10].

1.5 Существующие способы сгущения сапонитовой суспензии коагулянтами и флокулянтами

В практике обогащения руд для ускорения осаждения тонких частиц при обезвоживании концентратов, промпродуктов, хвостов и сточных вод, направляемых в водные источники, применяют различные реагенты, ускоряющие процесс осаждения. К таким реагентам относятся неорганические регуляторы – соли металлов (в основном алюминия и железа) и органические анионные полимеры (производные целлюлозы, полиакриламид и др.).

1.5.1 Сгущение сапонитовой суспензии солями сернокислого алюминия и железа

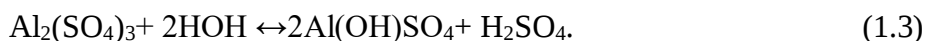
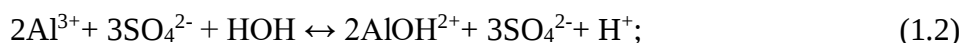
Механизм их действия заключается в следующем. Адсорбируясь на поверхности минеральных частиц, катионы трёхвалентного железа и алюминия приводят к изменению заряда отрицательно заряженных минералов и меняют дзета-потенциал, что приводит к обра-

зованию агрегатов из нескольких минеральных частиц (флокул), ускоряющих процесс сгущения и осаждения мелких частиц. В практике переработки руд используют такие реагенты, как соли алюминия и железа (железный купорос FeSO_4).

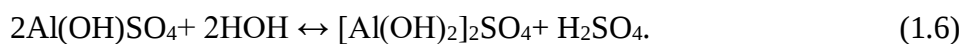
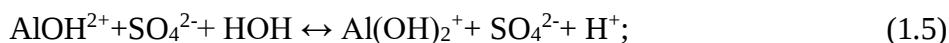
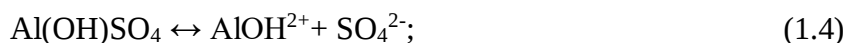
При подаче железного купороса ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) в водную среду двухвалентный ион (Fe^{2+}) окисляется до трёхвалентного (Fe^{3+}) с образованием осадка $\text{Fe}(\text{OH})_3$.

При использовании солей сернокислого алюминия действительно происходит сгущение сапонитовой пульпы, но из недостатков можно отметить высокую коррозионную химическую активность сульфата алюминия при гидролизе [17, 28,55,73,83,92,107]. Гидролиз сернокислого алюминия протекает в три стадии и описывается реакциями 1.1 – 1.9 с образованием осадка $2\text{Al}(\text{OH})_3$.

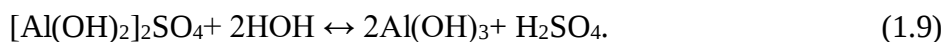
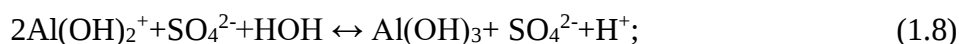
Первая стадия:



Вторая стадия:

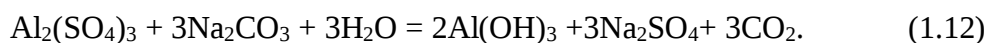
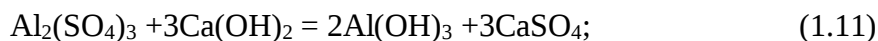
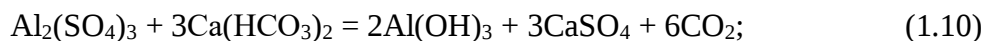


Третья стадия:



Среда раствора – кислая согласно уравнению гидролиза, соответственно, $\text{pH} < 7$ в результате образования иона водорода H^+ . Образовавшуюся мицеллу можно представить следующей формулой: $\{[\text{Al}(\text{OH})_3]_6 [\text{Al}_6(\text{H}_2\text{O})_6(\text{OH})_{15}]_2\} (\text{SO}_4)_3$.

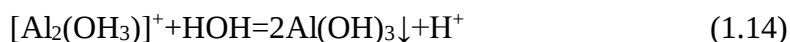
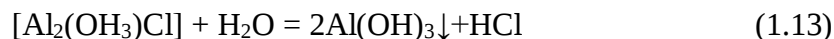
Водная среда, не содержащая гидроксиды кальция или карбонаты натрия, должна предварительно известковаться известью или содой, расчёт ведётся следующим образом: на 0,5 г $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ pH_2O добавляется 0,35 г известковой воды или соды. В таком случае уравнения реакций 1.10 – 1.12 записываются в следующем виде [17, 28,55,73,83,92,107]:



На выходе чистая осветлённая вода не должна содержать растворённый коагулянт, но по причине того, что водная среда в основном содержит гидроксид кальция и карбонат

натрия (жесткая вода) в достаточном количестве, происходит осаждение сульфата алюминия в виде нерастворимого гидроксида (образуется бесцветный студенистый осадок гидроксида алюминия) [17, 28,55,73,83,92,107].

Стушение сапониновой суспензии также проводилось с использованием гидрохлорида алюминия с общей химической формулой $Al_n(OH)_{(3n-m)}Cl_m$ [5,36,41,43,76,85,110]. Осаждение сапониновой пульпы производится после её разбавления до значения плотностей $\rho_{\text{разб.п.}}$ от 1250 до 1350 кг/м³, к разбавленной пульпе добавляется коагулянт с содержанием алюминия по Al_2O_3 197,25 кг/м³, концентрация рабочего раствора коагулянта по Al_2O_3 15%, плотность рабочего раствора $\rho_{\text{раб.р-ра}}=1315$ кг/м³ расход рабочего раствора коагулянта 120 м³ на 1000 м³ разбавленной пульпы, перемешивание коагулянта и разбавленной пульпы осуществляется со скоростью от 80 до 110 об/мин, время стушения 40 мин [17, 28,55,73,83,92,107]. Гидролиз гидрохлорида алюминия можно описать следующими уравнениями 1.13–1.14:



На второй стадии процесса коагуляции основная роль отводится адсорбции на коллоидных частицах гидроксидов алюминия.

Основной недостаток применения гидроксида алюминия состоит в том, что для процесса гидролиза гидрохлорида алюминия и для образования мицеллы, и эффективного хлопьеобразования необходимо предварительное подщелачивание пробы [17, 28,55,73,83,92,107].

1.5.2 Стушение сапониновой суспензии полиакриламидными флокулянтами

Полиакриламидные флокулянты – это органические высокомолекулярные соединения. Флокуляционный процесс осаждения анионным (полиакриламидным) с их зарядом и очень высокой молекулярной массой, можно разделить на две стадии:

1. адсорбция полиэлектролита на поверхности волокон;
2. последующее образование хлопьев вдоль полимерной цепи за счёт электростатического взаимодействия, пример схемы протекания процесса флокуляции представлен на рисунке 1.7 [30,64].



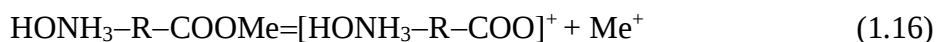
Рисунок 1.7 – Схема флокуляции каолиновой глины [106]

В связи с тем, что полиакриламид является амфотерным полиэлектролитом, диссоциация полиакриламида зависит от pH обрабатываемой среды, по кислому или основному типу и может быть представлена следующими уравнениями 1.15-1.16 [30,64]:

в кислой среде:



в щелочной среде:



где R – углеводородная цепочка молекулы полиакриламида.

В нейтральной среде в результате взаимодействия заряженных групп молекул полиакриламида сворачивается в клубок, тем самым захватывая частицы примеси, в щелочной и кислой среде вытягивается в цепочку и также захватывает примеси.

1.6 Выводы по главе 1

На основании литературного обзора установлено, что необходимо провести следующие исследования:

1. Исследовать минеральный и химический состав кимберлитовой алмазоносной руды перед её подачей на размол;
2. Исследовать поведение глинистого минерала сапонита в процессе его размола и после процесса обогащения алмазоносной руды в чаше хвостохранилища и в оборотной воде перед подачей на обогащение руды (определение минерального и химического состава);
3. Провести экспериментальные исследования по определению скорости осаждения взвешенных веществ, скорости коагуляции с применением различных коагулянтов и флокулянтов и определить эффективность их использования по показателю мутности воды;

4. Изучить гранулометрический, минеральный состав слива с классификаторов после процесса обогащения руды, расчёт скорости осаждения взвешенных частиц при различных значениях содержания твёрдого;
5. На основе исследований физико-химических свойств и термодинамических характеристик сапонитового шлама провести синтез реагента с заданными физико-химическими свойствами, сочетающего в себе функции коагулянта и флокулянта;
6. Определение оптимального значения Ж:Т и дозировки полученного реагента;
7. Подобрать уплотнитель на основе алюмосиликатного сырья советского производства для придания устойчивости сгущённому продукту;
8. Создать замкнутую систему водооборота за счёт очистки карьерных и отвалных вод от мелкодисперсных взвесей минерала сапонита и введения их в технологический цикл обогащения руды с использованием полученного реагента и добавок – двухкальциевого силиката.

ГЛАВА 2 ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Объекты экспериментальных исследований

Объектом исследования является кимберлитовая алмазоносная сапонитовая руда с месторождения им. Ломоносова Архангельской области трубки им. Карпинского-1 и Архангельская, оборотная вода обогатительной фабрики, поступающая на обогащение с поверхности пруда-отстойника хвостохранилища (глубина не более 0,5 м), вода с водоприёмных колодцев, расположенных по периметру пруда отстойника (глубина не более 0,5 м), слив с наклонного классификатора после отбивки, направляемый по трубопроводу в чашу хвостохранилища, и отходы обогащения, расположенные в чаше хвостохранилища (глубина более 1 м), дренажная (ливневая), выкачиваемая с глубины карьеров и поступающая на поля поверхностной фильтрации, сгущённый продукт.

Для решения поставленных задач и достижения цели исследования использовались стандартизированные и современные физико-химические методы исследования, и поверенные приборы лабораторной базы и центра коллективного пользования Санкт-Петербургского горного университета.

2.2 Моделирование процесса осаждения сапонитовой пульпы в цилиндрах

Процессом отстаивания (седиментации) называется процесс, при котором частицы, находящиеся в дисперсной фазе, оседают под действием силы тяжести. За процессом отстаивания суспензии можно наблюдать, если разбавить её, тщательно перемешать и поместить разбавленную суспензию в цилиндр [79]. Процесс отстаивания суспензий протекает в несколько стадий показанных на рисунке 2.1: а) взвеси равномерно распределены по всему объёму; б) через короткий промежуток времени в зоне 1 образуется чистый слой, в зоне 4 (на дне цилиндра) образуется слой наиболее крупных частиц, над зоной 4 образуется зона стеснённого осаждения (зона 3 – критическая точка осаждения, в которой переходная зона исчезает, но уплотнение ещё не началось), где частицы тесно расположены по отношению друг к другу и дальнейшее осаждение возможно только благодаря вытеснению жидкости между ними над зоной номер 3, в переходной зоне, плотность которой уменьшается снизу вверх по направлению к зоне исходной суспензии, в зоне 2 и 3 частицы осаждаются свободно под действием сил тяжести; в-г) зона 1 – образование слоя чистой осветлённой жидкости, по мере отстаивания зона 1 и 3 увеличиваются, а в зоне 3 к тому же происходит уплотнение частиц; д) процесс отстаивания прекращается, когда зона 2 и переходная зона

исчезают и завершается уплотнение частиц, это соответствует полному разделению на осадок и осветлённую жидкость [79].

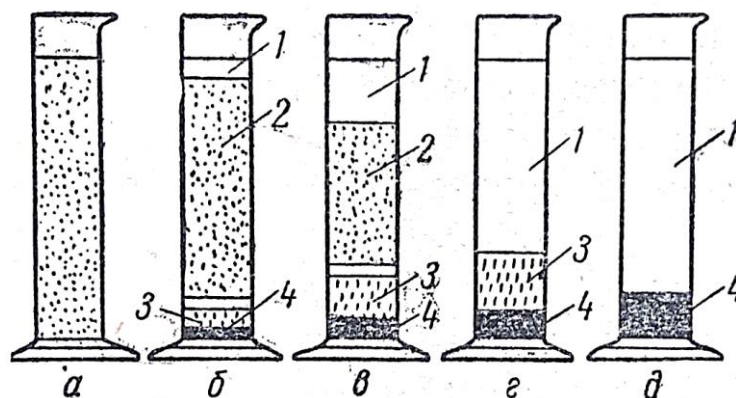


Рисунок 2.1 – Схема процесса отстаивания:

a-d – стадии процесса; 1-4 – образование зон системы

2.3 Установка осаждения сапонитовой пульпы

Для определения эффективности применения нового вида минерального кальцийалюмосиликатного реагента и выявления его коагуляционных свойств и уплотнение сгущённого продукта уплотнителем были проведены опыты на лабораторном стенде.

Установка представляет собой реакционную ёмкость, рассчитанную на 70 л обрабатываемой пульпы, оснащённую мотором с турбинной мешалкой, тахометром для определения частоты оборотов мешалки, загрузочной воронкой для реагентов и пульпы и сливом сгущённого продукта, схема установки представлена на рисунке 2.2. Контроль значения pH контролировался прибором pH-метром 2215 Hanna Instruments.

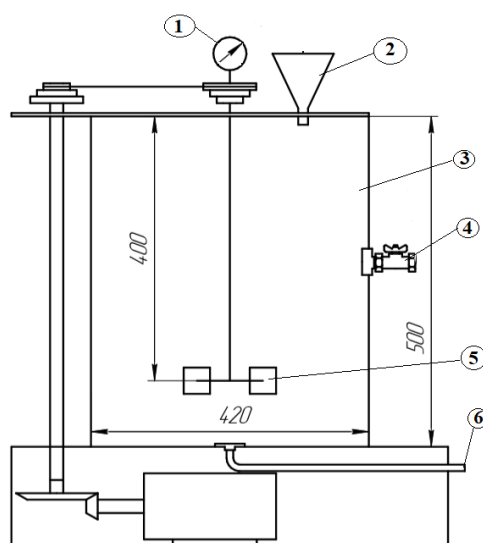


Рисунок 2.2 – Схема лабораторной установки осаждения сапонитовой пульпы:

1) тахометр; 2) подача осветлителя и пульпы; 3) реакционная ёмкость; 4) кран для слива осветлённой части; 5) электроприводная мешалка; 6) кран для слива сгущённого продукта

2.4 Исследования химического и минерального состава образцов рентгеноструктурной, рентгенофлуоресцентной спектроскопией

Рентгеноструктурные анализы отобранных образцов алмазосодержащей породы с трубок Архангельская и им. Карпинского-1 (Приложение А; Б) исследованы на рентгеновском дифрактометре XRD-7000, при больших временах накопления (2с) и шаге сканирования $0,02^\circ$. Диагностика минерального состава проводилась методом сопоставления экспериментальных и эталонных спектров из баз данных [15,60,69,97]. Количественный минеральный состав осуществлялся методом полной профильной обработки рентгеновских картин от неориентированных препаратов по методу Ритвельда. Количественные расчёты по методу Ритвельда обычно оцениваются в 2–3% [15,60,69,97].

Ошибка определения складывается (по закону сложения ошибок) из ошибок расчёта для каждой фазы и даётся в весовых процентах. При этом для отдельных фаз ошибка определения будет отличаться и может составлять от 0,5 до 2–3%.

Для подтверждения магнезиальной минеральной составляющей сапонитовой руды и изучения морфологии после обработки пульпы коагулянтами использовался сканирующий электронный микроскоп TESCAN Vega.

Определение оксидной стравляющей проб проводилось при помощи РФА спектрометра SHUMADZU 1800. Для проведения исследований из предварительно измельчённой просушенной пробы были спрессованы таблетки и помещены на подготовленную матрицу, изготовленную из тонкодисперсного порошка целлюлозы.



Рисунок 2.3 – Фотография проведения исследования:

а) РФА спектрометр SHUMADZU 1800; б) фотография спрессованной пробы

2.5 Гранулометрический анализ

Пульпа слива с классификатора после процесса обогащения, оборотная вода обогатительной фабрики, пульпа хвостохранилища исследованы ситовым методом. Сущность гранулометрического анализа заключается в рассеивании на наборе сит с различными размерами отверстий общей пробы анализируемого материала. С целью измерения дисперсных параметров, размеров частиц и функций распределения частиц по размерам, суспензий использовался лазерный анализатор распределения размеров частиц HORIBA LA-950, диапазоном измерений от 0,01 мкм до 3000 мкм. Результат измерений представляет собой гистограмму, на которой по оси ординат откладываются массовые доли фракции в процентах, а по оси абсцисс – диаметр частиц d или lgd .

2.6 Термогравиметрический анализ

Дифференциально-термический анализ сапонитовых руд с кимберлитовых трубок Ломоносовского месторождения проводился на приборе SDT Q600 фирмы TA Instruments (США) в Центре коллективного пользования Санкт-Петербургского горного университета, который совмещает дифференциальный термический анализ (ДТА) и термогравиметрию.

Исходные материалы были отпрессованы в таблетки диаметром 5,1 мм и высотой порядка 0,7–0,8 мм, давление прессования порядка 1,0–1,2 кгс/мм² [57].

Образцы нагревали в корундовых тиграх с постоянной скоростью 10°С/мин в динамической атмосфере воздуха (поток воздуха 50 см³/мин) интервал температур составил от 40–1100°С. Продувку печного пространства для отвода выделяющихся в процессе нагревания газов проводили осушённым пропусканием через колонку с силикагелем воздухом (100 мл/мин). Навеска образца составляла от 20 до 40 мг, при анализе проводилось одновременное определение измерения массы образца в вес. % от величины навески (кривая TG) и изменения энтальпии, сопровождавших термические трансформации.

2.7 Анализ оборотной воды, пульпы хвостохранилища и природной воды до и после обработки коагулянтами

1. Определение мутности в лабораторных условиях исследуемых проб оборотной и дренажной воды проводилось турбидиметрическим методом по каолину, и по формазину в соответствии с ПНД Ф 14.1:2:4.213-05 «Методика выполнения измерений мутности питьевых, природных и сточных вод турбидиметрическим методом по каолину и по формазину» с построением градуированных графиков, и измерением при $\lambda = 530$ нм в кювете с толщи-

ной оптического слоя 50 мм на приборе спектрофотометре Промэколаб ПЭ-5400 УФ с использованием программы Analys 54 [54]. Для построения градуировочного графика использовалось ГСО 7271-96, мутность по формазину 4000 ЕМФ. Из ГСО были приготовлены рабочие растворы следующим образом: брали 5 см³ ГСО из ампулы и довели дистиллированной водой до 50 см³ (мутность составила 400 ЕМФ). Из рабочего раствора в колбы на 100 мл вносят 2,5; 5,0; 7,5; 10,0; 12,5 мл, что соответственно равно 10; 20; 30; 40; 50 ppm, и доводят до 100 мл дистиллированной водой. Результат построения градуировочного графика представлен на рисунке 2.4.

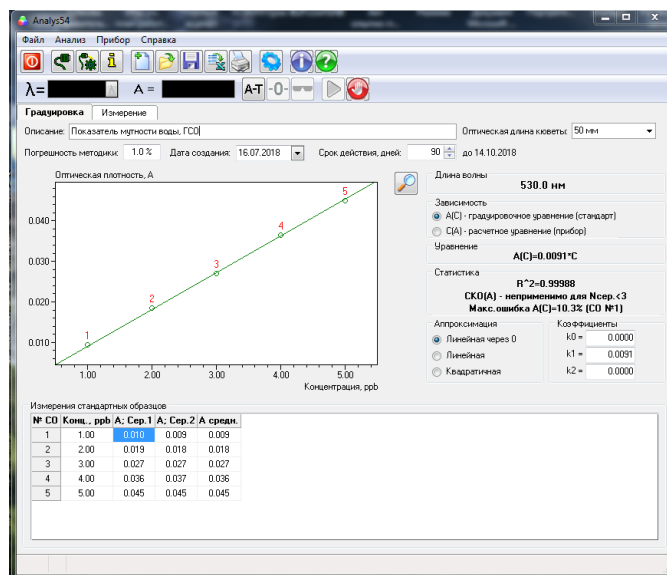


Рисунок 2.4 – Градуировочный график для определения показателя мутности воды

При проведении опытно-промышленных испытаний для определения показателя мутности использовался портативный измеритель мутности АМТ21 с диапазоном измерений от 0 до 19,99 NTU, от 20 до 199,9 NTU, от 200 до 1000 NTU [85].

2. Определение остаточного алюминия, железа, свинца и цинка, магния, марганца, меди в природной воде проводилось по ПНД Ф 16.2.2:2.3.71-2011 на атомно-абсорбционной установке с использованием спектрометра «МГА-915/МГА-1000». В графитовую кювету вводилась исследуемая проба в количестве 10 мл, содержание элементов проводилось автоматически по предварительно установленной градуировочной зависимости [54].

3. Водородный показатель проб и водной вытяжки руды определялся с помощью рН метра «рН 2215 Hanna Instruments».

4. Определение вязкости пульпы со сливов классификаторов проводилось на ротационном вискозиметре Brookfield DV2.

5. Определение плотности оборотной воды обогатительной фабрики проводилось с помощью ареометра согласно ГОСТ 18995.1-73.

6. Определение плотности сгущённой части проводилось пикнометрическим методом в соответствии с ГОСТ 18995.1-73. «Продукты химические жидкие. Методы определения плотности». Для проведения испытаний по определению плотности в сгущённом продукте использовались пикнометры ПТ-50 ГОСТ 22524-77 и электронные весы с пределом допускаемой погрешности взвешивания $\pm 0,001$ г. Пикнометр заполняли с помощью пипетки Пастера или воронки анализируемой пробой до метки, закрывают пикнометр пробкой и взвешивают на электронных весах [85].

Истинная плотность материала, $\rho_{\text{ист}}$, г/см³, определяется по формуле (2.1):

$$\rho = \frac{(m_2 - m_1)\rho_c}{(m_2 - m_1) + (m_4 - m_3)}, \quad (2.1)$$

где m_1 – масса пустого пикнометра, г;

m_2 – масса пикнометра с навеской, г;

m_3 – масса пикнометра с навеской и водой или инертной жидкостью, г;

m_4 – масса пикнометра с водой или инертной жидкостью, г;

ρ_c – плотность воды (равная 1) или другой инертной жидкости, применяемой вместо воды.

8. Определение скорости осаждения взвешенных частиц в сапонитовой пульпе производилось методом отстаивания и декантации в течение времени в мерных цилиндрах. При ламинарном режиме осаждения частиц, т.е. значении критерия Рейнольдса, меньшем или равным 0,2, скорость свободного осаждения с достаточной степенью точности может быть рассчитана по формуле Стокса (2.2) [79]:

$$w_{oc} = \frac{d^2(\rho - \rho_c)g}{18\mu_c}, \text{ м/с}, \quad (2.2)$$

где d – диаметр частицы, м;

ρ – плотность частицы, кг/м³;

ρ_c – плотность среды, кг/м³;

μ_c – динамический коэффициент вязкости среды Па·с;

g – ускорение свободного падения, м/с².

Реальная скорость осаждения с учетом соударения частиц при прохождении ими слоя сапонитовой мути определяется по формуле (2.3):

$$w_{oc} = 0,5w_{oc}, \text{ м/с}, \quad (2.3)$$

где 0,5 – коэффициент стесненного слоя.

Так как преимущественно в свободно взвешенном состоянии находятся по всему объёму частицы глинистого минерала сапонита, а глина имеет пластинчатую форму, то стоит ввести в расчёты поправочный коэффициент формы, который в нашем случае будет иметь значение $\varphi = 0,43$ [79].

2.8 Выводы по главе 2

1. Определены объекты исследований в качестве которых были взяты: исходное сырье – алмазоносная руда, отходы процесса обогащения сапонитовой алмазоносной руды.
2. Выбрана методика определения седиментационных свойств синтезированного неорганического коагулянта разработанного для осаждения глинистого минерала сапонита в оборотной и карьерной водах Ломоносовского ГОКа.
3. Предложен метод определения минерального, химического и гранулометрического состава руды и отходов обогащения с использованием рентгеноструктурного, рентгенофазового, термогравиметрического и гранулометрического анализов с целью выявления основных компонентов.
4. В качестве оценки качества осветлённой воды после использования коагулянтов и флокулянтов будет использован спектроскопический метод с построением градуировочного графика на государственного стандарта ГСО 7271-96 для оценки содержания взвешенных веществ до и после осветления.

ГЛАВА 3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ МИНЕРАЛА САПОНИТА ПО УЧАСТКАМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ЦИКЛА ОБОГАЩЕНИЯ АЛМАЗОНОСТНОЙ РУДЫ

3.1 Кристаллохимическое описание строения глинистого минерала сапонита

Особенностью строения кимберлитовой породы Архангельской алмазоносной провинции является глинистый минерал сапонит, в руде содержится до 70 % (а в некоторых случаях до 90 %) минерала, что является принципиальной особенностью месторождения по сравнению с Якутской алмазоносной провинцией [18,26].

Глинистый природный минерал сапонит (от англ. *saponite*) причисляется к глинистым минералам, таким как слоистый силикат из группы монтмориллонита («сметитов»), подкласс филлосиликатов [18,26].

Общую химическую формулу минерала можно записать в виде $(Ca,Na)_{0,3}(Mg,Fe)_3(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot 4H_2O$, образуется в виде твёрдой изоморфной примеси, содержащей в своем составе ионы Fe, Cr, Ni, Zn, Cu, Li и др. [97].

В.Г. Фёкличевым было установлено, что «чистый минерал сапонит-стевенсит имеет минеральную структурную формулу $Na_xMg_3(Al_xSi_{4-x}O_{10})(OH)_2 \cdot 4H_2O$, минерал имеет моноклинную сингонию, плотность минерала равна 2 г/см^3 , а его твердость по Моосу – 2 (по уточненным данным: плотность $2,3\text{--}2,5 \text{ г/см}^3$, твердость по Моосу – $2,5$)» [97].

Согласно исследованиям А.Г. Бетехтина, «слоистое расположение анионов и катионов в кристаллической решетке характерно для кристаллической структуры минералов монтмориллонитовой группы, в принципе, как и для всех слюдообразных веществ.

Отличительной особенностью таких минералов по сравнению с минералами групп каолинита и галлуазита является то, что «гидраргиллитовый» слой располагается между двумя слоями кремнекислородных тетраэдров (как и у минералов группы талька), причем одни вершинки тетраэдров, занятые ионами кислорода, входят в состав «гидраргиллитового» слоя, а другие, занятые гидроксильными ионами, обращены наружу, по сравнению с глинистым минералом каолинитом, где частицы представляют собой несколько вытянутых шестиугольных пластинок [13]». Октаэдрические сетки, которые содержат Al или Mg и имеют состав $Al_2(OH)_6$, либо $Mg_3(OH)_6$, представляют собой одноэтажные слои типа 0:1 и являются простейшими слоистыми структурами гидраргиллитового (гипбситового) и бруситового типа. Высота таких слоев в структуре первого типа составляет $0,205 \text{ нм}$, второго – $0,215 \text{ нм}$. Для групп монтмориллонита, в отличие от глин каолинита, характерно, что в

межслоевое пространство, так называемые «пирофиллитовые пачки», могут свободно проникать молекулы воды и другие полярные жидкости, связь между пакетами слабая, и действуют лишь Ванн-дер-Ваальсовы силы (межмолекулярные силы) из-за нижних и верхних плоскостей элементарных пакетов монтмориллонита, покрытых атомами кислорода, поэтому слои свободно раздвигаются и частицы глины набухают (величина индекса набухания соответствует $I = 5 \text{ мл/2 г}$).

Если брать кристаллическую структуру гидрослюда, можно также увидеть, что она представляет собой несколько вытянутых шестиугольных пластинок, но в отличие от сапонита межплоскостное пространство занято ионами K^+ , это приводит к прочному ионному взаимодействию смежных пакетов с катионами K^+ , и молекулы воды уже не могут проникать в межпакетное пространство.

На рисунке 3.1 показан пример строения кристаллической решётки монтмориллонита-сапонита в сравнении с другими кристаллическими решётками.

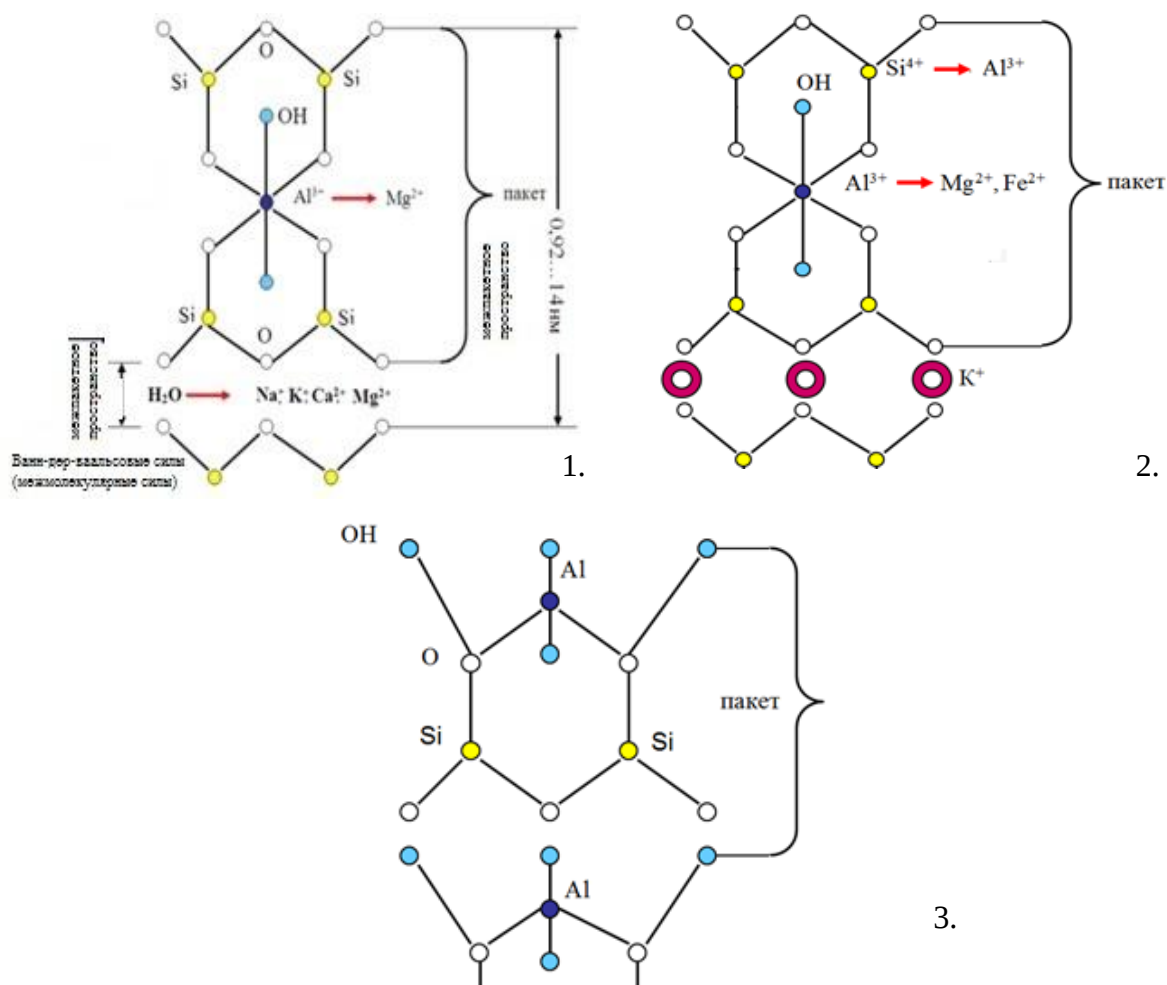


Рисунок 3.1 – Схемы кристаллических решёток:

1) монтмориллонита-сапонита; 2) гидрослюда; 3) каолинита

По сравнению с гидрослюдой и каолинитом, частицы сапонита легко диспергируются. По физико-химическим характеристикам сапонит имеет $pH = 7,6$; скорость капиллярного просачивания $0,08 \text{ см/сек.}$; при среднем размере частиц $0,1 \text{ мм}$ удельная поверхность составляет ($S_{уд}$), $\text{м}^2/\text{кг} - 43444 \text{ м}^2/\text{кг}$, а микро-и нанодисперсный размер частиц – $173429 \text{ м}^2/\text{кг}$ [101].

У глинистого минерала сапонита как у представителя группы монтмориллонита главными признаками являются: высокодисперсное состояние, характеризующееся коллоидными и близкими к ним размерами частиц, гидрофильность (т.е. активное взаимодействие с водной средой), способность к адсорбции и ионному обмену, набухание и проявление упруго-вязко-пластичных и тиксотропных свойств в концентрированных и разбавленных суспензиях [11,97].

3.2 Сапонитовая руда кимберлитовых трубок Архангельская и им. Карпинского-1

3.2.1 Рентгеноструктурный и рентгенофлуоресцентный анализ

Рентгеноструктурные анализы отобранных образцов алмазосодержащей породы с трубок Архангельская и им. Карпинского-1 представлены в виде дифрактограмм.

Данные исследования показали, что в основном в своём составе руда с двух трубок содержит: $\text{SiO}_2 \approx 40\text{--}60 \text{ \% масс.}$; $\text{MgO} \approx 20\text{--}30 \text{ \% масс.}$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 \approx 10\text{--}20 \text{ \% масс.}$, эти три оксида формируют не менее $80 \text{ \%}$ массы всей руды двух алмазоносных трубок, более подробно результаты исследований оксидного состава сапонитовой руды с трубки Архангельская и им. Карпинского-1 представлены в таблице 3.1, фотографии руды представлены на рисунке 3.2, на фотографии видно, что по цвету руды отличаются.



Рисунок 3.2 – Фото руд с месторождения им. Ломоносова

Таблица 3.1 – Оксидный состав сапонитовых руд Ломоносовского ГОКа

Образец	Содержание, % масс.									
	SiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	TiO ₂	MnO	Na ₂ O	прочее
Руда тр. Карпинского-1	44,2	34,4	11,2	3,21	3,0	1,0	1,09	0,16	0,8	0,94
Руда тр. Архангельская	50,9	28,7	9,15	2,61	2,6	0,77	0,99	0,15	1,94	2,19

Определение содержащихся в образцах минералов проводилось в соответствии с базой кристаллографических данных rruff.info, диагностических констант минералов В.Г. Фёкличева, рентгенометрического определителя минералов В. И. Михеева [60,69,97], идентификация пиков представлена на рисунке 3.3.

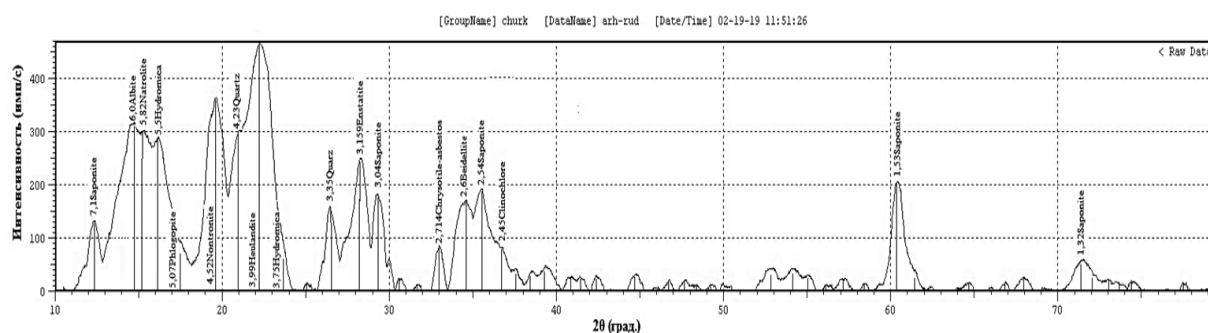


Рисунок 3.3 – Рентгенограмма сапонитовой руды с трубки Архангельская

Диагностический анализ минерального состава сапонитовой алмазонасной руды по данным рентгеноструктурного анализа показал наличие следующих минералов, представленных в таблице 3.2; также в таблице представлено полуколичественное массовое содержание минералов, выявленных в руде, приведены твёрдости минералов по Моосу и плотности минералов, распределенные в порядке убывания.

Таблица 3.2 – Минеральный состав сапонитовой алмазонасной руды трубки Архангельская

Минерал	2θ*	d**	I/I ₀ ***	Структурная формула	Плотность, кг/м ³	Твёрдость по Моосу	Содержание, % масс.
1	2	3	4	5	6	7	8
Энстатит	28,22	3,16	53	Mg ₂ [Si ₂ O ₆]	3300	5,5	6,5
Флогопит	17,48	5,07	21	6MgO·Al ₂ O ₃ ·6SiO ₂ ·2H ₂ O	2780	2,5	4,9
Кварц	20,98	4,23	64	α-SiO ₂	2650	7,0	12,1
	26,53	3,36	34				

Продолжение таблицы 3.2

1	2	3	4	5	6	7	8
Клинохлор	36,70	2,44	18	$\text{Mg}_5\text{Al}(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_8$	2628	2,5	2,1
Альбит	14,6	6,0	67	$\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$	2615	6,0–6,5	8,3
Хризотил	32,96	2,71	19	$\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	2550	3	2,4
Гидрослюда	16,16	5,48	61	$\text{K}_{0,5-1,5}(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_{2-3}$ $\cdot (\text{Si}_{4-x}\text{Al}_x\text{O}_{10})$ $\cdot (\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	2550	2,0	9,2
	23,68	3,75	19				
Сапонит	12,37	7,15	29	$(\text{Ca}_{0,5}, \text{Na})_{0,3}[\text{Mg}, (\text{Fe}^{2+})]_3$ $(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	2500	2,5	20,3
	29,32	3,04	39				
	35,54	2,52	37				
	60,36	1,53	45				
	71,38	1,32	13				
Нонтронит	19,62	4,52	77	$\text{Na}_{0,3}\text{Fe}_2((\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10})$ $(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	2300	2,0	9,4
Натролит	15,20	5,82	63	$\text{Na}_2[\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	2260	5,0-5,5	7,9
Гейландит	22,24	3,99	100	$(\text{Me}_{0,5-1})_9[\text{Al}_9\text{Si}_{27}\text{O}_{72}] \cdot$ $24\text{H}_2\text{O}$	2170	4	12,3
Бейделлит	34,58	2,59	37	$(\text{Na}, \text{Ca})_{0,3}\text{Al}_2(\text{Si}, \text{Al})_4$ $\text{O}_{10}(\text{OH})_2 n\text{H}_2\text{O}$	2150	1,0	4,6
Итого:							100

* 2θ — угол рассеяния, измеряется в градусах;** d — межплоскостное расстояние;*** I/I_0 — интенсивность

Трубка им. Карпинского-1 находится на расстоянии 1 км 26 м от трубки Архангельская. Глубина отбора пробы от поверхности составила 143 м. Её минеральный состав практически не изучен, в литературе имеется только геологическая модель.

Из полученной рентгенограммы следует, что строение трубки значительно отличается от Архангельской как по петрофизическим свойствам пород, имеющимися в литературе (влажность, пористость, плотность, акустика, деформационные и прочностные показатели), так и по минеральному составу, представленному в таблице 3.3, результаты рентгенограммы представлены на рисунке 3.4.

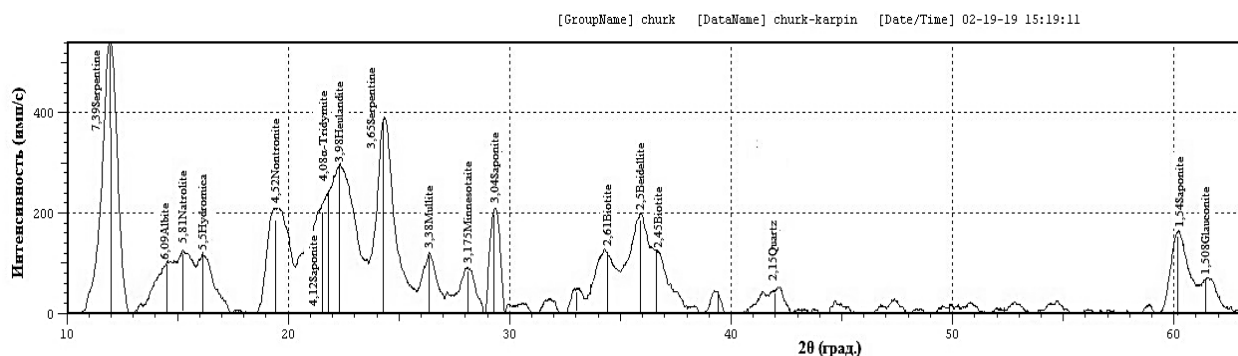


Рисунок 3.4 – Рентгенограмма сапонитовой руды с трубки им. Карпинского-1

Таблица 3.3 – Минеральный состав алмазоносной руды трубки им. Карпинского-1

Минерал	2θ	d	I/I ₀	Структурная формула	Плотность, кг/м ³	Твёрдость по Моссу	Содержание, % масс.
1	2	3	4	5	6	7	8
Муллит	26,35	3,38	23	Al _x (Al _x Si _{2-x} O _{5,5-0,5x})	3170	6,0	3,57
Миннесотаит	28,07	3,17	18	Fe ³⁺ ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	3010	2,5	2,98
Глауконит	61,42	1,51	14	(K,Na)(Fe ³⁺ ,Al,Mg) ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂	2900	2,0	2,32
Биотит	34,26	2,61	24	K(Mg, Fe) ₃ [(OH,F) ₂ [Al Si ₃ O ₁₀]]	2760	2,5	7,74
	36,6	2,45	24				
Кварц	41,95	2,15	11	α-SiO ₂	2710	7,0	1,79
Альбит	14,53	6,09	19	Na[AlSi ₃ O ₈]	2615	6,0	2,98
Гидролюда	16,14	5,49	23	K _{0,5-1,5} (Al, Mg, Fe) ₂₋₃ ·(Si _{4-x} Al _x O ₁₀) ·(OH) ₂ ·nH ₂ O	2550	2,0	3,57
Сапонит	21,54	4,12	41	(Ca _{0,5} Na) _{0,3} [Mg,(Fe ²⁺)] ₃ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂	2500	2,5	17,14
	29,31	3,04	39				
	61,18	1,54	31				
α-Тридимит	21,76	4,08	44	(Ca _{0,5} Na) _{0,3} [Mg,(Fe ²⁺)] ₃ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ SiO ₂	2333	6,5	7,15
Натролит	15,24	5,81	24	Na ₂ [Al ₂ Si ₃ O ₁₀]·2H ₂ O	2250	5,0	3,72
Нонтронит	19,58	5,53	39	Na _{0,3} Fe ₂ ((Si,Al) ₄ O ₁₀) (OH) ₂ ·nH ₂ O	2300	2,0	6,52

Продолжение таблицы 3.3

1	2	3	4	5	6	7	8
Серпентин	11,08	7,39	100	$\text{Mg}_6[\text{Si}_4\text{O}_{10}] \cdot [\text{OH}]_8$	2200	3,5	25,62
	24,35	3,65	72				
Гейландит	22,32	3,98	55	$\text{Mg}_6[\text{Si}_4\text{O}_{10}] \cdot [\text{OH}]_8$ $(\text{Me}_{0,5-1})_9[\text{Al}_9\text{Si}_{27}\text{O}_{72}] \cdot 24\text{H}_2\text{O}$	2170	4,0	8,94
Бейделлит	35,92	2,5	38	$(\text{Na,Ca})_{0,3}\text{Al}_2(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	2150	1,0	5,96
Итого:							100

По данным рентгенограмм можно сделать вывод, что наличие флогопита, встречающегося в гидротермально-изменённых ультраосновных и карбонатных горных породах в основном мантийного, материла, свидетельствует о том, что мы действительно имеем дело с алмазоносной рудой [61], для кратерной части характерен сапонит.

Принято считать тяжёлой фракцией фракцию с удельным весом более 2800 кг/м^3 , или минералы, плотность которых выше, чем у кварца. Как видно из таблиц 3.2 и 3.3, руда трубки Архангельская представлена в большей степени, чем руда трубки им. Карпинского-1 $\approx 18\%$ (муллит, миннесотаит (талк), глауконит, биотит, кварц), такими минералами тяжёлой фракции, как энтатит, флогопит, кварц, суммарное содержание – $23,5\%$, также в руде трубки Архангельская превалирует сапонит (см. рисунок 3.3), стоит отметить, что трубка Архангельская в своём составе по сравнению с им. Карпинского-1 содержит большее количество цеолитов, полевого шпата, алюмосиликата $\approx 40\%$, что придаёт руде более твёрдое состояние. Измерения плотности руды пикнометрическим способом показали, что плотность руды тр. Архангельская составляет $2,3501 \text{ г/см}^3$, трубки им. Карпинского-1 – $2,2627 \text{ г/см}^3$, данные значения доказывают, что состав руды обеих трубок неординарный и подаваясь бесконтрольно на размол руды влияет на дальнейшее её обогащение.

Результаты исследований состава также показали наличие глинистых минералов и преобладание их в большей степени в трубке Архангельская ($\approx 37\%$ масс. от общей массы) по сравнению с трубкой им. Карпинского-1 ($\approx 29,6\%$ масс.), что в дальнейшем может вызывать проблемы с осаждением сапонитовой пульпы после обогащения от взвешенных веществ, так как данный вид минералов обладает свойством сильного набухания от влаги и превращается в густую массу скользкого студня.

По данным, полученным в лаборатории, можно сделать вывод, что руда трубки Архангельская ($pH=8,85$) и им. Карпинского-1 ($pH=8,63$) имеет щелочные свойства, это результат развития регионального щелочного магматизма, данный факт приводит к утяжелению руды, вязкости и плохому пропусканию влаги.

Как видно из протоколов обеих кимберлитовых трубок, повышенное содержание Mg и Ca по сравнению с Na даёт нам основание думать, что в представленной руде преобладает форма Ca-Mg-сапонита, отвечающая за катионный обмен. В условиях высокой активности Mg и Fe происходит формирование флогопита и биотита, что отвечает лёгким фракциям, присутствующих в представленных рудах.

В подтверждение проведено исследование поверхности руды, и получена информация о полуколичественном элементном составе трубки Архангельская (рисунок 3.5) и трубки им. Карпинского-1 (рисунок 3.6) на сканирующем растровом электронном микроскопе Tescan Vega 3 с разрешением 3,0 нм при 30 кВ и увеличением от $\times 4$ до $\times 1\,000\,000$.

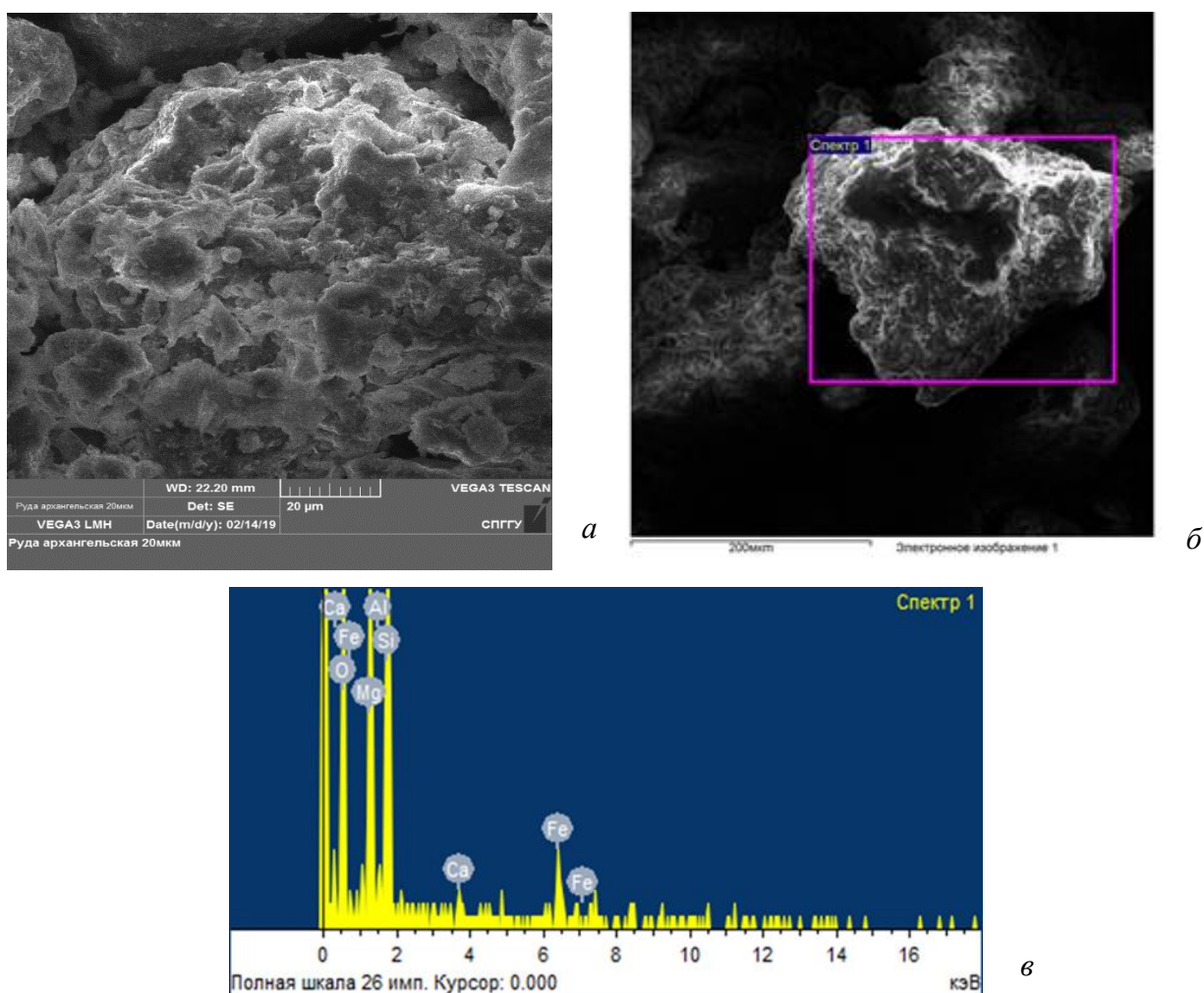


Рисунок 3.5 – Сапонитовая руда трубки Архангельская (а; б) и результаты микрорентгено-спектрального анализа (в)

По результатам микрорентгеноспектрального анализа руда трубки Архангельская содержит следующие элементы: Mg – 21,28 %; Ca – 34,01%; Al – 19,12%; Si – 20,28%; Fe – 5,31%.

По данным анализа можно сделать вывод, что сапонитовый минерал трубки Архангельская преимущественно имеет Ca^{2+} и Mg^{2+} форму и эти элементы в данном случае отвечают за катионный обмен.

В отличие от сапонитовой руды трубки им. Карпинского-1, которая содержит следующие элементы: Mg – 19,99 %; Si – 50,28%; Fe – 29,73% (см. рисунок 3.6 в), за катионный обмен в сапонитовой руде им. Карпинского-1 преимущественно отвечает Mg^{2+} . Таким образом, руда Архангельской трубки более активна по ионному обмену между основным веществом коагулянта и ионами, находящимися в слоях кристаллической решётки.

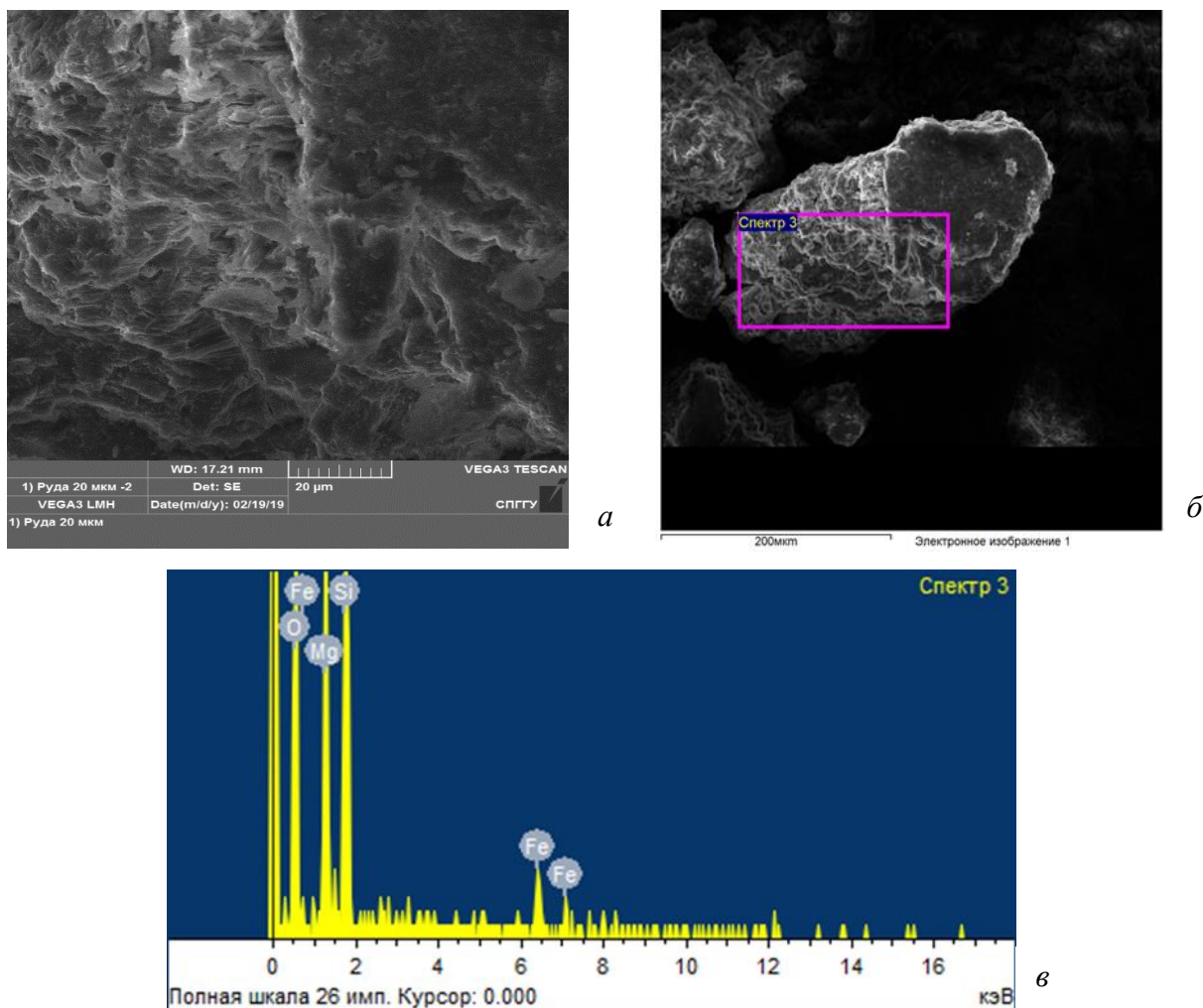


Рисунок 3.6 – Сапонитовая руда трубки им. Карпинского-1 (а; б) и результаты микрорентгеноспектрального анализа (в)

По данным Д. В. Шпилевой [104], которая исследовала минеральный состав кернов по всей глубине трубки Архангельская, и данным, полученным в ходе исследований руды,

можно сделать вывод, что трубка Архангельская имеет более сложное строение и представлена меньшим содержанием глинистых минералов, чем трубка Карпинского. Схематично расположение минералов, полученных Д. В. Шпилевой и в ходе исследований с нанесением глубины отбора пробы руды и известной информацией по минеральному составу, представлено на рисунке 3.7, где наглядно видно, на какой глубине и в каком составе располагаются минералы трубки Архангельская.

Трубка им. Карпинского по глубине расположения минералов не была изучена так подробно, но, по данным Т.В. Постуховой, «до глубины 450 м сложены псевдоморфозами сапонита по оливину и автолитам связующей массы. Ниже по разрезу основная масса кимберлита замещена серпентином. Присутствуют также кварц, тальк, кальцит» [80], что подтверждается рентгенограммой на рисунке 3.4

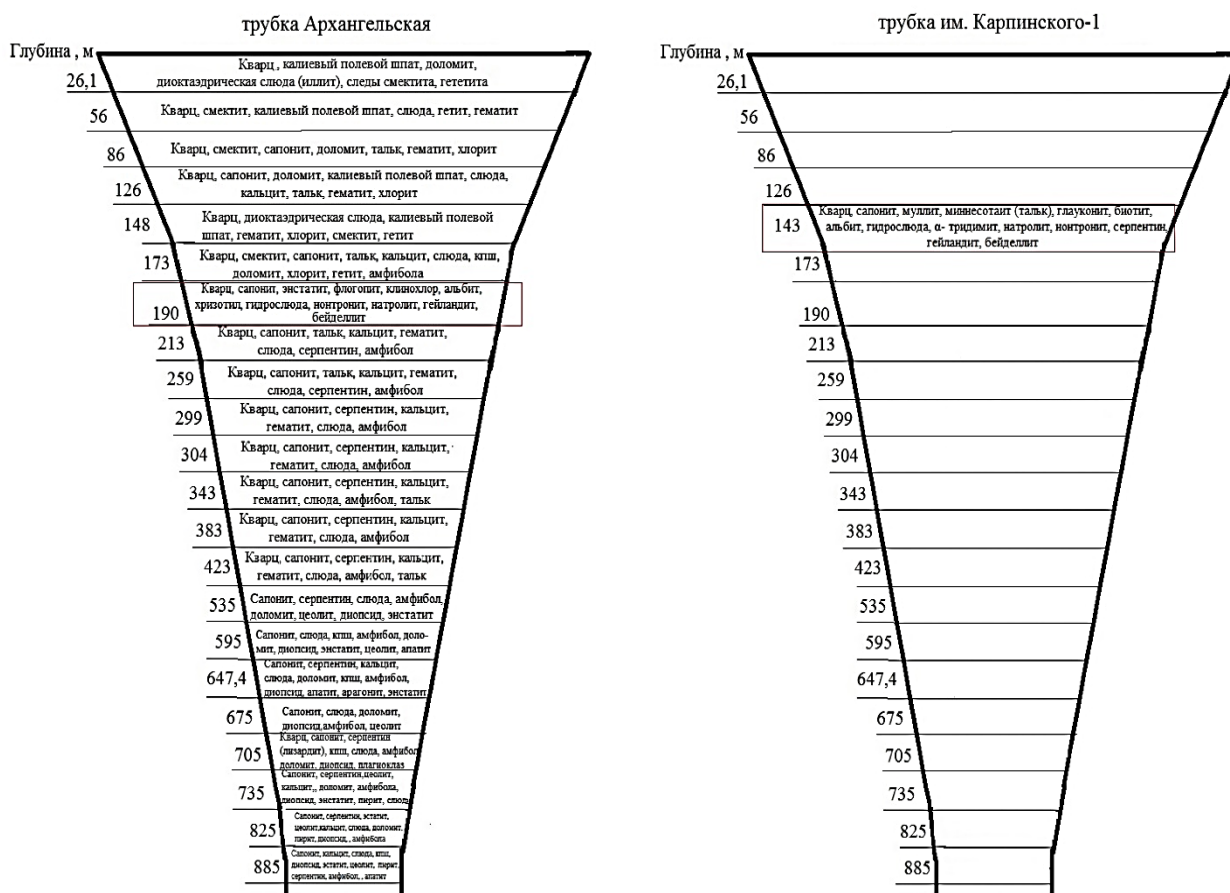


Рисунок 3.7 – Минеральный состав алмазоносных трубок по данным Д. В. Шпилевой и данным, полученным в ходе рентгеноструктурного анализа в зависимости от глубины

3.2.2 Термогравиметрический анализ сапонитовых алмазоносных руд

Проба руды с трубки Архангельская была предварительно измельчена в ступке и запрессована в таблетку, масса навески составила 33,25 мг (рисунок 3.8 и таблица 3.4).

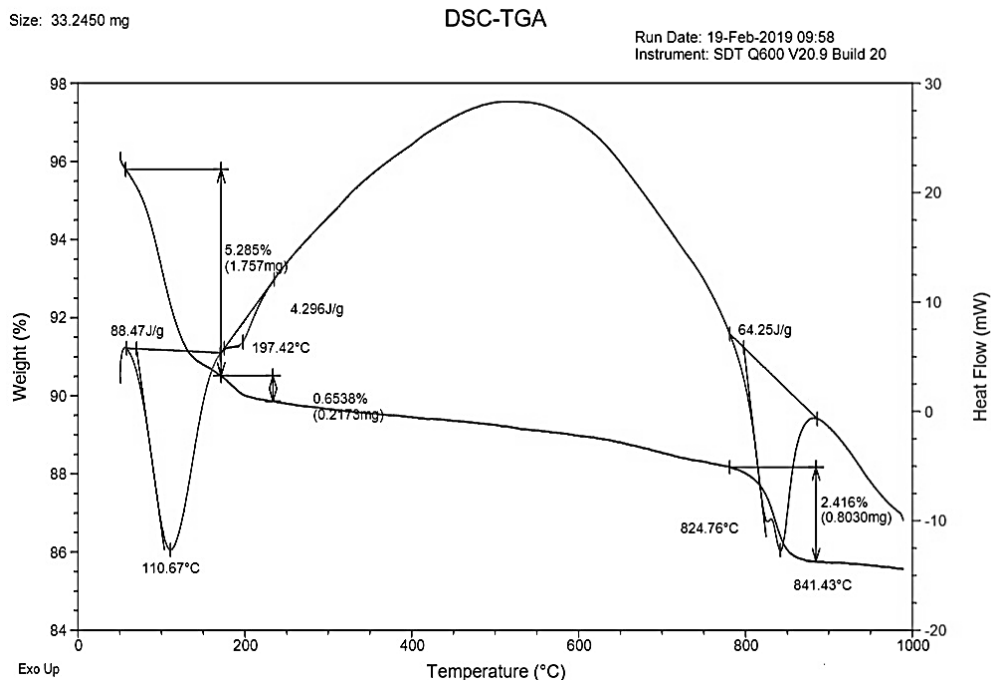


Рисунок 3.8 – Дериватограмма сапонитовой руды с трубки Архангельская
в воздушной среде

Таблица 3.4 – Результаты исследований методом термического анализа

I эндоэффект		II эндоэффект		III эндоэффект		Общая потеря массы, (%)
T _{max} (°C)	Потеря массы, (%)	T _{max} (°C)	Потеря массы, (%)	T _{max} (°C)	Потеря массы, (%)	
110,7	5,29	197,4	0,65	824,8–841,4	2,42	8,36

При T=110,7°C наблюдается эндотермический эффект (тепловой эффект 88,5 Дж/г) с потерей массы 5,29 %, что характерно для потери межслоевой (адсорбционной) воды из гидрослюдных минералов;

При T=197,4°C наблюдается эндотермический эффект (тепловой эффект 4,3 Дж/г) с потерей массы 0,65 %, данный перегиб на дериватограмме свидетельствует о кальциево-магнезиальном составе обменных катионов в руде, к таким минералам относятся сапонит, монтмориллонит, каолинит, находящиеся в руде.

При T=824,8–841,4°C наблюдается два эндотермических эффекта: тепловой эффект 64,25 Дж/г с потерей массы 2,42 %, что соответствует реакциям для составляющей слюдистых минералов в руде (флогопит), и кристаллизация аморфных продуктов разложения глинистых минералов (талк, сапонит).

Для исследования руды с трубки им. Карпинского-1 была взята навеска массой 17,69 мг результаты исследования представлены на рисунке 3.9 и в таблице 3.5.

Size: 17.6850 mg

DSC-TGA

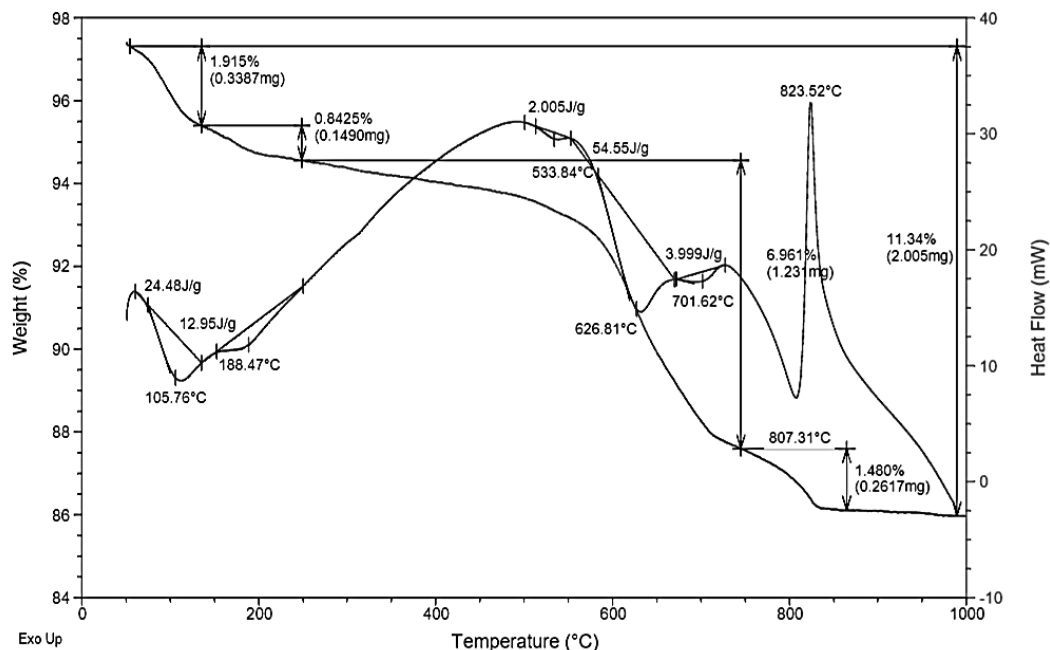
Run Date: 19-Feb-2019 12:03
Instrument: SDT Q600 V20.9 Build 20

Рисунок 3.9 – Дериватограмма сапонитовой руды с трубки им. Карпинского-1
в воздушной среде

Таблица 3.5 – Результаты исследований методом термического анализа

I эндоэффект		II эндоэффект		III эндоэффект		Общая потеря массы, (%)
T _{max} (°C)	Потеря массы, (%)	T _{max} (°C)	Потеря массы, (%)	T _{max} (°C)	Потеря массы, (%)	
105,8	1,92	188,5	0,84	824	1,48	4,24

При T=105,8°C наблюдается эндотермический эффект (тепловой эффект 24,5 Дж/г) с потерей массы 1,92 %, это связано с выделением свободной и физически связанной воды;

При T=188,5°C наблюдается эндотермический эффект (тепловой эффект 13 Дж/г) с потерей массы 0,84 %, данный перегиб на дериватограмме свидетельствует о кальциево-магнезиальном составе обменных катионов в руде, к таким минералам относятся сапонит, нонтронит, бейделлит, находящиеся в руде;

В диапазоне температур 533–626°C происходит процесс дегидроксидации - потери структурной воды (групп OH) из октаэдрических сеток глинистых минералов. В данном случае, высокая температура свидетельствует о преобладании цисоктаэдров, обусловленных изоморфными замещениями Mg на Al в октаэдрических сетках сапонита.

При $T = 807\text{--}824^\circ\text{C}$ наблюдается экзотермический эффект (тепловой эффект 79 Дж/г) с потерей массы 1,48 % что соответствует реакциям для составляющей слюдистых минералов в руде (биотит) и кристаллизацией аморфных продуктов разложения глинистых минералов (сапонит).

3.3 Исследования сапонитовой руды после слива с классификаторов спиральных наклонных

Технологической особенностью месторождений им. Ломоносова ПАО «Севералмаз» является совместная переработка алмазосодержащих руд Архангельского и им. Карпинского-1, в которых содержится высокое содержание глинистого минерала сапонита (70 % масс.). Кристаллический природный минерал образует при водной обработке тонкодисперсную глинистую суспензию с концентрацией гидросапонита в оборотной воде 10–200 г/дм³, коллоидные частицы имеют размер 1–3 мкм.

Руда после размола направляется на спиральные классификаторы (1 стадия обогащения), промывается оборотной водой, затем сапонитсодержащая вода поступает гидро-транспортом на хвостохранилище. Тонкодисперсные частицы гидросапонита обладают удельной поверхностью 35–40 м²/г, имеют высокую сорбционную способность к воде и, как следствие, характеризуются очень низкой скоростью осаждения в хвостохранилище.

3.3.1 Минеральный и химический состав пульпы после классификаторов

С целью изучения химического и минерального состава была отобрана проба после процесса обогащения сапонитовой руды. Данная проба представляет собой жидкую суспензию, предварительно высушенную при температуре 20°C. Исследования по минеральному и химическому составу пульпы, поступающей с классификаторов в хвостохранилище, представлены на рисунке 3.10 и в таблице 3.6.

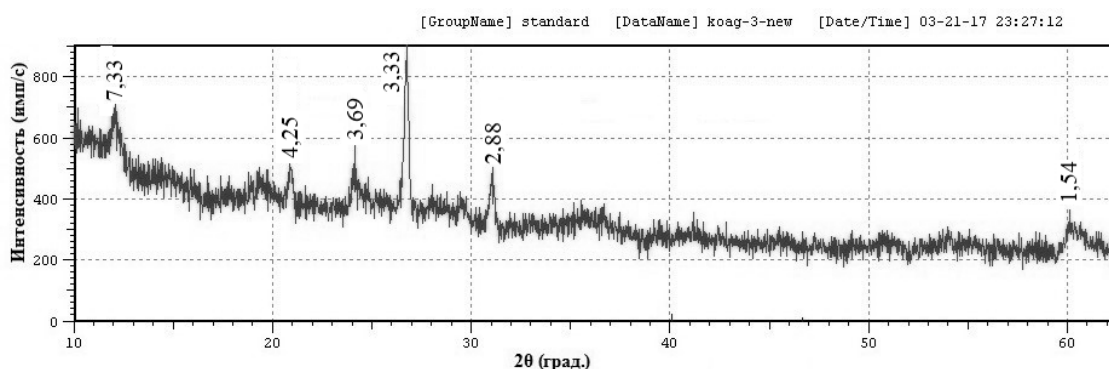


Рисунок 3.10 – Рентгенограмма сапонитовой руды после процесса обогащения (слив после классификаторов)

Таблица 3.6 – Оксидный состав пробы сапонитовой руды после процесса обогащения (слив со спиральных классификаторов)

Образец	Содержание, % масс.								
	SiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃	CaO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	Na ₂ O	прочее
Слив со спиральных классификаторов (КСН)	55,9	17,4	13,1	4,4	4,01	2,1	0,9	0,5	1,69

Таблица 3.7 – Минеральный состав сапонитовой алмазонасной руды после процесса обогащения (слив после классификаторов)

Минерал	2θ	d	I/I ₀	Структурная формула	Плотность, кг/м ³	Твёрдость по Моосу	Содержание, % масс.
Гематит	24,11	3,69	27	α-Fe ₂ O ₃	4900	4,5	16,01
Доломит	30,98	2,88	34	CaCO ₃ MgCO ₃	2940	4,0	14,04
Биотит	59,98	1,54	18	K(Mg,Fe) ₃ [AlSi ₃ O ₁₀](OH) ₂	2760	2,5	10,11
Кварц	26,71	3,33	100	α-SiO ₂	2710	7,0	25,28
Сапонит	12,06	7,33	30	Ca _{0,5} Na) _{0,3} [Mg,(Fe ²⁺)] ₃ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂	2500	2,5	19,94
α-Тридимит	20,88	4,25	21	SiO ₂	2330	7,0	14,61
Прочее							0,09
Итого							99,91

Из таблицы 3.7 видно, что, слив с классификаторов после отбивки (1 стадия обогащения) в основном содержит минералы тяжёлой фракции, и осаждение их в водной среде происходит достаточно быстро, но в связи с тем, что основную часть лёгкой фракции составляет сапонит, осаждение мелкодисперсных глинистых частиц является проблематичным, и следует вводить дополнительные осадители в виде коагулянтов и уплотнителя.

3.3.2 Гранулометрический анализ пульпы после слива с классификаторов спиральных наклонных

С целью изучения влияния размера частиц на процесс осаждения (сгущения) были проведены опыты с выявлением гранулометрического размера частиц на лазерном анализаторе распределения размеров частиц HORIBA LA-950 (Приложение В).

Как видно из гистограммы, фракционный состав после процесса обогащения имеет мелкодисперсную структуру диаметр частиц начинается с 0,445 мкм (в объёме 5,17 %) основной размер частиц 2,6 мкм, максимальный размер частиц составляет 229,1 мкм, от такого размера частиц зависит осветление оборотной воды, например, если осветление проводить применяя флокулянты, то при разном размере частиц скорость флотации полиакриламидными флокулянтами, может меняться, крупные частицы флотируются медленнее, скорость флотации возрастает с уменьшением размера частиц до определенного предела, скорость начинает снижаться, когда размер частиц 5–10 мкм [50]. В итоге мелкодисперсные глинистые частицы не только плохо флотируются сами, но затрудняют флотацию более крупных частиц [50]. Также стоит отметить высокую степень диспергирования глинопошковых в воде, т.е. при добавлении навески глинопорошка в колбу часть частиц не доходит до дна, а остаётся в толще воды во взвешенном состоянии.

3.4 Исследования взвесей в оборотной воде, поступающей на обогащение руды

Сапониновая пульпа по пульпопроводу поступает в хвостохранилище, средний объем пульпы, поступающей на хвостохранилище, составляет 2500–2600 м³/ч. В чаше хвостохранилища сапониновая пульпа под действием сил тяжести разделяется на твердое-жидкое и подается в виде оборотной воды насосами на обогатительную фабрику с целью обогащения алмазоносной руды.

3.4.1 Химический состав взвесей оборотной воды

Шламсодержащие воды Ломоносовского ГОКа характеризуются наличием частиц группы монтмориллонита от 1,0 г/л до 270 г/л. Физико-химическая характеристика жидкой фазы исследуемых проб схожа и характеризуется слабощелочными значениями рН, низким окислительно-восстановительным потенциалом и малой величиной минерализации. Результат исследования оксидного состава проб, отобранных с хвостохранилища в районе ВК № 2, ВК № 3, ВК № 4 УХХ обогатительной фабрики, оборотной воды, поступающей на обогащение алмазоносной руды обогатительной фабрики представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Оксидный состав проб взвесей оборотной воды

Наименование пробы	Содержание, % масс.								
	SiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	прочее
БК №2	53,9	26,1	7,58	5,69	2,7	1,6	1,2	0,6	0,63
БК №3	54,2	26,0	7,16	5,72	2,5	1,6	1,2	0,6	1,02
БК № 4	53,3	25,9	7,82	5,6	2,9	1,5	1,2	0,6	1,18
Оборотная вода ОФ	53,9	26,25	7,3	5,59	2,56	1,59	1,23	0,57	1,01

Как видно из таблицы 3.8, все представленные образцы имеют идентичный состав по всей поверхности «зеркала» хвостохранилища.

На рисунке 3.11 представлена рентгенограмма взвесей, находящихся в свободно взвешенном состоянии по всему объёму поверхности хвостохранилища, глубина отбора пробы составила 0,5 м от поверхности «зеркала хвостохранилища»², минеральный состав взвесей представлен в таблице 3.9.

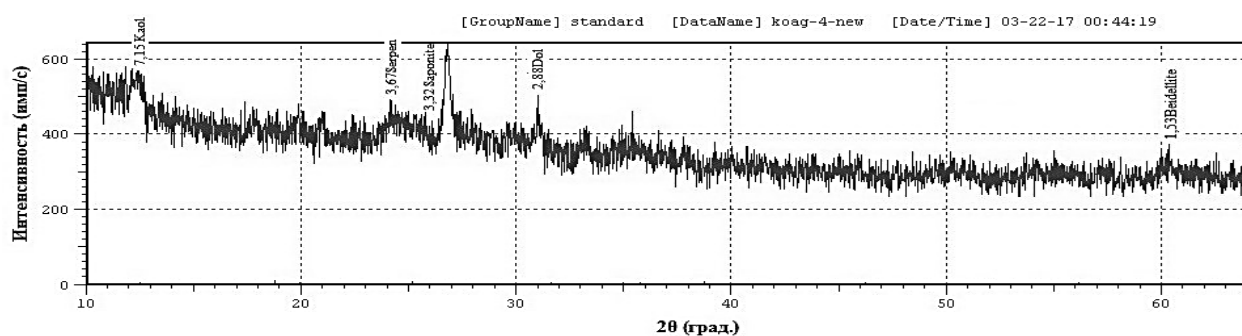


Рисунок 3.11 – Рентгенограмма взвесей оборотной воды

Таблица 3.9 – Минеральный состав взвесей с поверхности хвостохранилища

Минерал	2θ	d	I/I ₀	Структурная формула	Плотность, кг/м ³	Твёрдость по Моосу	Содержание, % масс.
Доломит	31	2,9	38	CaCO ₃ MgCO ₃	2940	4,0	19,9
Каолинит	11	7,9	11	Al ₄ [Si ₄ O ₁₀](OH) ₈	2600	1,5	21,8
Сапонит	26,8	3,32	100	(Ca _{0,5} Na) _{0,3} [Mg,(Fe ²⁺)] ₃ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂	2500	2,5	24,5
Сerpентин	24,8	3,58	21	Mg ₆ [Si ₄ O ₁₀](OH) ₈	2200	2,5	19,2
Бейделлит	60,48	1,53	11	(Na,Ca) _{0,3} Al ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ nH ₂ O	2150	1,0	14,6
Итого:							100

² «зеркало хвостохранилища» – поверхность жидкости

Из таблицы видно, что преимущественно из свободно взвешенного состояния вместе с водой на обогащение руды поступают глинистые минералы с поверхности хвостохранилища, что раз за разом удваивает их содержание и затрудняет процесс обогащения.

3.4.2 Гранулометрический анализ взвесей оборотной воды

Как было сказано в главе 1, песчаные частицы размером 0,5–0,05 мм и значительная часть крупно-пылевидных частиц размером 0,06–0,01 мм, составляющие около 50 % твердых частиц исходной пульпы, достаточно быстро осаждаются в непосредственной близости от места сброса пульпы в хвостохранилище с обогатительной фабрики, где они формируют относительно плотный осадок ($\rho_{\text{ск}} = 1,31 \text{ г/см}^3$) [101].

Тонкодисперсные частицы сапонита (составляющие также около 50 % твердой фазы пульпы, как и песок) выносятся в прудковую зону, где они осаждаются отдельно от песчаных частиц и формируют высокопористый гелеобразный осадок ($\rho_{\text{ск}} = 0,14 \text{ г/см}^3$), на что указывает повышенное содержание взвешенных веществ в воде и невозможность соблюдать нормы по их содержанию в ней (норма взвешенных частиц в воде для процесса обогащения должна составлять 0,5 г/л). Гранулометрический анализ взвесей, отобранных в разных точках хвостохранилища, представлен в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Гранулометрический состав взвесей оборотной воды

№	Наименование пробы	Средний размер частиц, м
1	ВК №2 УХХ обогатительной фабрики	0,00001081
2	ВК №3 УХХ обогатительной фабрики	0,00000738
3	ВК №4 УХХ обогатительной фабрики	0,00001567
4	Оборотная вода с обогатительной фабрики	0,00000881

Как видно из таблицы 3.10, в оборотной воде присутствуют преимущественно частицы размером, образующим высокодисперсный гетерогенный раствор, все представленные пробы имеют размер частиц 10^{-5} и 10^{-6} , это свидетельствует, что представленная оборотная вода, содержащая частицы сапонита такого размера без дополнительной реагентной очистки, не достигнет норм для обогащения алмазонасной руды (норма взвешенных веществ – 0,5 г/л).

Без реагентной очистки под действием сил тяжести срок осаждения частиц коллоидного типа составит 4 года [9].

3.5 Исследования пульпы по глубине чаши хвостохранилища

3.5.1 Химический состав сапонитовой пульпы

Изучение химического состава сапонитовой пульпы в зависимости от глубины отбора показал (таблица 3.11), что с увеличением глубины содержание химических элементов в пульпе остается неизменным и основными составляющими являются: $\text{SiO}_2 \approx 50\text{--}55\%$, $\text{MgO} \approx 20\text{--}25\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \approx 10\%$.

Таблица 3.11 – Оксидный состав пульпы в зависимости от глубины чаши

Образец	Содержание, % масс.									
	SiO_2	MgO	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	K_2O	Na_2O	TiO_2	MnO	прочее
Глубина 0,5 м	52,7	24,1	9,38	5,74	2,9	1,6	1,1	0,7	0,15	1,63
Глубина 1 м	53,5	24,9	8,69	5,03	3,2	1,4	1,2	0,7	0,15	1,23
Глубина 2 м	54,7	22,5	9,58	4,79	3,7	1,5	1,1	0,8	0,18	1,15
Глубина 3 м	53,7	25,3	7,96	4,85	3,7	1,3	1,2	0,6	0,16	1,23

3.5.2 Гранулометрический состав и плотность сапонитовой пульпы

На основании результатов измерения плотности пульпы, отобранной на разных глубинах хвостохранилища Ломоносовского ГОКа, и гранулометрического анализа, а также измерения содержания взвешенных веществ был построен схематический разрез чаши хвостохранилища с нанесением полученных данных (рисунок 3.12).

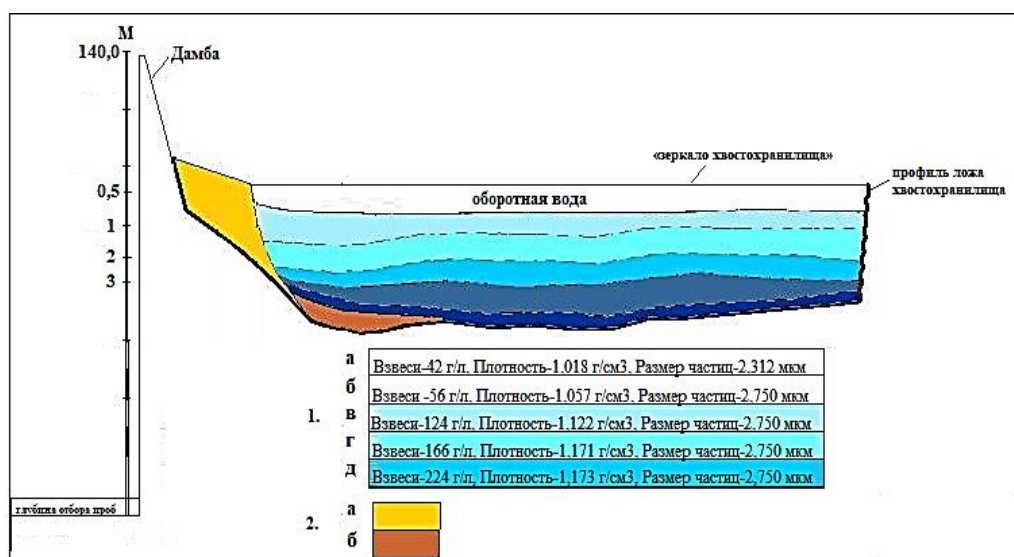


Рисунок 3.12– Схематический разрез чаши хвостохранилища:

- а–д – характер изменения содержания взвесей (г/л), плотности (г/см³), размера частиц (мкм) в зависимости от глубины;
- минеральные фазы: а. пески разномерные, б. текучие глины

Результаты исследований показали, что преобладающий размер частиц от всей массы вне зависимости от глубины составляет 2,750 мкм, максимальный размер частиц, оседающих на дно, представлен следующими размерами: глубина 0,5 м – 12,07 мкм; глубина 1 м – 41,47 мкм; глубина 2 м – 55,71 мкм; глубина 3 м – 71,46 мкм. Также с увеличением глубины повышается содержание взвешенных веществ и плотность пульпы, таким образом, пульпа чаши хвостохранилища представляет собой неосязаемую коллоидную глинистую суспензию.

3.6 Дренажная (карьерная) вода Ломоносовского ГОКа

Вода, скопившаяся в кимберлитовых трубках во время добычи алмазов (ливневые и талые воды) (Приложение Г), насосами подается на перекачивающую насосную станцию (ПНС-0) с промежуточным отстойником. Далее по трубопроводу – в 20-ти секционные отстойники, где под действием силы тяжести и под действием акустических волн [10] происходит процесс отстаивания взвесей, затем карьерная вода поступает в осадконакопители и далее на поверхность с ограждающими валами. Ограждающие валы создают естественные отстойники торфяно-болотистого типа, в которых происходит осаждение тонких частиц, в ограждающих валах проложены трубы, по которым карьерные и отвальные воды поступают на поля поверхностной фильтрации за счёт наклона рельефа и самотёчного движения жидкости через слой торфа в пройму р. Золотица, которая впадает в Белое море [37,38,108].

Карьерные и отвальные воды ЛГОКа в период снеготаяния, дождей и ливневых паводков, наряду с увеличением их объемов, характеризуются повышенным содержанием взвешенных веществ. Содержание взвесей в карьерных водах резко возрастает, существующие пруды-отстойники не справляются с осветлением вод, что приводит к сбросу некондиционных вод и загрязнению водного бассейна района.

Стоит отметить, что согласно Федеральному закону от 10.01.2002 № 7-ФЗ (ред. от 29.07.2018) «Об охране окружающей среды» сброс на рельеф сточных вод запрещен [66]. Содержание взвесей на выходе в реку Золотица, по данным лабораторных исследований, составляет 56 мг/дм³, когда согласно СанПиН 2.1.5.980-00 для рекреационного водопользования, а также в черте населенных мест содержание взвешенных веществ должно составлять 0,75 мг/дм³ [87].

В 2017 г. для определения эффективности метода очистки с использованием полей фильтрации и отстойников были взяты пробы карьерной воды, схема очистки карьерной воды и точек отбора проб представлен на рисунке 3.13: проба 1 – перекачивающая насосная станция из промежуточного отстойника карьерных вод; проба 2 – вода с фильтрационного

вала 1 в 152 км впадения в р. Золотица; проба 3 – поля поверхностной фильтрации р. Золотица (157 км от устья).



Рисунок 3.13 – Схема карьерного водоотлива Ломоносовского ГОКа

3.6.1 Химический состав взвесей дренажной (карьерной) воды

С целью выявления минерального и оксидного состава взвесей карьерной воды была взята проба с перекачивающей насосной станции ПНС-0, где содержание взвесей максимально и составляет 210 мг/дм^3 .

С помощью фильтра «белая лента» взвеси отфильтровали и исследовали рентгеновским дифрактометром XRD 7000, результаты рентгенодифракционного анализа представлены на рисунке 3.14 и таблице 3.11.

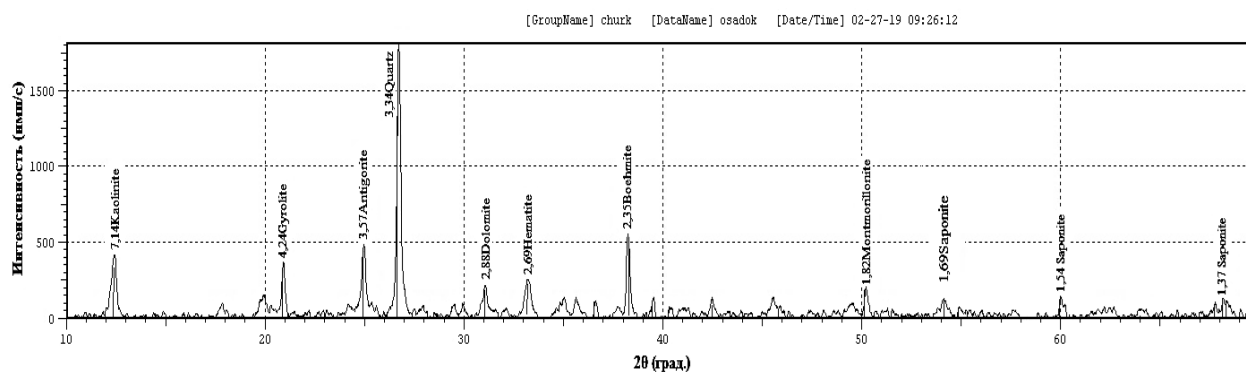


Рисунок 3.14 – Рентгеновская дифракционная картина взвесей карьерной воды Ломоносовского ГОКа

Таблица 3.11 – Минеральный состав взвесей карьерного водоотлива

Минерал	2θ	d	I/I ₀	Структурная формула	Плотность, кг/м ³	Твёрдость по Моосу	Содержание, % масс.
Гематит	33,2	2,7	14	α-Fe ₂ O ₃	4900	4,5	7,0
Бёмит	38,23	2,35	35	γ-AlO(OH)	3010	3,5	9,4
Доломит	31,05	2,88	12	CaCO ₃ · MgCO ₃	2940	4,0	6,6
α-кварц	26,71	3,34	100	α-SiO ₂	2710	7,0	28,4
Каолинит	12,4	7,14	21	Al ₄ [Si ₄ O ₁₀](OH) ₈	2600	1,5	8,4
Антигорит	24,95	3,57	25	Mg ₆ [Si ₄ O ₁₀](OH) ₈	2520	3,5	8,8
Сапонит	54,11	1,69	8	(Ca _{0,5} Na) _{0,3} [Mg, (Fe ²⁺)] ₃ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂	2500	2,5	17,6
	60,02	1,54	10				
	68,19	1,37	10				
Гиролит	20,9	4,24	19	NaCa ₁₆ (Si ₂₃ Al)O ₆₀ (OH) ₈ · 14H ₂ O	2450	2,5	7,5
Монтмориллонит	50,20	1,82	14	(Na,Ca) _{0,33} (Al,Mg) ₂ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₂ · nH ₂ O	1800	1	6,3
Итого							100

Таким образом, практически 50 % взвесей карьерной воды представлены глинистыми минералами, которые не оседают, проходя через торфяную дамбу, и уносятся в р. Золотица. По результатам рентгенофлуорисцентного анализа был выявлен оксидный состав взвесей, находящихся в свободно взвешенном состоянии, взвеси отфильтровали на фильтре «белая лента», результат представлен в таблице 3.12.

Таблица 3.12 – Оксидный состав проб взвесей карьерной вод

Образец	Содержание, % масс.							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	CaO	TiO ₂	прочее
Взвеси карьерной воды (точка отбора ПНС-0)	50,4	21,0	14,9	4,45	4,04	2,5	1,7	1,06

Основополагающими оксидами являются SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, поэтому осаждение взвешенных веществ в карьерной воде на основе солей алюминия и железа выведет за норму ПДК содержание в воде ионов Al и Fe. Результаты исследований водной фазы представлены в таблице 3.14.

Таблица 3.14 – Химический состав карьерной воды, 2017 г.

Показатель	ПДК, мг/дм ³	Точка №1 Перекачивающая насосная станция (ПНС-0)	Точка №2 Фильтрующая дамба №1	Точка №3 Отбора ППФ выход с полей фильтрации в створ реки
Железо общее	0,3	7,4	6,15	1,08
Марганец	0,1	2,6	1,1	0,06
Медь	0,1	0,06	не обнаруж.	не обнаруж.
Алюминий	0,2	11,0	1,1	0,50
Свинец	0,03	0,11	0,062	не обнаруж.
Мутность	0,75	430,0	428,0	156,0
Цинк	1,0	2,3	0,92	не обнаруж.
Магний	50	170	97	14,1

По результатам исследованных проб отмечалось превышение ПДК по марганцу, свинцу, цинку. Однако повышенное содержание марганца, магния, цинка и свинца носит природный характер и не связано с деятельностью по освоению месторождения. Концентрация алюминия перед подачей в отстойники – 11,0 мг/дм³, тогда как на фильтрационной дамбе – 1,1 мг/дм³ и перед сбросом в реку – 0,50 мг/дм³, что свидетельствует об процессе выщелачивания. Повышенное содержание макроэлемента железа в карьерной воде также обусловлено процессом выветривания горных пород. Мутность воды на выходе в реку, как и говорилось ранее, обусловлена содержанием глинистых веществ, преимущественно глинистого минерала сапонита ($\approx 17,6$ % масс.), и неспособностью торфяной дамбы удерживать взвеси от уноса в реку.

3.6.2 Гранулометрический анализ взвесей карьерной воды

Выявленный гранулометрический состав взвесей отобранной пробы с перекачивающей насосной станции выявил глинистые частицы размером 1,26–6,75 мкм, составляющие 90 % всей массы взвешенных веществ, которые находятся в свободно взвешенном состоянии и уносятся потоком в речную систему региона добычи.

3.7 Выводы по главе 3

По результатам проведённых исследований минерального, химического, гранулометрического состава, электронной микроскопии образцов, установлено следующее:

1. Исследование минерального состава показало разнородность руд трубок Архангельской и им. Карпинского-1: они отличаются, хоть и находятся в относительной близости друг от друга. Трубка Архангельская представлена в основном минералами тяжёлой фракции, такими как гематит, псевдуртил и т.д. Таким образом, бесконтрольное ведение процедуры размола двух принципиально разных руд может привести к переизмельчению руды и получению мелкодисперсных частиц в сливе после классификаторов.

2. В ходе термогравиметрического анализа выяснилось, что преимущественно все превращения при термическом воздействии на руду начинаются при температуре 600 °С.

3. При химическом анализе установлено, что руды преимущественно имеют щелочной характер, смещённый в сторону щелочной среды и отличающийся наиболее высоким содержанием магния, алюминия, кремния, железа.

4. По результатам гранулометрического анализа оборотной воды, поступающей на хвостохранилище в виде пульпы, и воды после процесса отстаивания в чаше хвостохранилища, установлено, что в основном размер частиц находится в диапазоне 10^{-5} – 10^{-6} м. Таким образом, размер частичек образуют в основном коллоидный раствор, который осаждается только с применением реагентов.

5. Стоки карьерной воды, содержащие повышенное количество макроэлементов в виде Al и Fe и взвешенных веществ (мутность), превышают ПДК, необходимо осветлять и использовать в процессе обогащения.

ГЛАВА 4 ПЕРЕРАБОТКА ЩЕЛОЧНОГО АЛЮМОСИЛИКАТНОГО СЫРЬЯ С ПОЛУЧЕНИЕМ РЕАГЕНТА ДЛЯ ПРОЦЕССА СГУЩЕНИЯ САПОНИТОВОЙ ПУЛЬПЫ

Объектом исследования для синтеза минерального осадителя с заданными физико-химическими свойствами были выбраны:

1. Карбонатное сырье Пикалёвского месторождения известняков с содержанием основного вещества в диапазоне от 50 до 55 %;
2. Белитовый шлам Пикалёвского глиноземного завода, отобранного на шламоотвале алюминиевого производства с преимущественно 60 % кальциевой составляющей.
3. Глиносодержащий материал с карьера добычи известняков Пикалёвского месторождения с глинистой составляющей 25 %.

4.1 Расчёт скорости осаждения взвешенных частиц сапонита в сливе после классификаторов без использования реагентов

В главе 3 описаны результаты исследования гранулометрического состава сливов с классификаторов после процесса обогащения сапонитовой руды. Рассчитаем скорость осаждения глинистых частиц сапонита (в сухом состоянии) без учёта разбавления и реагентной обработки с поправкой на форму частиц; для глинистых частиц такой формой является пластинчатая форма и $k=0,32$ [79].

1. Скорость осаждения слива КСН при максимальном значении размера частиц по формуле Стокса (4.1) [79]:

$$w_{oc} = \frac{d^2(\rho - \rho_c)g}{18\mu_c} = \frac{(2,291 \cdot 10^{-4})^2 \cdot (2200 - 1306) \cdot 9,8}{18 \cdot 0,058} = 4,4 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}, \quad (4.1)$$

где d – диаметр наибольшей частицы, подлежащей осаждению, м: 229,075 мкм;

ρ и ρ_c – соответственно, плотность частицы и среды, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

μ_c – вязкость пульпы при 20 °С, Па·с.

С учётом коэффициента $w_{oc}=1,42 \cdot 10^{-4}$ м/с.

2. Реальная скорость осаждения рассчитывается по формуле (4.2):

$$w'_{oc} = 0,5w_{oc} = 7,10 \cdot 10^{-5} \text{ м/с} \quad (4.2)$$

3. Проверка значения критерия Re (формула 4.3):

$$Re = \frac{w_{oc} d \rho_c}{\mu_c} = \frac{7,10 \cdot 10^{-5} \cdot 2,291 \cdot 10^{-4} \cdot 1306}{0,058} = 0,00037 \quad (4.3)$$

Для более полной визуализации изменения скорости осаждения глинистого минерала сапонита от размера частиц был построен график, представленный на рисунке 4.1.

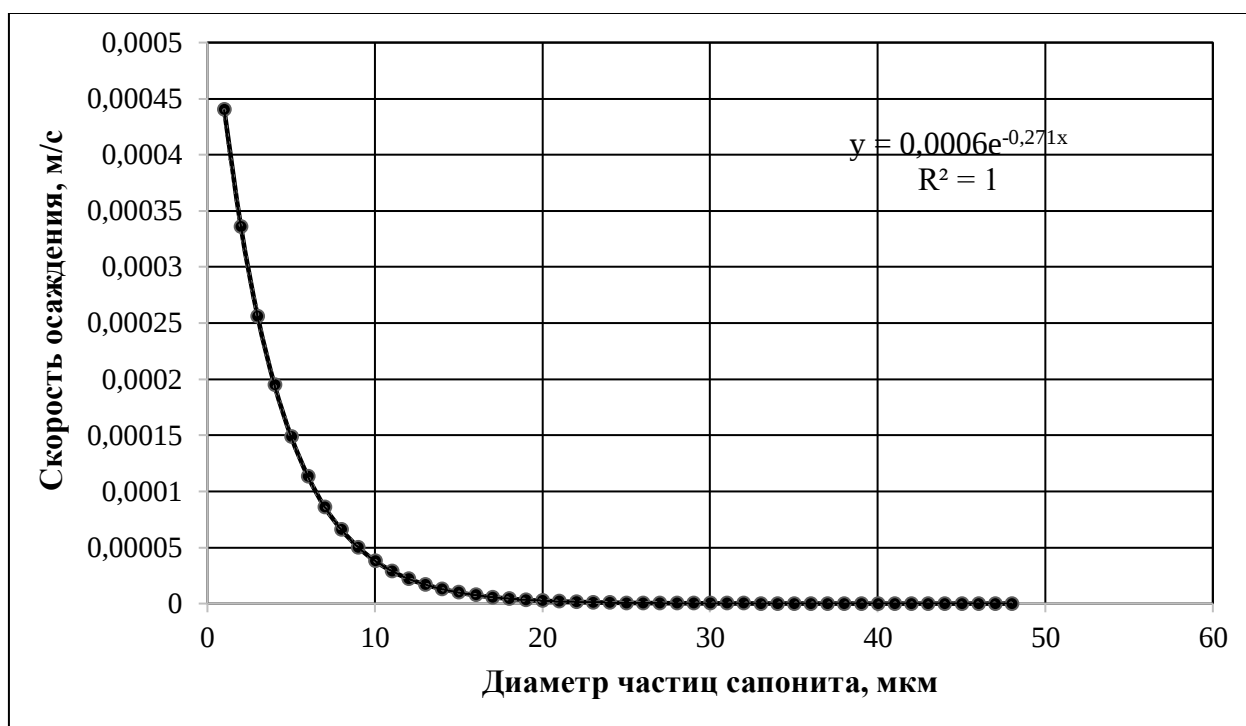


Рисунок 4.1– График зависимости скорости осаждения глинистого минерала сапонита от размера частиц

Скорость осаждения слива КСН при минимальном значении размера частиц 0,445 мкм будет равна $w_{ос} = 1,66 \cdot 10^{-9}$ м/с или 5,238 м/год.

Таким образом, на точке отбора пробы слив с классификаторов подтверждается длительная седиментация процесса осаждения сапонитовой пульпы, которая поступает затем на хвостохранилище, наблюдается характер коллоидных растворов, что обуславливает необходимость применения реагентного осаждения и сгущения пульпы за счёт ввода коагулянта или флокулянта с учётом минеральной составляющей взвесей.

4.2 Теоретические основы синтеза кальцийалюмосиликатного реагента из щелочного алюмосиликатного сырья

4.2.1 Общая характеристика сырья

Щелочное алюмосиликатное сырьё – это нефелинсодержащее сырьё (другое название – фальшпатоиды), основными минералами являются полевой шпат, нефелин, цветные минералы [33,78,53]. Комплексная переработка щелочного алюмосиликатного сырья заключается в производстве глинозема, цемента, кальцинированной соды, поташа. На рисунке 4.2 представлена схема безотходной переработки нефелина и процесс спекания известняков и глиносодержащего материала с целью получения трехкальциевого силиката, на рисунке отмечены стадии, на которых был произведён отбор проб для проведения синтеза

кальцийалюмосиликатного реагента и кальциевого уплотнителя для сгущения сапонитовой пульпы и осветления оборотной воды.

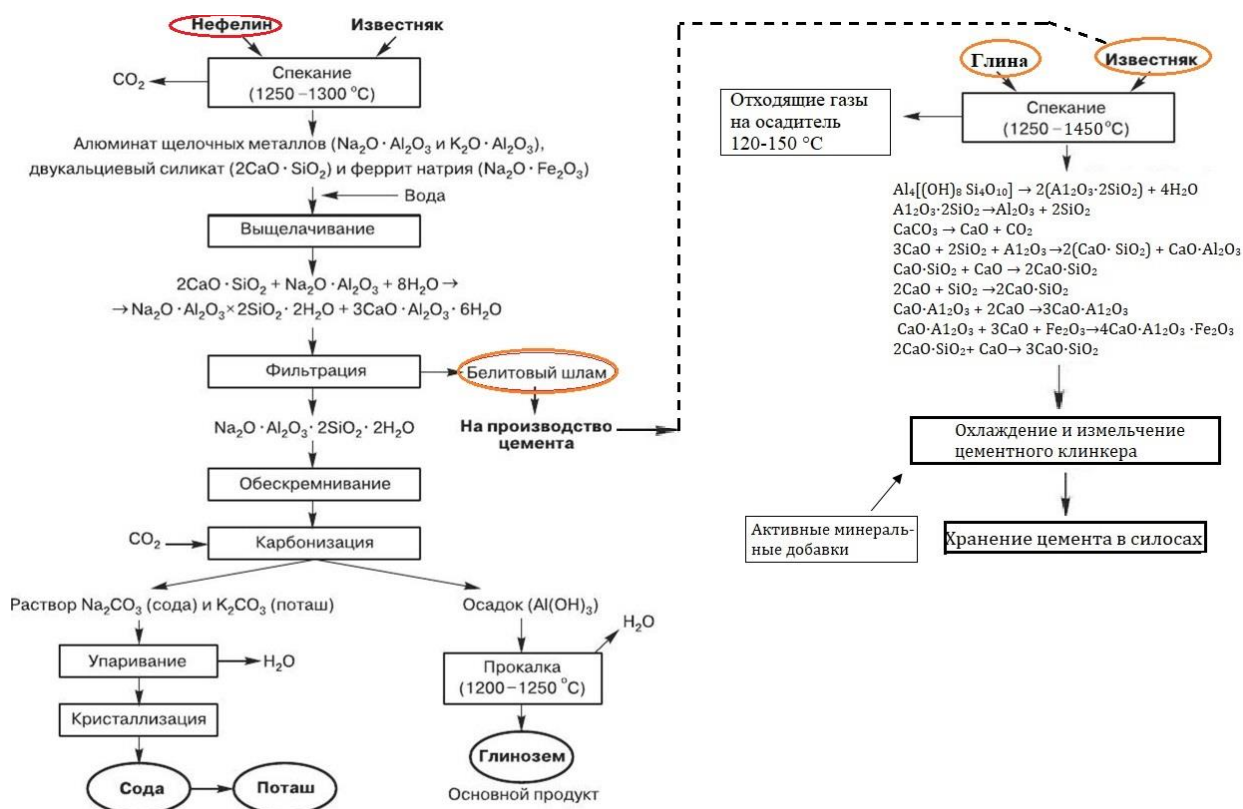


Рисунок 4.2 – Схема переработки апатит-нефелинового концентрата и производство цемента

В качестве сырьевой базы для синтеза кальцийалюмосиликатного реагента и уплотнителя выступил Пикалёвский глинозёмный комбинат, так как на предприятии созданы все условия для промышленного выпуска реагента и уплотнителя, которое имеет в своём составе месторождение известняка, так же за счёт близкого расположения к месторождению алмазов стоимость логистики на транспортировку реагента и белитового шлама будет на порядок ниже.

4.2.2 Химический состав кальцийсодержащего сырья для синтеза реагента

Для получения щелочно-активного реагента был взят известняк Пикалёвского месторождения, который обладает средней плотностью $2,71 \text{ г/см}^3$, водопоглощением $\approx 0,31\%$, твёрдостью по шкале Мооса 3. Известняки в основном состоят из кальцита, в меньшей степени – арагонита, органических веществ и доломита. В качестве примесей содержится глинистый материал. Химический состав известняка, использованного в синтезе реагента, представлен в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Химический состав известняка

Содержание компонента	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Прочее
% масс.	53,30	2,01	0,56	0,41	43,72

Термическое разложение известняка начинается при 600°C с образованием негашёной извести, оптимальная температура обжига 1050–1100°C, температура обжига выше 1300°C приводит к ухудшению качества извести [29].

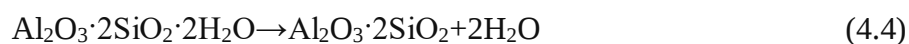
4.2.3 Химический состав глиносодержащего сырья для синтеза реагента

Глинистое алюмосиликатное сырьё для получения реагента с заданными физико-химическими свойствами имеет в основном своём составе глинистый минерал каолинит (Al₈[Si₄O₁₀](OH)₈). Содержание глины в шихте для получения реагента должно варьироваться в диапазоне от 20 до 25 %. Химический состав глиносодержащего сырья Пикалёвского месторождения известняков представлен в таблице 4.2 [33,78].

Таблица 4.2 – Химический состав глиносодержащего материала

Содержание компонента	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	Прочее
% масс.	2,8	62,60	5,3	14,0	1,60	19,0

Полуокислыми глинами считаются глины с содержанием Al₂O₃ до 28%, термическое разложение каолинита происходит при температурах 500–700 °C, распространённая схема разложения каолинита, предложенная В.И. Вернадским, описывается уравнением 4.4:



В температурных диапазонах 1150–1250 °C основные оксиды Al₂O₃ и SiO₂ взаимодействуют с образованием муллита и свободного кремнезема [39,40].

4.2.4 Химический состав уплотнителя сапонитового осадка

С целью уплотнения осадка после седиментации сапонитовой взвеси был исследован кальцийсодержащий шлам Пикалёвского глинозёмного предприятия, отобранный на шламоотвале предприятия, и нефелиновый концентрат, отобранный на АО «Апатит».

Уплотнитель, представленный белитовым шламом, в основном своём составе состоит из двухкальциевого силиката, он так же очищает воду, как и кальцийалюмосиликатный реагент, и совместное применение позволит увеличить выход воды из межпакетного пространства частицы сапонита и увеличит скорость осаждения [23,25,52,89,90].

Химический состав уплотнителя приведён в таблице 4.3 и рентгенограмме, показанной на рисунке 4.3 [20].

Плотность белитового шлама – $2,77 \text{ г/см}^3$, pH водной вытяжки равен 13,0–13,1.

Таблица 4.3 – Химический состав кальцийсодержащего уплотнителя – белитового шлама

Содержание компонента	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	Прочее
% масс.	58,77	31,74	2,47	2,62	1,15	3,25

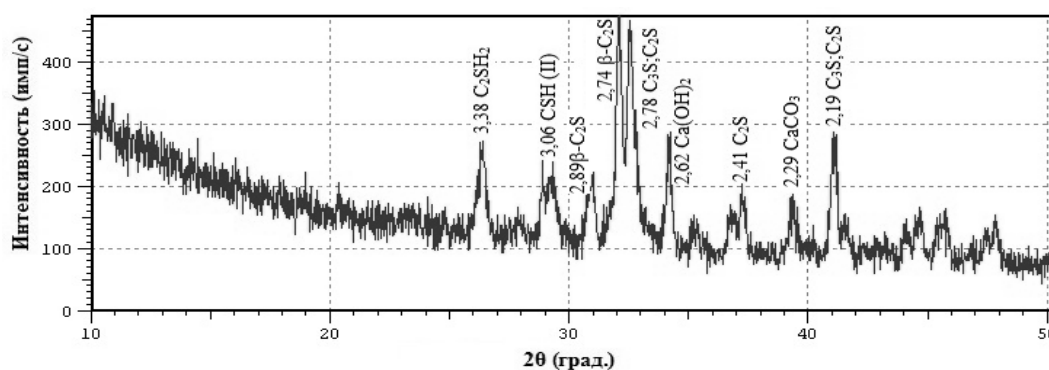


Рисунок 4.3 – Рентгеновский спектр кальцийсодержащего уплотнителя

На рентгенограмме использованного уплотнителя видны дифракционные отражения основных минералов: белита (β -C₂S) ($d=2,89$; $2,74$; $2,41 \text{ Å}$), гидросиликатов кальция ($d=3,38$; $3,05 \text{ Å}$), гидросульфалюмината кальция ($d=2,19 \text{ Å}$), гидроксида кальция ($d=2,62 \text{ Å}$), кальцита ($d=2,29 \text{ Å}$), непрореагировавшего алита ($d=2,79 \text{ Å}$). Основной состав представлен белитом (фазой двухкальциевого силиката), β -модификации с несовершенной кристаллизацией так же, как и α' -модификация, обладают высокой гидравлической активностью [7].

Химический состав нефелинового концентрата представлен в таблице 4.4. Плотность нефелинового концентрата – $2,48 \text{ г/см}^3$, pH водной вытяжки равен 7,1–7,3, твёрдость по Моосу – 5,5.

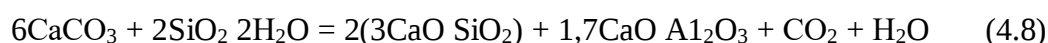
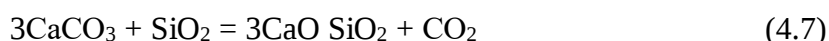
Таблица 4.4 – Оксидный состав кремнесодержащего уплотнителя – нефелинового концентрата

Содержание компонента	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	Прочее
% масс.	43,89	25,21	9,29	4,59	3,16	1,01	12,85

По результатам рентгенограммы минеральная составляющая нефелинового концентрата в основном представлена более 90 % масс. кристаллическим нефелином с примесью полевого шпата.

4.3 Синтез неорганического минерального реагента

В качестве сырья для синтеза реагента-осадителя, как отмечалось ранее, был взят кальцийсодержащий материал в виде известняка, известняк смешивали с кремнеземсодержащим минералом, в качестве которого использовалось глиносодержащее сырье (каолинит) из расчёта получения весового соотношения $\text{CaO}:\text{SiO}_2$ равное 2,6–3,0 и, $\text{CaO}:\text{Al}_2\text{O}_3$ равное 1,4–2,1 [31,88,95]. Обеспечение таких соотношений в шихте дает возможность получать в конечном продукте трехкальциевый силикат $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ и алюминат кальция состава $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ за счет протекания следующих реакций 4.5 – 4.8:



Установлено, что при таком соотношении соединений $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ и $1,7 \text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$, часть Al_2O_3 (0,1–0,3 %) находится в трехкальциевом силикате, что является причиной его повышенной активности см. таблицу 4.5 [75].

Таблица 4.5 – Сравнительная химическая активность силикатов

Параметры процесса	Значения химического процесса для силикатов кальция	
	Ca_2SiO_4	Ca_3SiO_5
Анион, находящийся в основе структуры	SiO_4^{4-}	SiO_4^{4-}
Энергия кристаллической решетки, кДж/моль	7652,5	14560,3
Свободная энергия Гиббса, кДж/моль	–113,1	–162,1
Равновесное значение pH растворов (химическая активность)		
$\text{Ca}_2\text{SiO}_4 + \text{H}_2\text{O} = 2\text{Ca}_{aq}^{2+} + \text{SiO}_{3aq}^{2-} + 2\text{OH}_{aq}^-$	11,82	
$\text{Ca}_3\text{SiO}_5 + 2\text{H}_2\text{O} = 3\text{Ca}_{aq}^{2+} + \text{SiO}_{3aq}^{2-} + 4\text{OH}_{aq}^-$		13,4
Полная гидратация (тепловыделение Дж/г)		
$\text{Ca}_2\text{SiO}_4 + \text{H}_2\text{O} = 2\text{Ca}_{aq}^{2+} + \text{SiO}_{3aq}^{2-} + 2\text{OH}_{aq}^-$	259,78	
$\text{Ca}_3\text{SiO}_5 + 2\text{H}_2\text{O} = 3\text{Ca}_{aq}^{2+} + \text{SiO}_{3aq}^{2-} + 4\text{OH}_{aq}^-$		502,7

Выбор весовых отношений обусловлен соотношением компонентов CaCO_3 и алюмосиликатной породы, используемых для синтеза трехкальциевого силиката. При отношении $\text{CaO}:\text{SiO}_2$ ниже, чем три, в исходной шихте остается часть несвязанного кремнезема алюмосиликатной породы и выход трехкальциевого силиката кальция, и будет отвечать за повы-

шение выхода двухкальциевого силиката, что приведет к снижению активности [75]. Химический состав и количественные соотношения неорганических соединений, используемые для синтеза коагулянта, представлены в таблице 4.6.

При дозировке выше, чем весовое отношение $\text{CaO}:\text{SiO}_2$, равное 3,1, в шихте останется значительная часть свободной извести. Что касается весового отношения $\text{CaO}:\text{Al}_2\text{O}_3$, то при дозировке CaO к Al_2O_3 ниже 2,6 выход алюмината кальция незначителен, а при весовом отношении $\text{CaO}:\text{Al}_2\text{O}_3$ выше, чем 2,1, в спёке останется свободная окись кальция [75]. После приготовления шихты ее подвергают термообработке согласно температурным полям и диаграмме $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ (рисунок 4.4) при от 1285 до 1300 °С не менее 1 ч. Процесс приготовления шихты и обжига реагента представлен на рисунке 4.5.

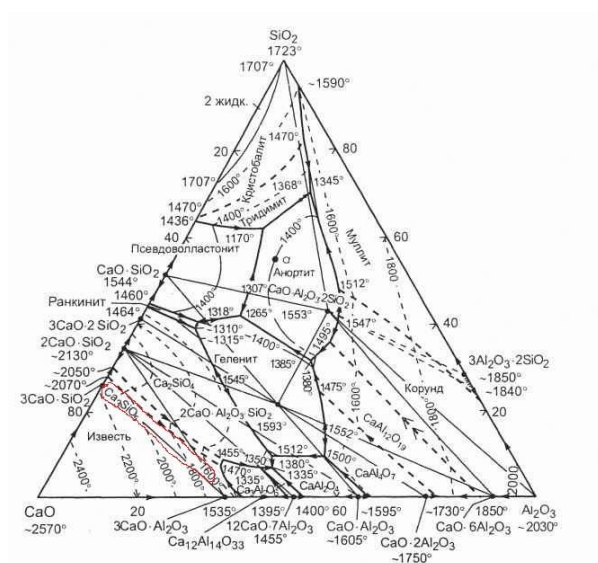


Рисунок 4.4 – Диаграмма состояния гетерогенной системы $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ с отмеченной областью получения кальцийалюмосиликатного минерального реагента



а.



б.



в.

Рисунок 4.5 – Процесс получения минерального осадителя: а) приготовление шихты; б) загрузка шихты в муфельную печь; в) обжиг шихты

Таблица 4.6 – Химический состав и количественные соотношения неорганических соединений, используемые для синтеза коагулянта

Неорганические соединения, используемые для получения коагулянта		Название минералов коагулянта	Структурная формула оксидных соединений	Количество, % масс.	Химический анализ, % масс.				Молярное отношение	
Кальцийсодержащий материал	Кремнезём содержащий материал				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	CaO/SiO ₂	CaO/Al ₂ O ₃
Известняк CaCO ₃ , CaO, Ca(OH) ₂ , CaSO ₂ nH ₂ O и т.д	Каолинит Al ₂ O ₃ 2SiO ₂ 2H ₂ O Al ₂ (Si ₂ O ₅) (OH) ₄ монтмориillonит CaO Al ₂ O ₃ 5SiO ₂ xH ₂ O Сапонит	Трехкальциевый силикат (алит), C ₃ S, Ca ₃ SiO ₅ , Ca ₃ O [SiO ₄]	3CaO SiO ₂	95,0	26,32			73,68	3	-
		Трехкальциевый алюминат, C ₃ A	3CaO Al ₂ O ₃	5,0		35,4	-	64,6		3
				100	26,32	1,75		71,83	3	3

Тип печи выбирается в зависимости от температурного режима, для получения реагента была использованная муфельная печь с режимом температур до 1600°C. В результате термообработки получен трехкальцевый силикат. Для придания большей гидравлической активности полученный материал размалывают до остатка на сите 0,08 мм 8–12%, остальная фракция составляет 88–92 % – прошедшее через сито с размером от 0,08 до 0,02 мм. При размоле материала ниже 8% остатка на сите 0,08 мм активность материала возрастает значительно, в случае остатка выше 12% резко снижается [75].

Состав полученного кальцийалюмосиликатного реагента проверен на рентгеновском дифрактометре XRD-7000 и представлен на рисунке 4.6.

По данным, полученным в ходе исследования, и по данным И.А. Макарова [56], в основной состав коагулянта входит трёхкальцевый силикат – $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, более подробно состав представлен в таблице 4.7.

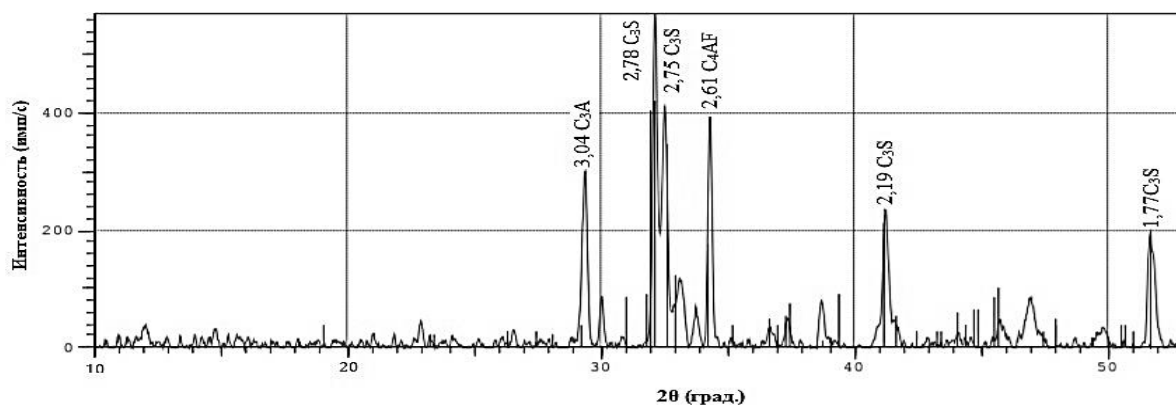


Рисунок 4.6 – Рентгенограмма минералов полученного коагулянта

Таблица 4.7 – Минеральный состав кальцийалюмосиликатного реагента

Минерал	2θ	d	I/I ₀	Структурная формула	Содержание, % масс.
Трёхкальцевый силикат	32,14	2,78	100	C3S	66,9
	32,50	2,75	72		
	39,36	3,04	53		
	51,67	1,77	43		
Трёхкальцевый алюминат	29,36	3,04	53	C3A	14,15
Четырёхкальцевый алюмоферрит	34,29	2,61	71	C4AF	18,9
Прочее					0,05

На рисунке 4.7 представлены результаты проверки коагуляционных свойств полученного кальцийалюмосиликатного реагента, как видно полученный образец осветляет воду. Мутность оборотной воды до обработки реагентом составляла 6320 мг/дм^3 , после 40 мин отстаивания мутность осветлённой части составила $278,38 \text{ мг/дм}^3$, таким образом, эффективность очистки оборотной воды – 95%.

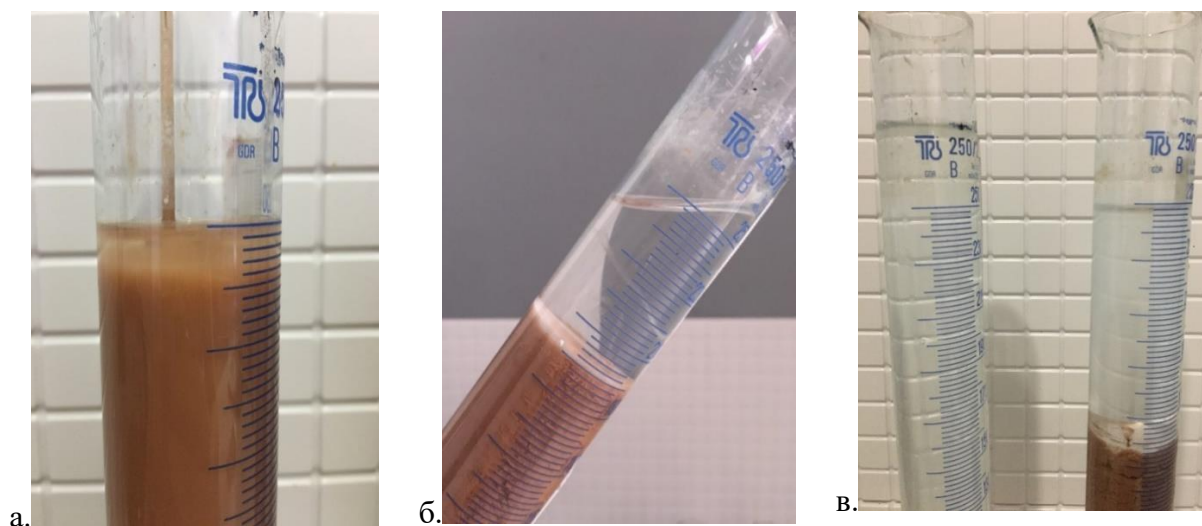


Рисунок 4.7 – Проверка коагуляционных свойств полученного рабочего образца кальцийалюмосиликатного реагента: а) осаждение АСК в течение 15 мин; б) осаждение АСК после 30 мин; в) сравнение чистой дистиллированной и осветленной после АСК воды после 45 мин отстаивания

4.3.1 Механизм действия кальцийалюмосиликатного реагента

В главе 2 говорилось, что в основном своём составе минерал сапонит имеет Ca и Mg форму, соответственно, и сапонитовая водная пульпа содержит преимущественно в катион Mg^{2+} . На рисунке 4.8 представлен электрохимический ряд напряжений металлов; если в основном традиционные коагулянты, применяемые в осветлении воды, состоят из соединений Al^{3+} и Fe^{2+} , то, выступая в роли электролитов, они менее активны, чем Ca^{2+} .

Li	Cs	K	Ba	Ca	Na	Mg	Al	Zn	Fe	Co	Ni	Sn	Pb	H ₂	Cu	Ag	Hg	Pt	Au
-3.04	-3.01	-2.92	-2.90	-2.87	-2.71	-2.36	-1.66	-0.76	-0.44	-0.28	-0.25	-0.14	-0.13	0	+0.34	+0.80	+0.85	-1.28	-1.50
Li ⁺	Cs ⁺	K ⁺	Ba ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	Zn ²⁺	Fe ²⁺	Co ²⁺	Ni ²⁺	Sn ²⁺	Pb ²⁺	2H ⁺	Cu ²⁺	Ag ⁺	Hg ⁺	Pt ²⁺	Au ³⁺

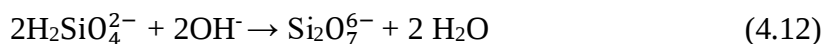
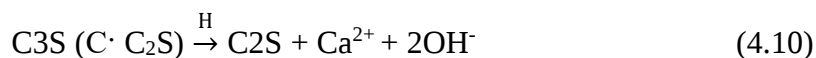
Рисунок 4.8 – Электрохимический ряд активности металлов

Кальцийалюмосиликатный реагент представляет собой смесь нескольких веществ (см. рисунок 4.6), гидролиз будет описываться следующими реакциями 4.9 – 4.20 [2,16,19]:

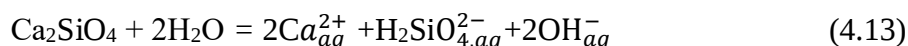
для основного вещества C3S:



Первоначальный гидролиз C3S может протекать в соответствии с реакциями, описанными ниже:



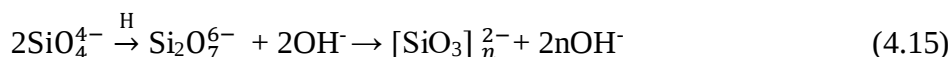
Сопутствующим компонентом является ортосиликат кальция, в структуре ортосиликата кальция (Ca_2SiO_4) содержится два иона кальция, поэтому при соединении его с водой первоначально он подвергается гидролизу [77-79]:



При контактировании силикатов кальция с водой первичным актом является его химическое взаимодействие с образованием в растворе ионов (чистая вода выталкивается на поверхность из межплоскостного расстояния глинистого минерала сапонита). Гидросиликат кальция имеет в структуре гидроксильные группы, способные к катионному и анионному ионообмену. Реакция замещения OH группы на катионы в щелочной среде складывается из последовательных стадий [2,16,19]:

- адсорбция $\text{Si}-\text{OH} + \text{Me}(\text{OH})^{(x-1)+} = \text{Si}-\text{OH} | \text{HO Me}^{(x-1)+}$;
- конденсация $\text{Si}-\text{O}-\text{Ca} + \text{An}^- = \text{Si}-\text{O}-\text{CaAn}$.

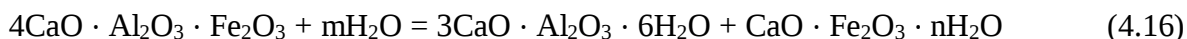
Реакции, которые происходят в конце индукционного периода:



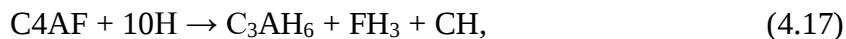
Продолжающееся увеличение $[\text{OH}^-]$ может быть результатом полимеризации силикатных частиц, которые образуются во время возобновленной химической активности C3S в конце периода индукции [2,16,19].

Первоначальный гидролиз считается, прежде всего, выщелачивание избытка оксида кальция из структуры C3S (уравнение 4.10). Конец периода химической индукции может быть определен как кристаллизацией СН ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, см. уравнение (4.14)), так и образованием игольчатого геля С-С-Н (гидросиликат кальция) из C2S. Основной реакцией, происходящей при росте игольчатого С-С-Н, может быть полимеризация моносиликатных ионов в C3S с целью дисилицирования (уравнение (4.15)). Кристаллизации двух продуктов явно взаимозависимы, возможно, что рост СН удаляет кальций не только из раствора, но и из C2S, тем самым способствуя полимеризации кремнезема.

Вторым по значимости веществом в реагенте является C_4AF , при добавлении в водную среду протекает реакция, и образуется гидроферрит кальция [2,16,19]:

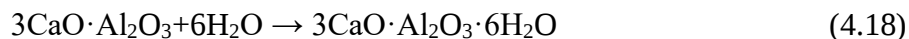


Гидролиз С4АF может быть записана также как:

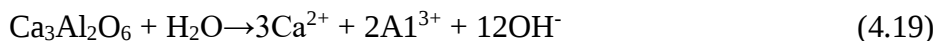


где FH3 обозначает гидратированный аморфный Fe-содержащий гель.

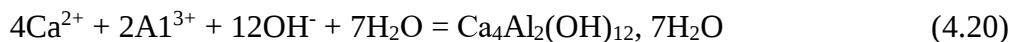
Для третьего вещества С3А, составляющего реагент, взаимодействие в водной среде можно описать уравнением с образованием гидроалюмината кальция [2,16,19]:



Когда С3А растворяется в воде, это приводит к ионам в растворе в соответствии с уравнением:



Выпадение гидроксила –AFm, который выпадает в осадок уравнение имеет вид:



После добавления кальцийалюмосиликатного реагента в сапонитсодержащую водную пульпу необходимо перемешивание в течение 5–7 минут, перемешивание можно осуществлять, например, аэрлифно или с помощью мешалок [4,91].

4.4 Осаждение взвесей оборотной воды.

Определение минимальной дозировки кальцийалюмосиликатного реагента

Для определения оптимальной дозировки кальцийалюмосиликатного реагента³ была отобрана оборотная вода с содержанием взвесей 3,56 г/л, проводилось измерение содержания взвешенных веществ в зависимости от времени.

Измерение показателя мутности воды производилось следующим образом: в стакан наливали 200 мл оборотной воды, в исследуемую пробу добавляли коагулянт АСК и в течение 35 минут в кювету с толщиной поглощающего свет слоя 50 мм вносили пробу воды для измерения оптической плотности (рисунок 4.9). Окончательный результат определения выражается в мг/дм³ по каолину, результаты представлены в таблице 4.8.

³ согласно ГОСТ Р 51642-2000. Коагулянты для хозяйственно-питьевого водоснабжения. общие требования и метод определения эффективности

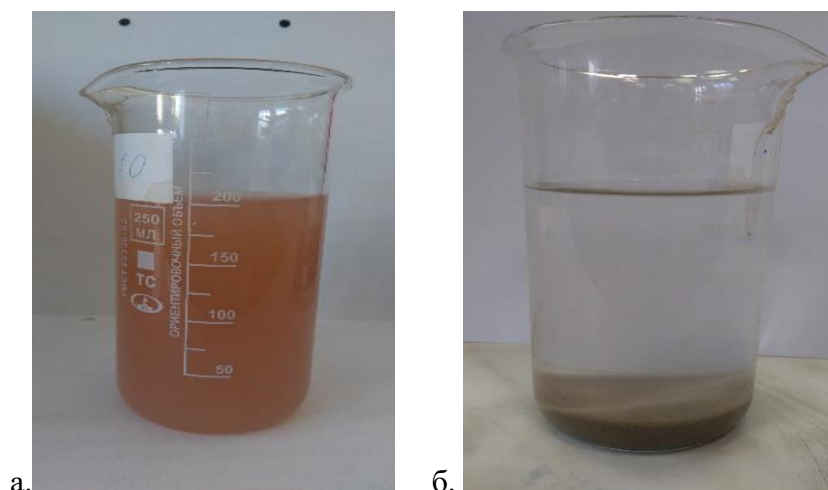


Рисунок 4.9 – Фото опыта по определению минимальной дозировки кальцийалюмосиликатного реагента: а) исходная проба; б) проба после реагента АСК

Таблица 4.8 – Результаты содержания взвешенных веществ при разной дозировке кальцийалюмосиликатного реагента (АСК) в оборотную воду

Время, затрачиваемое на процесс седиментации, мин	Концентрация взвешенных веществ, мг/дм ³						
	1 г АСК	0,8 г АСК	0,5 г АСК	0,4 г АСК	0,3 г АСК	0,25 г АСК	0,2 г АСК
0	3560	3560	3560	3560	3560	3560	3560
3	587,6	749,2	871,3	1025,3	3387,6	3391,1	3554
5	64,7	126,9	243	336,2	3004	3254,6	3541,9
10	38,95	89,77	114,08	195,4	1632,9	3197,2	3532,6
15	29,82	75,53	78,37	78,6	241,3	3186,5	3486,7
20	27,85	60,75	65,08	62,2	183,3	3169,7	3473,9
25	25,81	50,42	44,96	55,4	124,6	3154,1	3464,2
30	24,15	46,3	39,79	45,28	105,7	3139,4	3453,7
35	15,9	29,027	37,29	39,3	88,8	3014,7	3422,6

По полученным данным был построен график зависимости концентрации взвешенных веществ от времени отстаивания сапонитовой пульпы, представленный на рисунке 4.10.

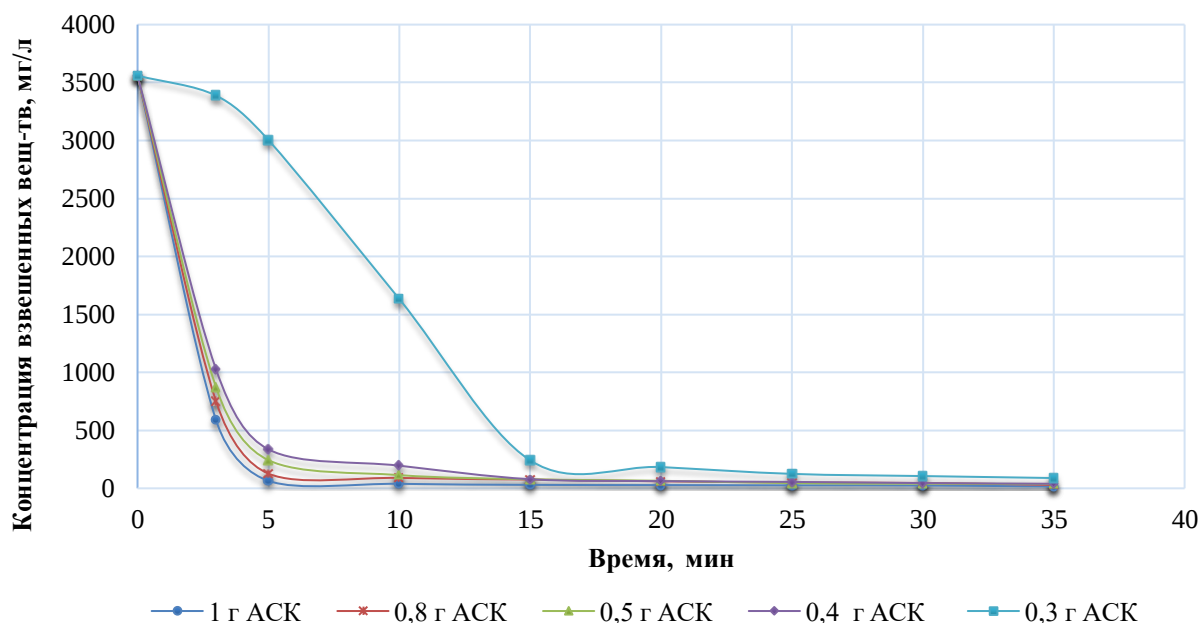


Рисунок 4.10 – Зависимость дозировки реагента АСК от начальной концентрации взвешенных веществ

По результатам исследований было выявлено, что 2 г кальцийалюмосиликатного реагента является минимальной дозировкой для осаждения взвесей в диапазоне 3–4 г/л по всему объёму обрабатываемой пульпы.

Время осветления до требуемых норм при таких условиях составляет 25 мин, pH осветлённой оборотной воды равен 11,3, влажность сгущённого осадка – 76 %.

4.5 Осаждение взвесей оборотной воды. Определение максимальной дозировки кальцийалюмосиликатного реагента

С целью выявления максимальной дозировки кальцийалюмосиликата и предела его коагулирующей способности был проведён ряд опытов по увеличению концентрации взвешенных веществ в пробе, для этого была взята проба пульпы с классификаторов спиральных наклонных с содержанием взвешенных веществ 3 440 г/л.

Опыт 1. К оборотной воде с содержанием взвешенных веществ 4 г/л было добавлено 10 мл пульпы с точки отбора «слив КСН». Конечная концентрация подготовленной пробы составила ≈ 7 г/л. К обрабатываемой пробе добавили 1 г (или 5 г/л) реагента АСК на 200 мл подготовленной пробы, время отстаивания оставалось прежним – 35 мин. В результате осаждения образовалось 170 мл чистой воды через 15 мин, pH осветлённой воды – 11,7, влажность осадка – 74,9 %, мутность оборотной воды – 19,9 мг/дм³ результаты осаждения представлены на рисунке 4.11.

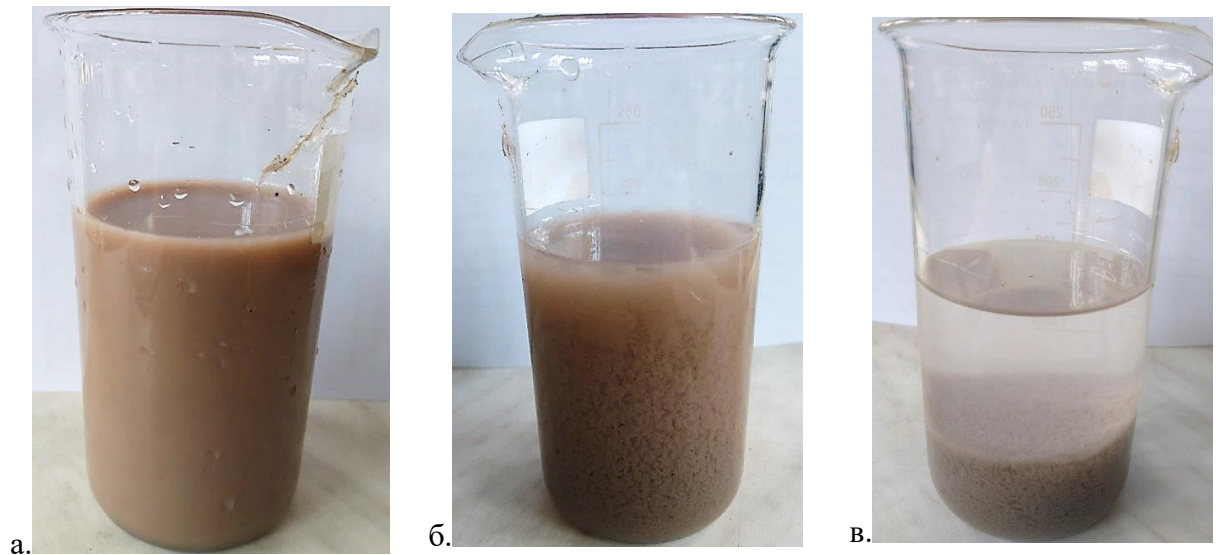


Рисунок 4.11 – Результаты опыта 1: а) исходная пульпа в начале опыта;
б) осветление в течение 1 мин; в) осветление пульпы в течение 15 мин

Опыт 2. К оборотной воде с содержанием взвешенных веществ 4 г/л добавлено 20 мл пульпы с точки отбора «слив КСН» с содержанием взвешенных веществ 3 440 г/л. Конечная концентрация пробы составила $\approx 18\text{--}20$ г/л. К обрабатываемой пробе добавили 1 г (или 5 г/л) реагента АСК на 200 мл обрабатываемой пробы, результаты опыта представлены на рисунке 4.12. В результате осаждения образовалось 100 мл чистой воды, pH осветлённой воды – 11,7; влажность осадка – 74,6 %; мутность осветлённой воды – $25,9 \text{ мг/дм}^3$.

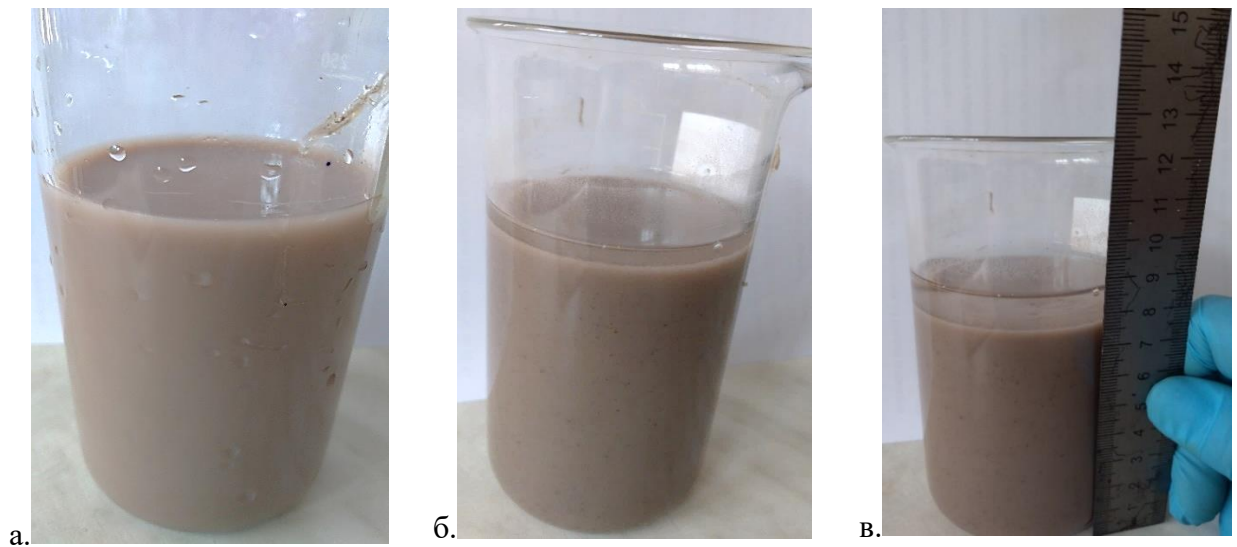


Рисунок 4.12 – Результаты опыта 2: а) исходная пульпа в начале опыта;
б) осветление в течение 15 мин; в) осветление пульпы в течение 35 мин

В результате осаждения образовалось 100 мл чистой воды, pH осветлённой воды – 11,8; влажность осадка – 74,6 %; мутность осветлённой воды – $24,6 \text{ мг/дм}^3$.

Опыт 3. К оборотной воде с содержанием взвешенных веществ 4 г/л добавлено 20 мл пульпы с точки отбора «слив КСН» с содержанием взвешенных веществ 3 440 г/л. Конечная концентрация пробы составила $\approx 18\text{--}20$ г/л. К обрабатываемой пробе добавили 2 г (или 10 г/л) реагента АСК на 200 мл обрабатываемой пробы.

В результате осаждения образовалось 100 мл чистой воды, рН осветлённой воды – 11,86; влажность осадка – 73,7 %; мутность осветлённой воды – $24,49 \text{ мг/дм}^3$.

Опыт 4. К оборотной воде с содержанием взвешенных веществ 4 г/л добавлено 20 мл пульпы с точки отбора «слив КСН» с содержанием взвешенных веществ 3 440 г/л. Конечная концентрация пробы составила $\approx 18\text{--}20$ г/л. К обрабатываемой пробе добавили 3 г (или 15 г/л) реагента АСК на 200 мл обрабатываемой пробы, результаты осаждения представлены на рисунке 4.13.

В результате осаждения образовалось 110 мл чистой воды, рН осветлённой воды – 11,87, влажность осадка – 73,6 %, мутность осветлённой воды – $24,31 \text{ мг/дм}^3$.

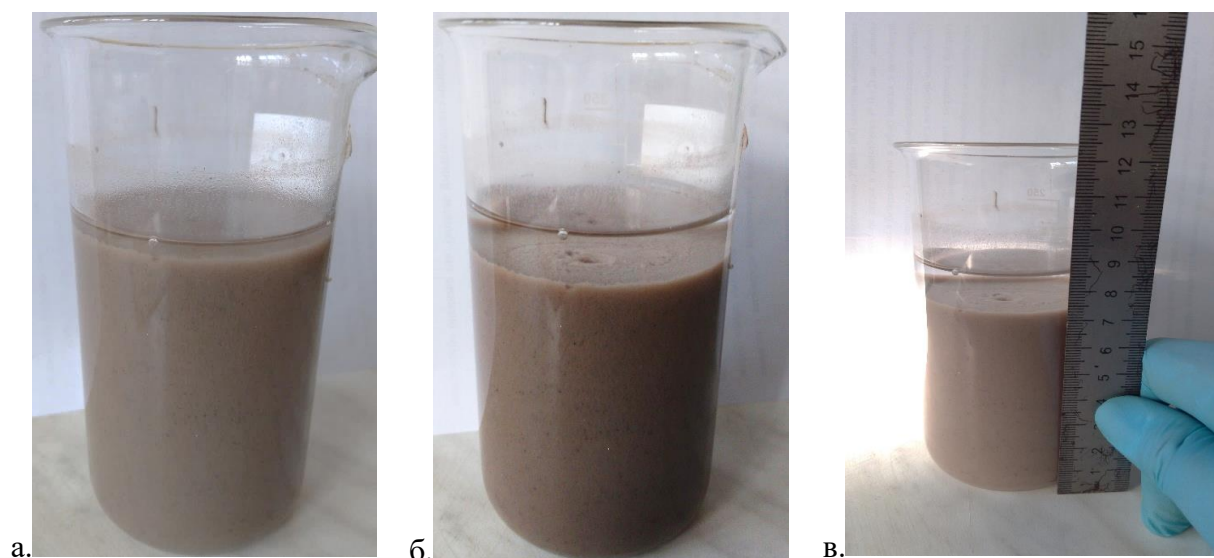


Рисунок 4.13 – Результаты опыта 4: а) осветление пульпы в течение 5 мин;

б) осветление в течение 15 мин; в) осветление пульпы в течение 35 мин

В результате опытов было выявлено, что максимальная дозировка реагента составляет 5 г/л, в остальных случаях увеличение дозировки приводит к перерасходу реагента из-за постоянного получения одного и того же количества осветлённой воды, мутность осветлённой воды остаётся постоянной и находится в диапазоне $20\text{--}25 \text{ мг/дм}^3$ в течение всего времени процесса сгущения во всех представленных опытах, и описывается графиком зависимости, представленном на рисунке 4.14.

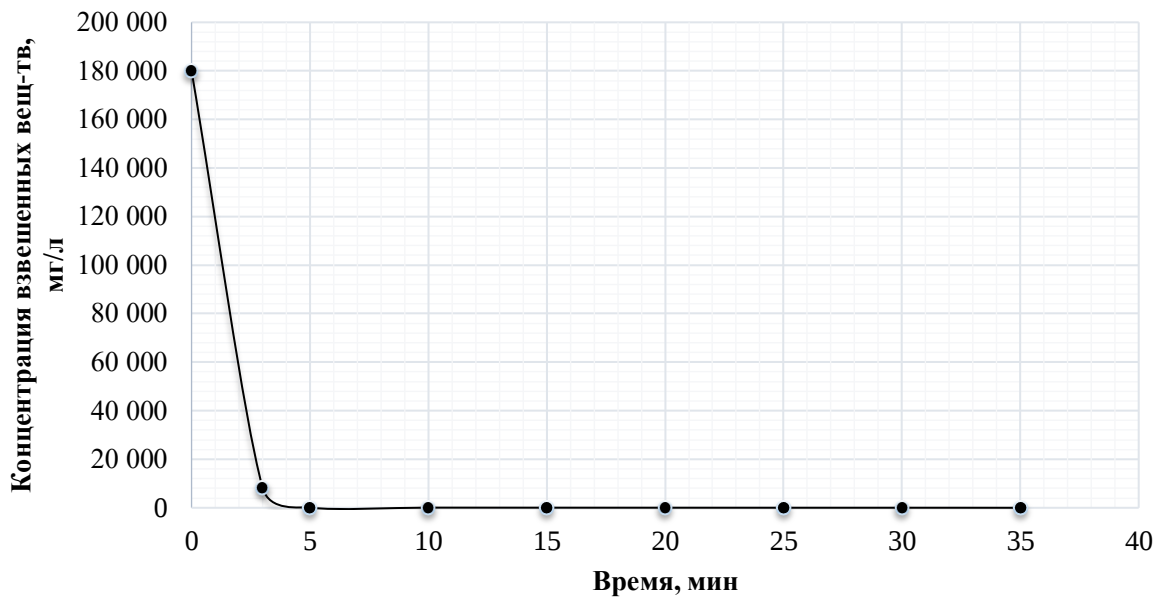


Рисунок 4.14 – График зависимости содержания взвешенных веществ от времени (отстаивания) сгущения пульпы

Плотность полученного осадка во всех представленных опытах по сравнению с плотностью оборотной воды ($1,002 \text{ г/см}^3$) после 1 часа отстаивания пульпы равна $\approx 1,018 \text{ г/см}^3$.

4.6 Выбор уплотнителя для устойчивости осадка после осветления оборотной воды кальцийалюмосиликатным реагентом

С целью уплотнения сгущённого продукта и увеличению водоотдачи гидрофильного глинистого минерала сапонита и вовлечения коллоидных скоагулированных взвесей, находящихся в зоне стеснённого осаждения (см. рисунок 2.1) и не перешедших в общую сгущённую часть, были проведены исследования по подбору эффективного уплотнителя [3,22,84]. Экспериментально установленная дозировка уплотнителей составила 20 г/л, влажность 5-20 %.

Опыт 1. В оборотную воду с содержанием взвесей 21 г/л было введено 20 г/л белитового шлама и нефелинового концентрата, время отстаивания 24 ч, без предварительной обработки кальцийалюмосиликатом чистого слоя воды не появилось.

Опыт 2. В предварительно обработанную кальцийалюмосиликатом оборотную воду с содержанием взвесей 21 г/л было введено 20 г/л белитового шлама и нефелинового концентрата, время отстаивания 24 ч, результаты измерений плотности сгущённой части, pH и количество осветлённой воды представлены в таблице 4.9 и на рисунке 4.15.

Таблица 4.9 – Результаты, полученные после уплотнения сгущённой части

№	Вид уплотнителя	Количество осветлённой воды, мл	Плотность спустя 1 ч, г/см ³	pH
1	Без уплотнителя	150	1,018	14,24
2	Белитовый шлам	170	1,036	13,54
3	Нефелиновый концентрат	120	1,029	14,34

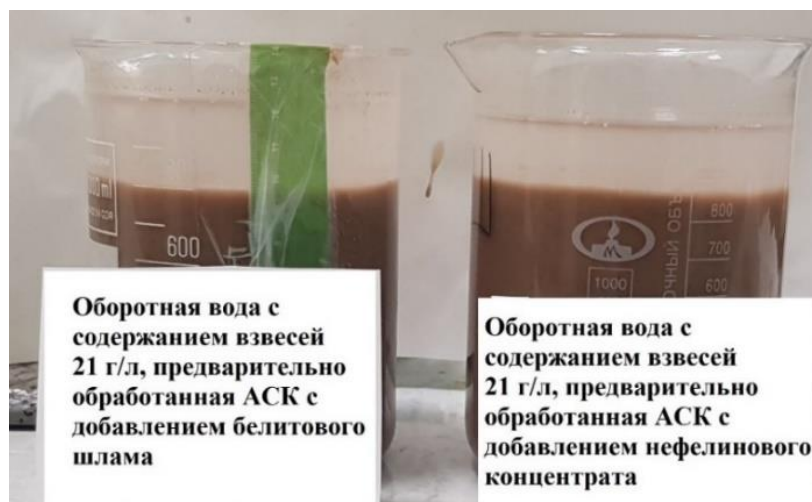


Рисунок 4.15 – Фото опыта по определению эффективного уплотнителя

На основании полученных результатов было выявлено, что белитовый шлам является лучшим уплотнителем по сравнению с нефелиновым концентратом и даёт дополнительное количество осветлённой воды (в 1,5 раза).

4.7 Определение оптимальной концентрации взвесей в пульпе для осаждения кальцийалюмосиликатным реагентом и уплотнения осадка

С целью определения оптимальных условий осветления и уплотнения сапонитовой пульпы была взята проба слива с классификаторов с содержанием взвешенных веществ 3 440 г/л и пульпы хвостохранилища с содержанием взвешенных веществ 120 г/л в количестве 100 мл, дозировка кальцийалюмосиликатного реагента составила 1 г и кальцийсодержащего уплотнителя в разном диапазоне, в ходе опыта производился замер уровня осветлённой воды и pH осветлённой части через каждые 24 ч, результаты опытов по осаждению пульп представлены в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Результаты осаждения сапонитовых пульп

№ , п/п	Содержание взвешенных ве- ществ, г/л		Уровень чистой воды, см		Результат измере- ния взвесей в освет- лённой воде, г/л		Измерение pH	
	слив КСН	пульпа хвос-ща	слив КСН	пульпа хвос-ща	слив КСН	пульпа хвос-ща	слив КСН	пульпа хвос-ща
Без ввода кальцийалюмосиликатного реагента и уплотнителя								
1	3 440	120	0	0	3 440	120	9,7	8,8
2	1720	60	0,1	0,8	-	53,25	9,7	8,8
3	1146	40	0,2	2,5	-	51,15	9,7	8,8
4	860	30	0,3	3,5	-	50,29	9,7	8,8
5	688	24	0,4	5,0	-	47,34	9,7	8,8
6	573	20	1,0	6,5	49,25	47,29	9,7	8,8
Введение 1 г кальцийалюмосиликатного реагента на 600 мл разбавленной пробы								
7	573	20	2,0	4,5	10,35	0,57	9,7	10,0
Введение 4 г кальцийсодержащего уплотнителя в 600 мл предварительно осветлённой пробы								
8	10,35	0,57	4,3	5,5	0,43	0,46	9,7	10,0
Введение 8 г кальцийсодержащего уплотнителя в 600 мл предварительно осветлённой пробы								
9	0,58	0,57	5,3	6,7	0,58	0,57	10,1	10,5
Введение 12 г кальцийсодержащего уплотнителя в 600 мл предварительно осветлённой пробы								
10	0,58	0,57	5,8	7,1	0,58	0,57	10,2	10,6
Введение 16 г кальцийсодержащего уплотнителя в 600 мл предварительно осветлённой пробы								
11	0,58	0,57	6,2	7,2	0,54	0,55	10,3	10,7
Введение 18 г кальцийсодержащего уплотнителя в 600 мл предварительно осветлённой пробы								
12	0,54	0,55	6,3	7,2	0,54	0,53	10,4	10,8

В ходе опытов было выявлено, что без применения реагентов чистого слоя воды нет, разбавление пульп приведёт к увеличению объёмов хвостохранилища, поэтому рекомендуется вводить кальцийалюмосиликатный реагент в количестве 1–2 г/л; ввод уплотнителя в

количестве 18–20 г в заранее осветлённую воду является более эффективным – отдача уплотнения сгущённого продукта наступает спустя 24 ч, ход проведения опыта представлен на рисунке 4.16.

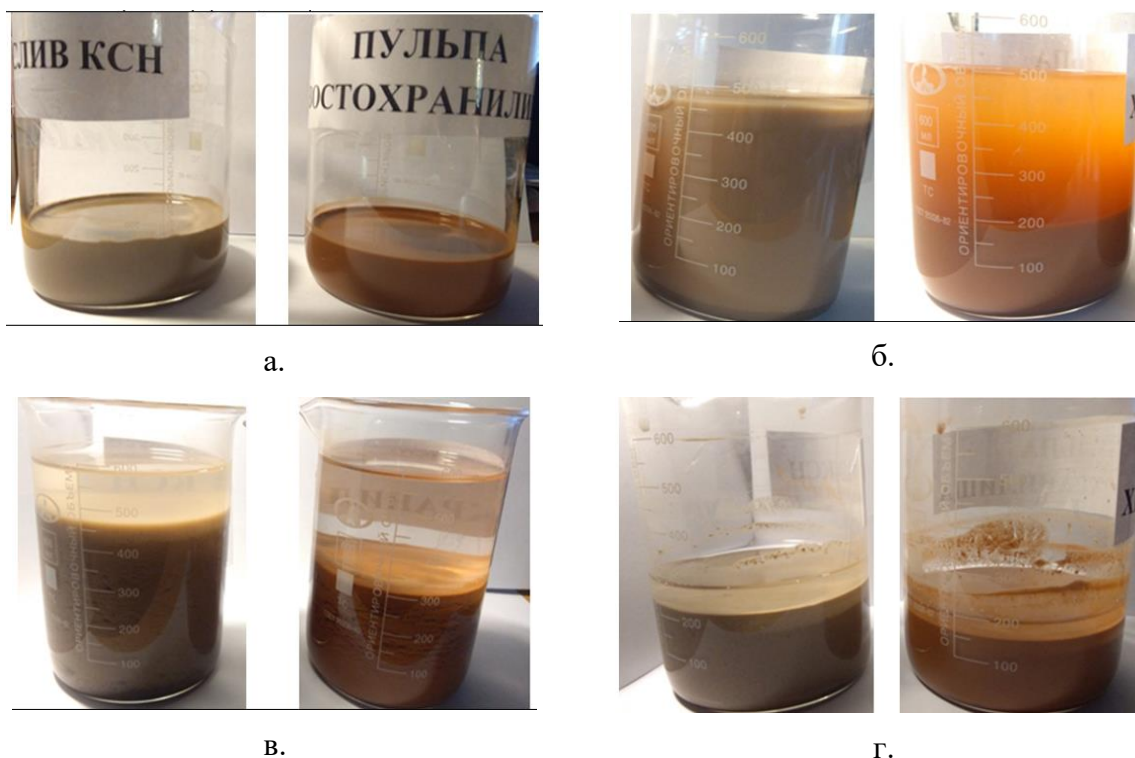


Рисунок 4.16 – Фото эксперимента по разбавлению и уплотнению сапонитовых пульп: а) пульпы без разбавления после отстаивания 24 ч; б) пульпы после разбавления 1:5 безреагентное отстаивание в течение 24 ч; в) пульпы после разбавления и осветления 1 г реагента АСК в течение 24 ч; г) уплотнение сгущённой части кальций-содержащим уплотнителем в течение 24 ч

4.8 Определение оптимальных дозировок реагентов для осаждения взвешенных веществ карьерного водоотлива

4.8.1 Осаждение сапонитовых взвесей карьерного водоотлива солями алюминия

В мерные цилиндры вместимостью 250 мл была отобрана проба карьерной воды с содержанием взвесей 430 мг/дм^3 , образующаяся в процессе добычи алмазов, с целью определения эффективности очистки от взвесей были проведены исследования с традиционно применяемым для осветления воды сернокислым алюминием (рисунок 4.17). Готовый раствор 7% (в перерасчёте Al_2O_3) сернокислого алюминия дозировался в количестве 1, 3 и 5 мл, через каждые 5 мин проводился замер уровня осветлённого слоя; результаты измерений представлены в виде кривых процесса сгущения на рисунке 4.18, также рассчитывалась оптимальная скорость осаждения, представленная в таблице 4.11, а затем осветленную воду

исследовали на определение железа, остаточного алюминия, свинца, цинка, кроме того, проводилось измерение рН и мутности воды.

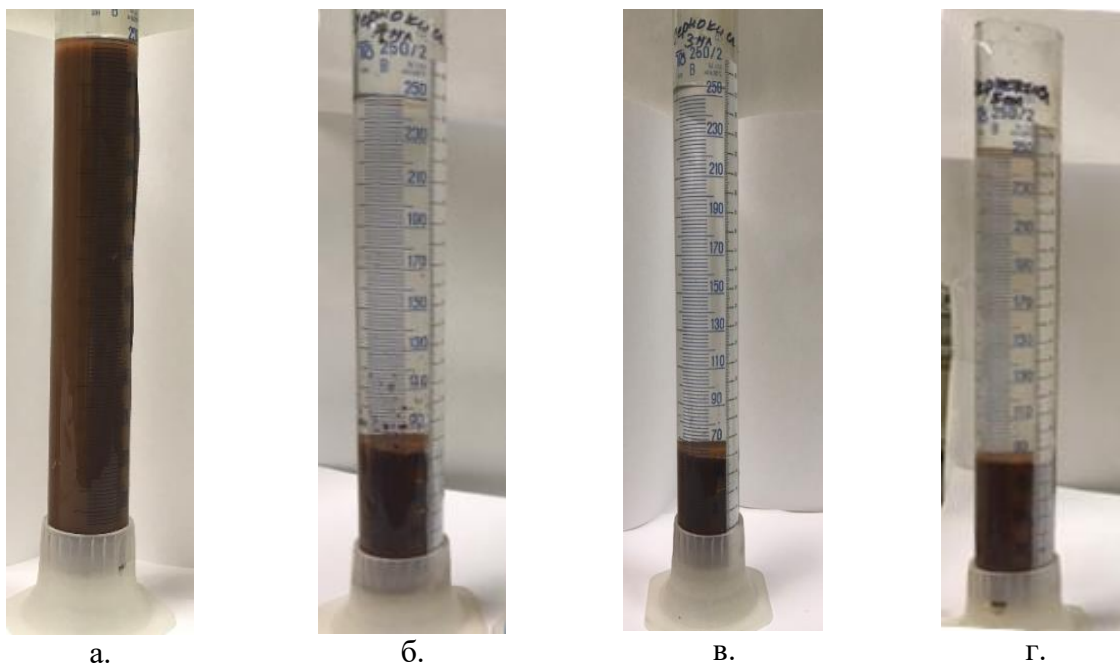


Рисунок 4.17 – Осаждение карьерной воды сернокислым алюминием:

- а) исходная проба;
- б) проба после осаждения 1 мл 7% $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$;
- в) проба после осаждения 3 мл 7% $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$;
- г) проба после осаждения 5 мл 7% $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

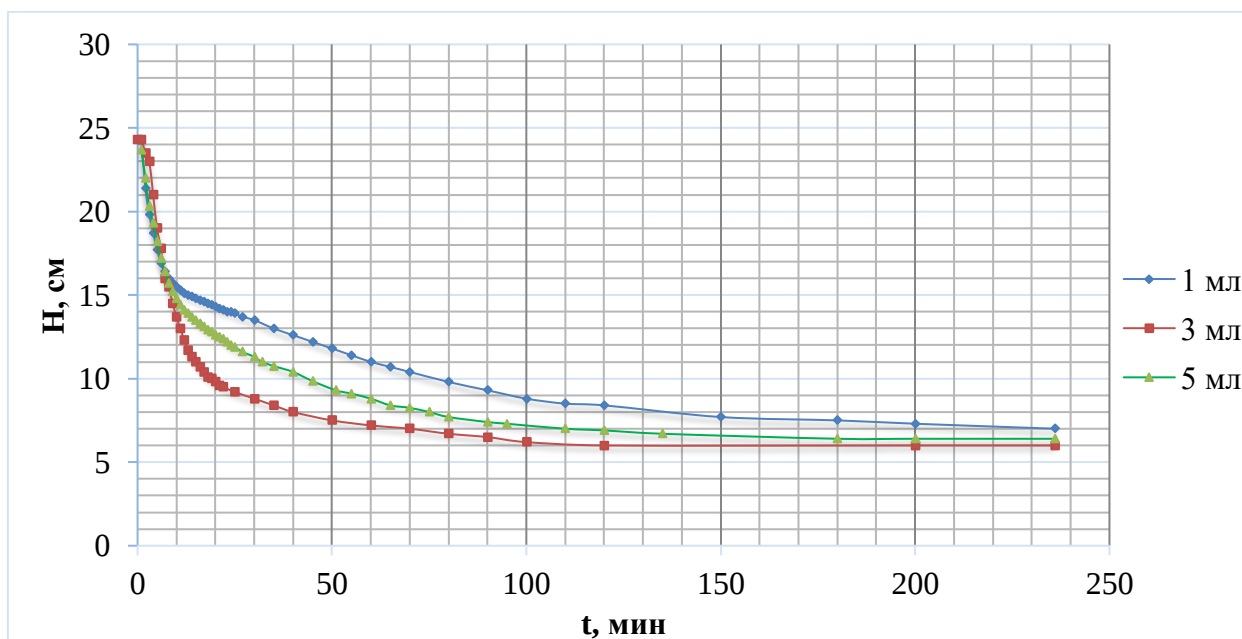


Рисунок 4.18 – Кривая процесса сгущения при добавлении 7% раствора $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

Таблица 4.11 – Результаты исследований осветлённой части и скорости осаждения

Определяемый показатель	Концентрация мг/дм ³			Норма ПДК по СанПиН 2.1.5.980-00 и ГН 2.1.5.1315-03
	Дозировка 7% р-ра Al ₂ (SO ₄) ₃ , мл			
	1	3	5	
Железо	0,75	0,81	0,98	0,3
Цинк	0,064	0,083	0,102	1,0
Алюминий	58,8	400	-	0,5
Свинец	0,0079	0,0055	0,025	0,03
рН	4,16	3,86	3,95	Пределы 6,5-8,5
Мутность	99,9	103	7,91	Не более 1,5 мг/л (по каолину)
w _{ос} , см/мин	1,1	1,11	0,838	-

В ходе серии опытов было выявлено, что лучшей дозировкой сернокислого алюминия является 12 мл раствора на 1 л обрабатываемой карьерной воды, но с учётом увеличения остаточного алюминия в воде применение его в осветлении карьерной воды нежелательно, разницы по скорости осаждения между дозировкой 4 мл/л и 12 мл/л нет, и увеличение дозировки сопровождается увеличением металлов в воде, следовательно, экономически эффективна дозировка 4 мг/л обрабатываемой пульпы.

Для исследований был приготовлен рекомендованный заводом-изготовителем рабочий 9% (в перерасчёте Al₂O₃) раствор оксихлорида алюминия под торговой маркой «Аква-Аурат» [86], в мерные цилиндры вместимостью 250 мл была отобрана проба карьерной воды с содержанием взвесей 430 мг/дм³, готовый раствор дозировался в количестве 1, 3 и 5 мл. Измерение скорости осаждения фиксировалось через каждые 5 мин. По истечении 4 ч осветлённый слой визуально не проявился, результаты представлены на рисунке 4.19, в связи продолжительным процессом коагуляции скорость осаждения рассчитана не была. После обработки 9% раствором оксихлорида алюминия воду исследовали на определение железа, остаточного алюминия, свинца, цинка; проводилось измерение рН и мутности воды, результаты представлены в таблице 4.12. Гидролиз оксихлорида протекает при рН водной среды выше 5,5, рН дренажной (карьерной) воды составляет 7,2, поэтому необходимо предварительно добавить натриевую щелочь [85]. Опыты с подщелачиванием и осветлением оксихлоридным коагулянтном были проведены на площадке Ломоносовского ГОКа и описаны ниже.

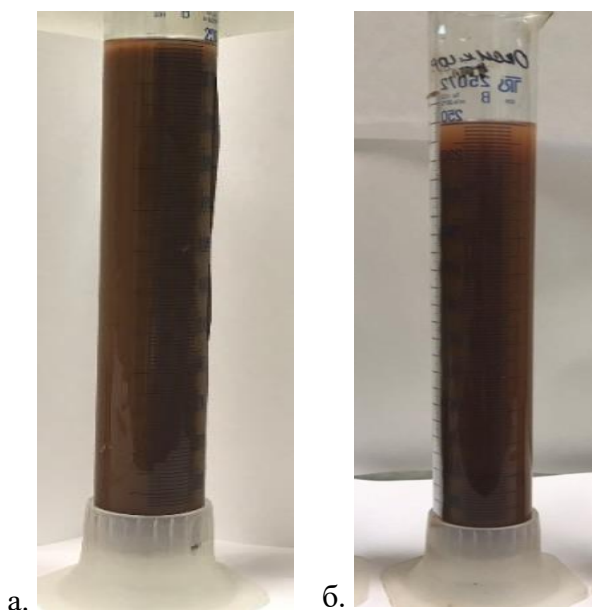


Рисунок 4.19 – Осаждение карьерной воды оксихлоридом алюминия:
а) исходная проба; б) проба с добавлением 1 мл ОХА по истечении 4 ч

Таблица 4.12 – Результаты исследований карьерной воды после обработки 9 % раствором оксихлоридного коагулянта «Аква-Аурат»

Определяемый показатель	Концентрация мг/дм ³			Норма ПДК по СанПиН 2.1.5.980-00 и ГН 2.1.5.1315-03
	Дозировка 9 % р-ра Al ₂ (OH) ₅ Cl, мл			
	1	3	5	
Железо	0,31	0,64	0,78	0,3
Цинк	0,0025	0,0031	0,0067	1,0
Алюминий	1,61	1,86	2,04	0,5
Свинец	0,021	0,037	0,051	0,03
рН	2,9	2,83	2,76	Пределы 6,5-8,5
Мутность	414	407	397	Не более 1,5 мг/л (по каолину)

4.8.2 Осаждение сапонитовых взвесей карьерного водоотлива флокулянтom

Для проведения исследований по осаждению взвесей в карьерной воде был выбран полиакриламидный анионный флокулянт Praestol. В мерные цилиндры вместимостью 250 мл была отобрана проба карьерной воды с содержанием взвесей 430 мг/дм³, флокулянт в виде раствора с концентрацией 0,45% дозировался в количестве 1, 3 и 5 мл [30,81,105]. Измерение скорости осаждения фиксировалось через каждые 5 мин, видимый осветлённый слой воды не визуализировался в течение 3 ч, в связи с продолжительным процессом флокуляции скорость осаждения не была рассчитана.

После обработки карьерной воды флокулянтom Praestol воду исследовали на определение железа, остаточного алюминия, свинца, цинка, проводилось измерение pH и мутности воды, результаты представлены в таблице 4.13.

С целью повышения эффективности работы флокулянта экспериментально было установлено, что перед подачей флокулянта в карьерную воду необходима предварительная обработка воды, а именно дозировка ингибитора полимеризации в виде хлорида железа, а для улучшения процесса гидролиза – добавление гидроксида кальция [25].

Опыты с введением ингибитора и гидроксида кальция перед флокулированием карьерной воды были проведены на площадке Ломоносовского ГОКа и описаны ниже.

Таблица 4.13 – Результаты исследований карьерной воды после обработки раствором флокулянта Praestol

Определяемый показатель	Концентрация мг/дм ³			Норма ПДК по СанПиН 2.1.5.980-00 и ГН 2.1.5.1315-03
	0,45% раствор флокулянта, мл			
	1	3	5	
Железо	0,190	0,201	0,226	0,3
Цинк	<0,001	<0,001	<0,001	1,0
Алюминий	0,48	0,52	0,63	0,5
Свинец	0,021	0,028	0,034	0,03
рН	7,24	7,26	7,89	Пределы 6,5-8,5
Мутность	417	402	386	Не более 1,5 мг/л (по каолину)

4.8.3 Осаждение сапонитовых взвесей карьерного водоотлива кальцийалюмосиликатным реагентом

В мерные цилиндры вместимостью 250 мл была отобрана карьерная вода с содержанием взвесей 430 мг/дм³, кальцийалюмосиликатный реагент дозировался в количестве 1, 3, 5 г, измерение скорости осаждения фиксировалось через каждые 5 мин, проводился замер уровня осветлённого слоя, результаты измерений представлены в виде кривых процесса сгущения на рисунке 4.20, также рассчитывалась оптимальная скорость осаждения, представленная в таблице 4.14, затем осветленную воду исследовали на определение железа, остаточного алюминия, свинца, цинка, проводилось измерение pH и мутности воды. Результаты опыта представлены на рисунке 4.21.

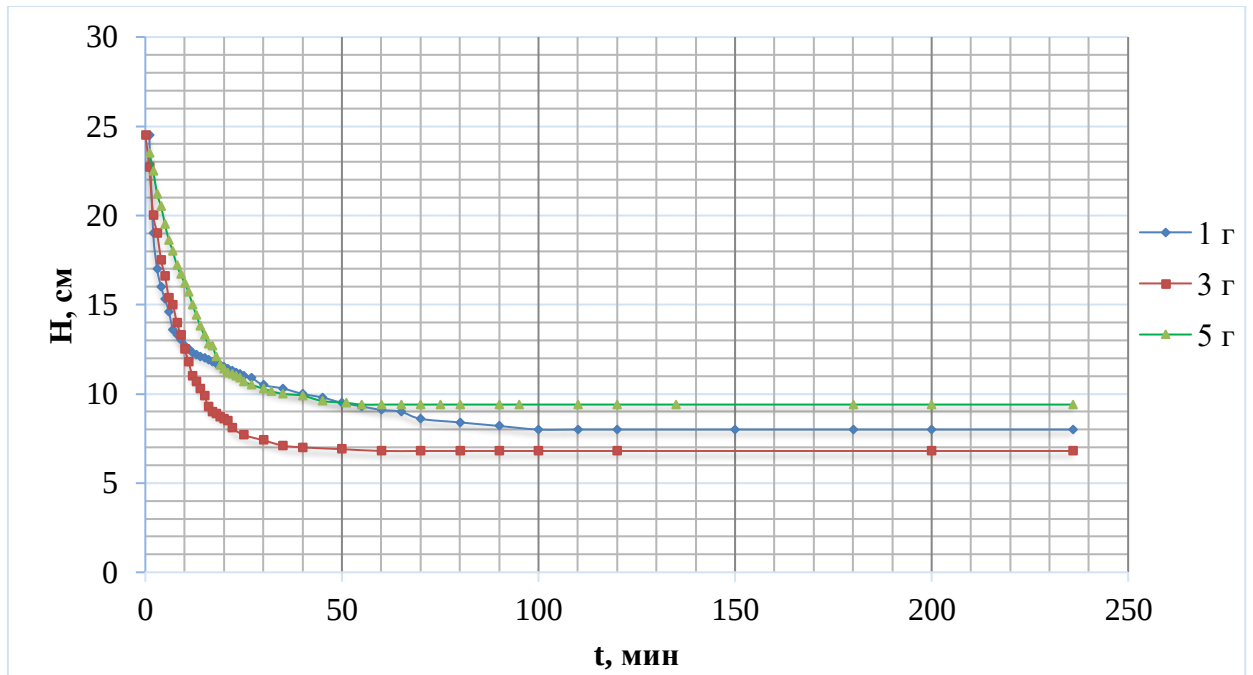


Рисунок 4.20– Кривая процесса сгущения
при добавлении 1, 3, 5 г кальцийалюмосиликатного реагента

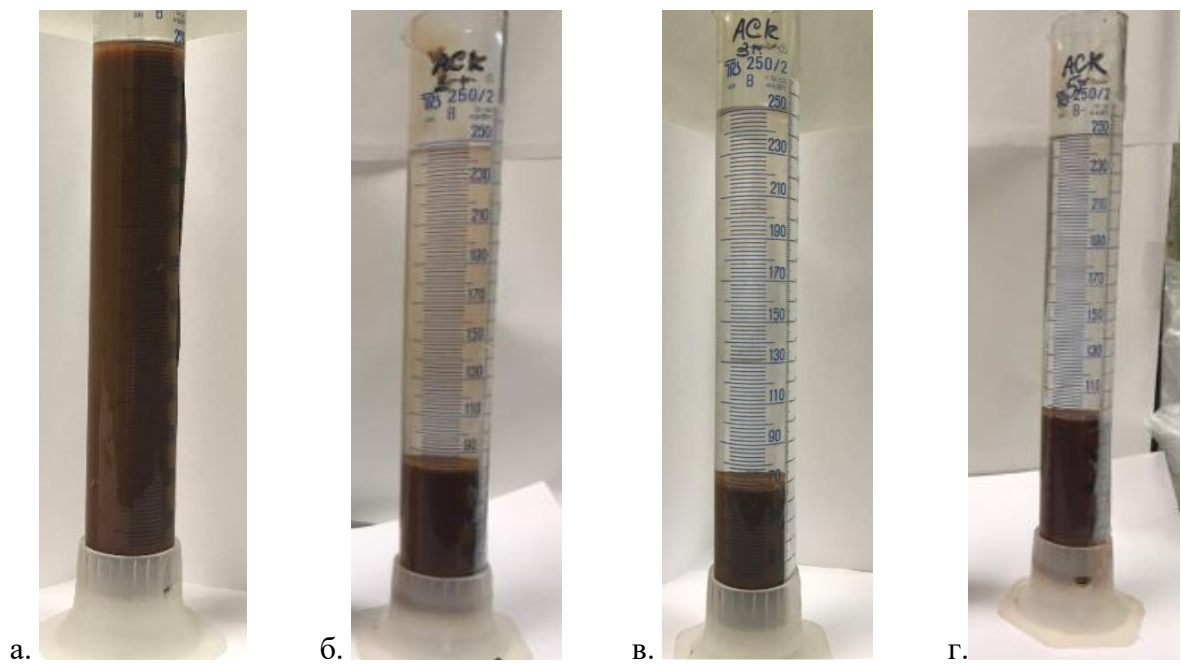


Рисунок 4.21 – Осаждение карьерной воды кальцийалюмосиликатным реагентом (АСК): а) исходная проба; б) проба после осаждения 1 г; в) проба после осаждения 3 г ; г) проба после осаждения 5 г

Таблица 4.14 – Результаты исследований осветлённой части и скорости осаждения после обработки карьерной воды реагентом АСК

Определяемый показатель	Концентрация мг/дм ³			Норма ПДК по СанПиН 2.1.5.980-00 и ГН 2.1.5.1315-03
	Дозировка АСК, г			
	1	3	5	
Железо	0,69	0,23	0,057	0,3
Цинк	0,0010	0,0018	<0,001	1,0
Алюминий	2,02	2,30	0,25	0,5
Свинец	0,0079	0,0055	0,0140	0,03
рН	11,07	11,83	11,7	Пределы 6,5-8,5
Мутность	109,92	25,08	0,81	Не более 1,5 мг/л (по каолину)
w _{ос} , см/мин	1,62	1,136	0,716	-

Рекомендованной дозировкой кальцийалюмосиликатного реагента является 4 г/л, также наблюдается тенденция к снижению тяжёлых металлов, содержащихся в карьерной воде (см. таблицу 3.14)

4.9 Научно-технологические исследования, проведённые на Ломоносовском ГОКе ПАО «Севералмаз»

4.9.1 Осаждение взвешенных веществ карьерного (дренажного) водоотлива Ломоносовского ГОКа с использованием реагентов

Содержание взвешенных веществ на момент проведения исследования составило 210–215 мг/л, точка отбора ПНС-0 дренажного водоотлива. Водородный показатель на момент отбора пробы дренажной (карьерной) воды составлял 7,8 (по нормам СанПиНа 2.1.5.980-00 не должен выходить за пределы 6,5–8,5) [85, 87].

Для исследований взято 4 вида реагентов, результаты опытов по осаждению представлены на рисунке 4.22:

- 7% раствор сернокислого алюминия (в перерасчёте на Al_2O_3);
- 9% раствор оксихлорида алюминия (в перерасчёте на Al_2O_3);
- полиакриламидные анионные флокулянты Rheomax, Praestol;
- синтезированный кальцийалюмосиликатный реагент, с содержанием $\approx 70\%$ активного вещества С3S.

Данные, полученные в ходе опытов по определению скорости осаждения, измерение рН после обработки реагентами, мутности воды представлены в таблице 4.15.

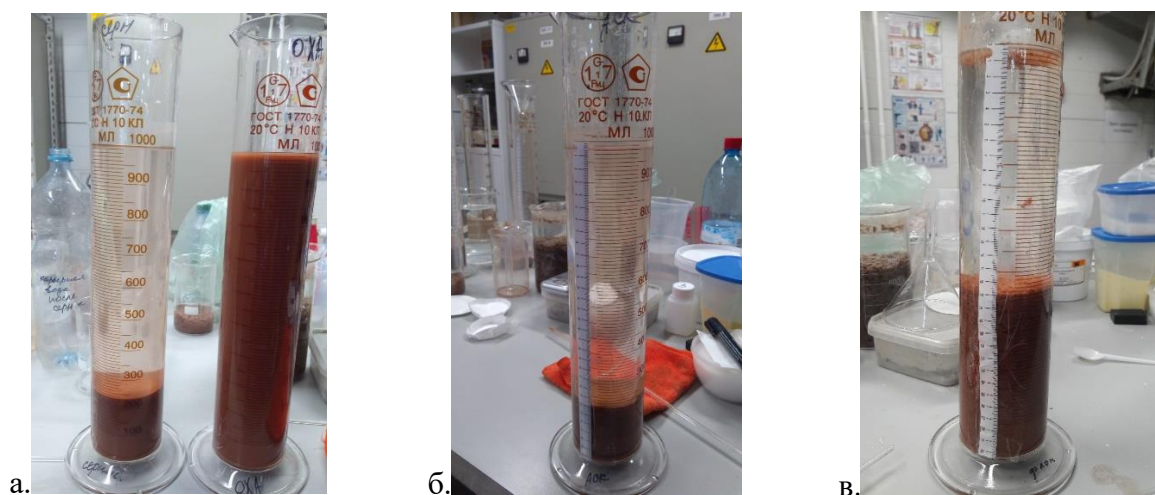


Рисунок 4.22 – Опыты по осаждению взвесей, выполненные на промышленной площадке Ломоносовского ГОКа: а) осаждение сапониновой взвеси 7% раствором сернокислого алюминия (1 цилиндр) и 9 % раствором оксихлорида алюминия без подщелачивания (2 цилиндр); б) осаждение сапониновой взвеси карьерного водоотлива реагентом АСК; в) осаждение сапониновой взвеси карьерного водоотлива флокулянтom Praestol.

Таблица 4.15 – Результаты опытов по обработке дренажной воды

Тип осадителя	Дозировка реагента на 1 л дренажной воды	Полученные значения w_{oc} , см/мин
1. Сернокислый алюминий 7% раствор	4 мл	0,72
2. Оксихлоридный коагулянт 9 % раствор с добавлением едкого натра (NaOH)	4 мл раствора + 1 г щёлочи (едкий натр)	1,05
3. Кальцийалюмосиликатный реагент	4 г	1,29
4. Флокулянт Praestol	Для проведения гидролиза и предотвращения полимеризации введено хлорное железо ($FeCl_3$) – 1 г, для быстрого гидролиза флокулянта при pH выше 11,0 введена щёлочь гидроокись кальция ($Ca(OH)_2$) – 4 г, для осаждения и образования флоккул введён флокулянт – 0,1 г.	2,62

Как видно из таблицы 4.15, для проведения процесса осаждения необходима предварительная подготовка водной среды, содержащей взвешенные вещества (частицы сапонины). Для коагулянта оксихлорида это добавление щёлочи (в нашем случае был взят едкий

натр NaOH) до pH равного 5,5, для флокулянтов – предварительное добавление в воду хлорида железа (FeCl_3) и гидроксида кальция (Ca(OH)_2) до pH, равного 10,0 [85].

Для коагулянтов сернокислого алюминия и кальцийалюмосиликатного реагента предварительная подготовка водной среды не требуется, их следует дозировать исходя из опытных расчетов количества взвешенных частиц в карьерной воде.

После процесса осаждения осветленная вода исследовалась на остаточное содержание алюминия в воде, на содержание общего железа в воде, а также на тяжелые металлы, такие как цинк и свинец, мутности воды, результаты представлены в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Результаты анализов очищенной дренажной воды реагентным способом

Определяемый показатель, мг/дм ³	7% р-р $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	9% р-р «Аква-Аурата» + NaOH	Кальцийалюмосиликатный реагент	Хлорид железа + Ca(OH)_2 + флокулянт Praestol	Норма ПДК по СанПиН 2.1.5.980-00 и ГН 2.1.5.1315-03
pH, ед. pH	4,29	9,12	11,43	12,17	Не должен выходить за пределы 6,5–8,5
Алюминий	52,0	11,0	0,98	3,1	0,5
Железо	0,16	<0,010	<0,010	<0,010	0,3
Свинец	0,0024	<0,002	0,0025	<0,002	0,03
Цинк	0,59	0,041	0,074	0,26	1,0
Мутность	37,7	35,7	41,8	42,34	0,75

Применение сернокислого алюминия приводит к росту алюминия в воде, так как вода содержит в большом количестве гидрокарбоната и соли магния (жесткая вода), что приводит к осаждению алюминия в виде нерастворимого гидроксида (образуется бесцветный студенистый осадок гидроксида алюминия), а также железа и цинка [85].

Опыты с применением флокулянта для осаждения взвесей показали, что добавление гидроксида кальция для гидролиза флокулянта способствует выпадению в осадок карбоната кальция, что приводит к укрупнению ранее образовавшихся осадков и адсорбирует на своей поверхности ионы цинка.

Оксихлорид алюминия превысил норму содержания остаточного алюминия в воде при использовании едкого натрового метода умягчения, pH обрабатываемой воды превышает 8,5, и гидроксид алюминия начинает переходить в форму алюминат-иона $[\text{Al(OH)}_4]^-$,

растворимого в воде. Тем самым, с увеличением рН среды увеличивается и концентрация остаточного алюминия в воде [85].

По скорости осаждения более эффективными реагентами являются сернокислый алюминий и кальцийалюмосиликатный реагент и выбор их для технологической схемы замкнутого водооборота для ПАО «Севералмаз» носит чисто экономический аспект.

Для разбавления сапонитсодержащей оборотной воды потребуется в среднем 3300 м³/ч, поэтому оставшуюся карьерную воду после осветления необходимо пропускать через слой углеродсодержащих сорбентов или доочищать посредством электрокоагуляции [27,34,102,109] и только затем сбрасывать в р. Золотица.

4.9.2 Осаждение взвешенных веществ оборотной воды Ломоносовского ГОКа с использованием разного типа реагентов

На момент отбора проб содержание взвесей в оборотной воде составило 115 г/л (по технологическому регламенту норма содержания взвешенных веществ для оборотной воды составляет 0,5 г/л), дозировка реагентов на 1 л составила [85]:

1. 7 % раствор сернокислого алюминия – 35 мл;
2. 9 % раствор оксихлорида алюминия «Аква-Аурат» – 35 мл с подщелачиванием пробы едким натром до рН=11,7 – 5 г;
3. флокулянт Praestol – предварительный ввод в обрабатываемую воду хлорида железа – 10 г, подготовка щелочной среды гидроксидом кальция до рН=11,6 – 4 г, ввод флокулянта – 0,1 г;
4. кальцийалюмосиликатный реагент – 25 г.

В результате добавление реагентов привело к загустиванию пробы в связи с повышенным содержанием глинистых сапонитовых взвешенных веществ в оборотной воде. Слоя осветлённой воды нет.

Результат опыта по истечении 60 мин представлен на рисунке 4.22 (а).

Проба оборотной воды была разбавлена до содержания взвешенных веществ 55–60 г/л, дозировка реагентов оставалась прежней, измерение уровня осветлённого слоя производилось спустя 60 мин, результаты измерений представлены в таблице 4.13

Результат опыта по истечении 60 мин представлен на рисунке 4.22 (б).

Таблица 4.13 – Результаты измерения осветлённого слоя

Наименование используемого реагента	Уровень осветлённой части, см
7 % раствор сернокислого алюминия	3
9% раствор оксихлорида алюминия «Аква-Аурат»	2
Кальцийалюмосиликатный реагент	3
Флокулянт Praestol	3

По полученным ранее данным в ходе опытов по разбавлению дозировка реагентов была уменьшена. В разбавленную оборотную воду с содержанием взвешенных веществ 45–50 г/л, дозировка реагентов на 1 л составила [85]:

1. 7 % раствор сернокислого алюминия – 20 мл;
2. 9 % раствор оксихлорида алюминия «Аква-Аурат» – 20 мл с подщелачиванием пробы едким натром до $\text{pH}=11,7 - 5$ г;
3. флокулянт Praestol – предварительный ввод в обрабатываемую воду хлорида железа – 10 г, подготовка среды для гидролиза полиакриламида гидроксидом кальция до $\text{pH}=11,6 - 4$ г, ввод флокулянта – 0,1 г;
4. кальцийалюмосиликатный реагент – 20 г.

По истечении 30 мин производилось измерение уровня pH , мутности осветлённой части и плотности сгущённой части, результаты представлены в таблице 4.14

Таблица 4.14 – Результаты опыта с уменьшением дозировки реагентов

Наименование используемого реагента	Уровень воды, см	pH	Мутность, мг/л	Плотность осадка, г/см ³
7 % р-р сернокислого алюминия	3	4,5	13,6	1,036
9 % р-р оксихлорида алюминия «Аква-Аурат»	2,3	10,5	0	1,035
Кальцийалюмосиликатный реагент	0,7	12,2	15,1	1,04
Флокулянт Praestol	5,5	12,0	0	1,04

Был поставлен дополнительный опыт по разбавлению оборотной воды жидкостью после обработки флокулянтом Praestol, как видно из рисунка 4.23 (в), в стакане № 4 жидкость продолжает флокулировать за счёт остаточного растворённого полиакриламида в воде, но качество осветлённой воды становится хуже, в основном мелкие глинистые частицы прилипают к стенкам стакана [85].

Результат опыта по истечении 30 мин представлен на рисунке 4.23 (в).

Оборотная вода разбавлялась до содержания взвесей 25–30 г/л, в мерные цилиндры на 1 л дозировались те же реагенты в том же количестве.

По истечении 60 мин производилось измерение уровня рН, оценивалась мутность осветлённой части и плотность сгущённой части, результаты представлены в таблице 4.15

Таблица 4.15 – Результаты с уменьшением концентрации взвешенных веществ

Наименование используемого реагента	Уровень воды, см	рН	Мутность, мг/л	Плотность осадка, г/см ³
7 % р-р сернокислого алюминия	3	4,1	0	1,027
9% р-р оксихлорида алюминия «Аква-Аурат»	11	10,9	0	1,03
Кальцийалюмосиликатный реагент	3	12,1	0	1,03
Флокулянт Praestol	7	12,0	0	1,027

Результат опыта по истечении 60 мин представлен на рисунке 4.23 (г), опыты по предварительной обработке оборотной воды перед флокулированием представлены на рисунке 4.23 (д).

Приведенные опыты по оценке эффективности применения различных видов неорганического или органического осадителя (флокулянта) на площадке Ломоносовского ГОКа подтверждают, что независимо от вида применяемого осадителя основным фактором осветления воды являются колебания взвесей глинистого минерала в оборотной воде в пределах, превышающих 50–120 г/л твёрдого, ни один из представленных реагентов не способен осветлить воду до заданной нормы.

Гидролиз реагентов, в том числе и разработанного с учётом химического состава взвесей оборотной воды кальцийалюмосиликатного реагента, проявляет свои коагуляционные свойства в диапазоне содержания взвешенных веществ до 40 г/л.



Рисунок 4.23 – Результаты опытов, проведённых на площадке Ломоносовского ГОКа: а) результат добавления 7 % раствора сернокислого алюминия в оборотную воду с содержанием твёрдого 115 г/л; б) разбавление пробы оборотной воды до 50–60 г/л, время отстаивания 60 мин; в) результаты по осаждению сапониновой пульпы с содержанием твердого 50–60 г/л спустя 30 мин, уменьшение дозировки реагентов; г) результаты по осаждению с содержанием твердого 25–30 г/л спустя 60 мин; д) опыты по предварительной обработке оборотной воды перед подачей флокулянта

4.10 Осаждение сапонитовой взвеси с применением кальцийалюмосиликатного реагента и уплотнителя на лабораторном стенде

Данный лабораторный стенд позволит изучить работу сгустителя для осветления и сгущения вод с повышенным содержанием взвешенных веществ.

Доведение концентрации содержания взвешенных веществ в оборотной воде до оптимума, при котором кальцийалюмосиликатный коагулянт работает наиболее эффективно при малых затратах. Процесс разбавления происходит при интенсивном перемешивании для равномерного распределения твердых частиц по всему объему.

Приборы и материалы, использованные в работе:

- универсальная модельная лабораторная ёмкость с механическим перемешивающим устройством (номинальный объем 70 л) – 1 шт.;
- оборотная вода с «зеркала хвостохранилища» Ломоносовского ГОКа (глубина забора проб 0,5 м) содержанием твердых частиц ≈ 42 г/л – 13 л;
- водопроводная вода для доведения концентрации твердых частиц до оптимального значения – 13 л;
- кальцийалюмосиликатный коагулянт с содержанием активного вещества 70% – 104 г;
- добавка – уплотнитель белитовый шлам – 520 г;
- линейка для измерения высоты столба осветленной воды;
- тахометр, подключенный к валу мешалки емкости;
- рН метр AS218 с электродом ЭСК – 10601/7;
- секундомер.

Процесс очистки представлен следующими операциями:

- доведение концентрации содержания взвешенных веществ до значений 20–25 г/л;
- ввод мелкодисперсного сухого порошка кальцийалюмосиликатного коагулянта при интенсивном перемешивании 100 об/мин для равномерного распределения его по всему объему ёмкости-сгустителя в течение 3–5 мин из расчёта 4 г на литр обрабатываемой пульпы;
- протекание химических реакций коагулянта с осаждаемым минералом в течение 1–1,5 ч. После обработки воды кальцийалюмосиликатным реагентом следует ввод добавок, таких как кальцийсодержащий уплотнитель;
- образование агломератов (слипание частиц), сгущение и осаждение частиц.
- отвод чистой воды и забор осадка из ёмкости сгустителя.

Ход проведения исследовательской работы:

В универсальную модельную лабораторную ёмкость с механическим перемешивающим устройством добавлялась чистая вода в оптимальном соотношении. Необходимый

объем воды был рассчитан заранее и составил 13 л. В чистую воду добавлялась обратная вода, затем полученная смесь перемешивалась в течение 4 мин для выравнивания концентрации твердых частиц во всем объеме. Далее в суспензию постепенно вводился коагулянт при интенсивном перемешивании для увеличения площади контакта фаз суспензии и коагулянта, соответственно, и более быстрого протекания реакции с взвешенными частицами. После чего перемешивающее устройство выключалось, и проводилась седиментация образовавшихся агломератов в течение 3 ч, по истечении которых производился замер высоты столба осветленной воды, pH получаемой воды.

Затем при интенсивном перемешивании в обрабатываемую после коагулянта воду с включенным перемешивающим устройством вводилась добавка-уплотнитель из расчета 20 г/л, после чего производилось интенсивное перемешивание еще в течение 4 мин. Далее производилась повторная седиментация в течение еще 2 ч и снова замерялись высота столба чистой воды и значение pH, которые сравнивались со значениями без утяжелителя. Емкость была оставлена на сутки для проверки полноты протекания процесса.

После 24 ч повторно замерялись высота столба чистой воды и pH осветлённого слоя, мутность осветлённой воды составила 26,34 мг/дм³, плотность сгущённого осадка 1,057 г/см³ далее моделировался слив воды при различных гидродинамических условиях и удалялась сгущённая часть. Определялся объем чистой воды через расчет объема по высоте столба и сравнивался с объемом слитой жидкости. Выход осветленной воды показан на графике зависимости высоты осветлённого слоя от времени на рисунке 4.24, основные параметры осаждения представлены в таблице 4.16, ход исследования представлен на рисунке 4.25.

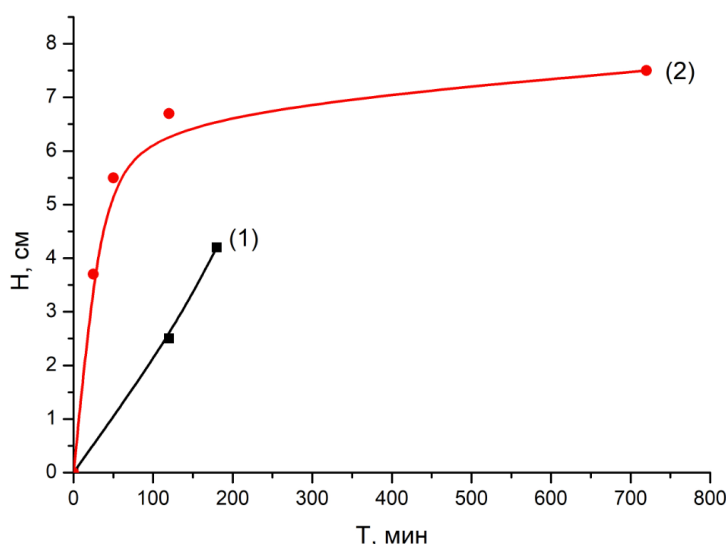


Рисунок 4.24 – График зависимости уровня осветлённой воды с применением алюмосиликатных реагентов от времени осаждения:

(1) – с применением АСК реагента;

(2) – с применением АСК реагента и кальцийсодержащего уплотнителя



Рисунок 4.25 – Ход проведения и результаты осаждения сапониновой взвеси в оборотной воде АСК реагентом и кальцийсодержащим уплотнителем:

- а) начало опыта;
- б) процесс перемешивания АСК реагента с пульпой;
- в) осаждение в течение 120 мин;
- г) осаждение в течение 180 мин;
- д) осаждение оборотной воды с добавкой АСК реагента и кальцийсодержащего уплотнителя после 720 мин отстаивания;
- е) качество осветлённой воды

Таблица 4.16 – Основные параметры исследования

Время, мин	Высота столба осветленной жидкости, см	Масса коагу- лянта, г	Масса утяжели- теля, г	Общий объем, л	Объем чистой воды, л	Объем осадка, л	Процент очистки
0	0	104	0	26	0	26	0
120	2,5	104	0	26	3,462	22,538	14,3
180	4,2	104	0	26	5,816	20,184	22,4
180	0	104	520	26	0	26	0
205	3,7	104	520	26	5,124	20,876	19,7
230	5,5	104	520	26	7,616	18,384	29,3
300	6,7	104	520	26	9,277	16,723	35,7
720	7,5	104	520	26	10,386	15,614	39,9

После эксперимента было получено около 9,5 л осветлённой воды. Количество сливаемой осветлённой воды меньше, чем номинально полученный объем примерно на 10% вследствие захвата твердых частиц с поверхности раздела фаз потоком воды. Увеличение производительности может зависеть от более интенсивного перемешивания, масштабирования процесса и ряда других сложноконтролируемых факторов, таких как непостоянство состава очищаемой оборотной воды.

4.11 Осаждение глинистых веществ другого химического состава кальцийалюмосиликатным реагентом

Для выявления сравнительных характеристик процесса осаждения была взята сухая смесь кембрийской глины в количестве 2 г, добавленная в 100 мл воды, после процесса перемешивания измерялась мутность воды, которая составила 297 мг/дм³, в полученную загрязнённую воду добавлялся в количестве 0,1 г на 100 мл кальцийалюмосиликатный реагент, время до полного отстаивания составило 5 мин, мутность осветлённой части 25,19 мг/дм³, ход эксперимента представлен на рисунке 4.26.

Таблица 4.17 – Отличительный химический состав глин

Образец	Содержание, % масс.							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	SO ₃	TiO ₂	CaO
Кембрийская глина	63,99	16,24	8,69	6,08	2,63	0,93	0,82	0,47
Сапонитовая глина	52,75	5,71	9,38	1,64	21,07	-	0,73	2,87

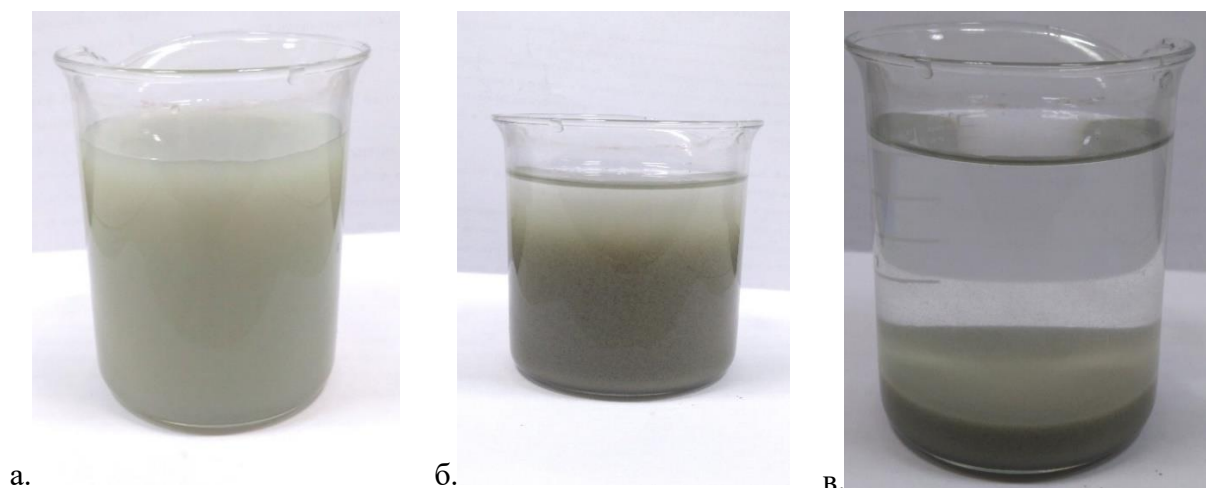


Рисунок 4.26 – Ход проведения и результаты осаждения кембрийской взвеси в воде:

а) начало эксперимента; б) осаждение в течение 2 мин; в) осаждение в течение 5 мин

Исследование показало, что кальцийалюмосиликатный реагент является перспективным коагулянтом при очистке сточных вод от взвешенных веществ любого минерального состава взвесей. Необычайно широкие области применения кальцийалюмосиликатного реагента и белитового шлама в технологии очистки воды обусловлены разнообразием их свойств, а это, в свою очередь связано, с большим количеством силикатных фаз и многообразием их кристаллических структур.

4.12 Исследование сгущённого продукта

после осаждения кальцийалюмосиликатным реагентом и уплотнителем

Исследования проводились с целью выявления перспективности использования сгущённого продукта в качестве вторичного после процесса осаждения в течение 720 мин. В ходе исследований было выявлено, что в основном своём составе сгущённый продукт представлен тремя основными оксидами: SiO_2 – 45–50 % масс., $\text{MgO} \approx 20$ % масс., $\text{CaO} \approx 15$ % масс., полученный химический состав сгущённого продукта после процесса сгущения АСК реагентом представлен в таблице 4.18.

Таблица 4.18 – Химический состав сгущённого продукта после обработки АСК реагентом и уплотнителем

Образец	Содержание, % масс.							
	SiO_2	MgO	CaO	Fe_2O_3	Al_2O_3	K_2O	Na_2O	Прочее
Сгущённая сапонитовая пульпа после АСК реагента и уплотнителя	47,4	19,51	14,83	9,02	4,62	1,25	1,23	2,14

По полученным данным можно сделать вывод, что сгущённый продукт является принципиальным товарным продуктом для получения магниевых огнеупоров согласно диаграмме, MgO-CaO-SiO_2 и температурным полям кристаллизации. Стоит отметить, что содержание таких оксидов, как MgO и CaO , поможет реализовать сгущённый продукт в качестве кальциево-магниевого удобрения для нейтрализации кислых почв.

4.13 Выводы по главе 4

1. Основной причиной появления тонкодисперсных частиц является переизмельчение частиц, поступающих с оборотной водной. Исследованиями скоростей отстаивания сапониновых частиц различной крупности (10^{-4} – 10^{-6} м) установлено, что при перемещении высокодисперсных хвостов обогащения с заданным гранулометрическим составом твердой фазы осаждение и распределение твердых частиц по длине осадительного канала стгустителей определяется величиной наименьшей крупности отдельных классов сапониновых частиц. Вся зона осаждения сапониновой пульпы разделяется на два основных участка: зона полного замутнения, в которой присутствуют сапонитчастицы всех исходных классов крупности, и зона длительного осветления. Без реагентной очистки частицы с коллоидным размером осаждаются длительное время, тем самым усложняя процесс получения чистой оборотной воды для процесса обогащения и увеличивая площадь занимаемую под хвостохранилищем.

2. На основании разработанных теоретических представлений о химическом потенциале предложено новое научное направление синтеза реагентов с заданными физико-химическими и минеральными свойствами для водоподготовки горно-обогатительных предприятий.

3. Осаждение взвешенных веществ в технологических водах Ломоносовского ГОКа с применением кальцийалюмосиликатного реагента начинается только после разбавления глинистой сапониновой пульпы до содержания твёрдого менее 40–50 г/л. При росте концентрации взвесей (твёрдого) глинистые частицы становятся более гидрофильными [74].

4. Для разбавления сапониновой суспензии и для снижения нагрузки на окружающую среду региона добычи целесообразно вовлекать в процесс предварительно очищенную карьерную воду [32,41,111].

5. Применение кальцийалюмосиликатного реагента в скуче с кальцийсодержащим уплотнителем позволит осветлить 45% оборотной сапониновой пульпы с учётом контроля содержания взвесей за счёт разбавления пульпы очищенной водой карьерного водоотлива.

6. При увеличении твёрдого в оборотной воде повышается влагосодержание осадка, и процесс седиментации значительно увеличивается, но тенденции к уплотнению осадка в течение времени остаются.

7. Кальцийалюмосиликатный реагент сгущает взвеси вне зависимости от их минерально-химического состава, как и традиционно применяемые коагулянты и флокулянты, таким образом, главными параметрами для осаждения являются содержание взвешенных веществ и их размер.

8. За счёт вяжущих свойств синтезированного неорганического минерального осадителя снижается нагрузка на стены дамбы, что предотвращает дальнейшее разрушение стен и позволит уменьшить площадь хвостохранилища [32,41,111].

9. Применение минерального осадителя и уплотнителя позволяет реализовать сгущённый продукт после процесса седиментации сапонитовой пульпы в качестве вторичного продукта.

ГЛАВА 5 ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ САПОНИТОВЫХ РУД С ДОБАВКОЙ ЩЕЛОЧНОГО АЛЮМОСИЛИКАТНОГО СЫРЬЯ

5.1 Новые технологические решения для ПАО «Севералмаз»

Поскольку химико-технологический процесс размола алмазосапонитовой руды осуществляется в водных растворах, и забор оборотной воды происходит с «зеркала хвостохранилища», изучение равновесных процессов целесообразно начать с анализа диаграммы состояния вязкости воды от температуры, представленной на рисунке 5.1

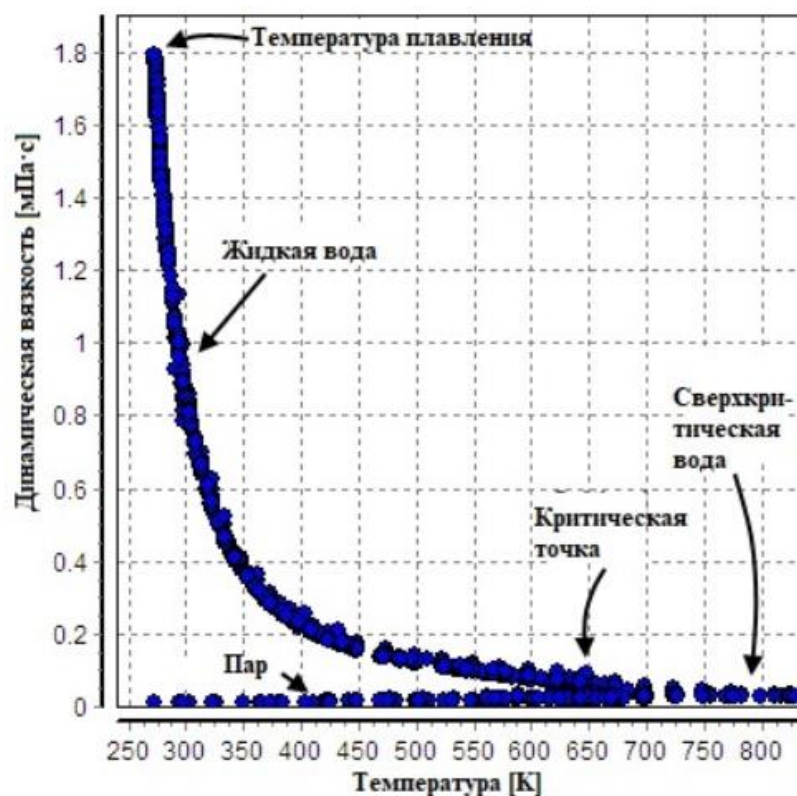


Рисунок 5.1 – График зависимости динамической вязкости воды от температуры

На рисунке 5.2 представлено время работы обогатительной фабрики по месяцам в 2017 г. во время четырёх различных климатических условий: зима–весна–лето–осень с использованием графика зависимости, представленного на рисунке 5.1, фазовой диаграмме воды и температурному климатическому режиму, отвечающему Архангельской области за весь период 2017 года. Был построен график, из которого видно, что с апреля по октябрь вода для обогатительной фабрики идёт в жидком состоянии и с меньшим содержанием взвешенных веществ, а с ноября по апрель всё, что ниже линии 0 – линия образования льда, на хвостохранилище происходит естественное загущение жидкой воды, увеличивается ее вязкость, вода превращается в пульпу с повышенным содержанием взвешенных веществ [85].

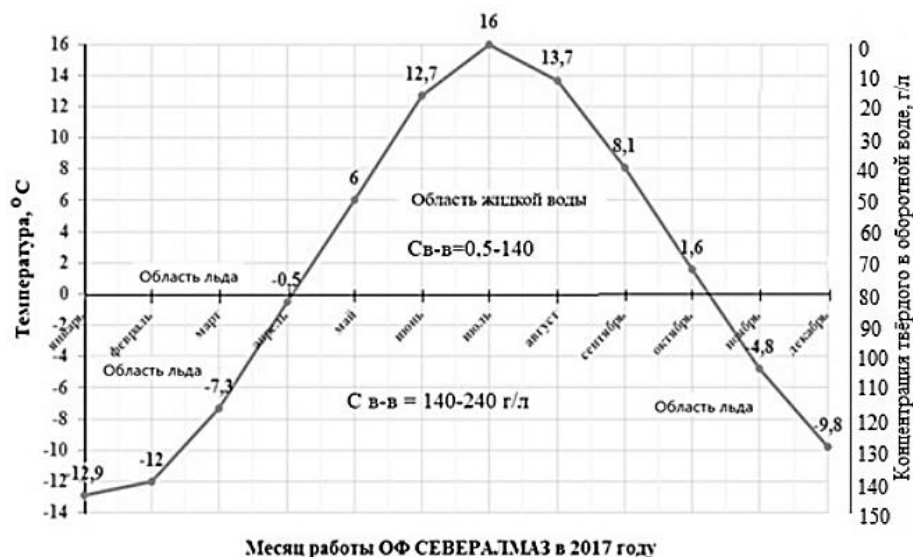


Рисунок 5.2 – Влияние климатических параметров на осуществление технологического процесса обогатительной фабрики

Согласно рисунку 5.2 уровень осветленного слоя в районе водоприемных колодцев для подачи оборотной воды на обогатительную фабрику в переходный период максимально ледяной покров веществ будет критически низким. Критически низкий уровень означает высокую вероятность подачи на фабрику оборотной воды с высоким содержанием глинистых, что приведет к зашламованию схемы или вовлечению в процесс дополнительной воды из других источников.

На основе использования статистического анализа климатических данных Архангельской области четырех времен года подтверждено четкое влияние климатического температурного параметра, который является основополагающим фактором, требующим включения в технологическую карту контроля изменения приготовления оборотной воды: с мая по октябрь подготавливать и запасть оборотную воду для периода работы фабрики с ноября по апрель.

5.2 Водный баланс с учётом разбавления

Среднемесячное содержание твердых частиц зависит не только от климатических условий региона добычи, но количества обрабатываемой руды, за 3 года (по имеющимся статистическим архивным данным, предоставленным руководством ПАО «Севералмаз» за 2017, 2018, 2019 гг. по содержанию взвешенных веществ в оборотной воде, подаваемой на обогащение) всего несколько раз (6 месяцев из 36) превысило норму, которую можно эффективно обработать с учётом разбавления и реагентной обработки. По архивным данным

был построен график прогнозирования содержания взвесей, представленный на рисунке 5.3.

Фактическая средняя концентрация взвесей за 3 года показана красным, она приближается к среднему содержанию 40 г/л. При концентрации ниже 40 г/л разбавление не требуется, и эта статья расхода воды в балансе на данный день будет отсутствовать. По достижении отметки среднегодовой концентрации взвесей в 60 г/л потребуются постоянный расход дополнительной чистой воды на разбавление, пока среднегодовое количество твердых частиц не вернется в пределы стабильного периодического режима добавления воды. Таким образом, разбавление для процесса осаждения носит периодический характер.

Однако для постоянного процесса очистки необходим запас чистой или пригодной для разбавления воды, следовательно, необходимо возвести накопитель с водой, которая будет находиться в жидком состоянии в течение всего года.

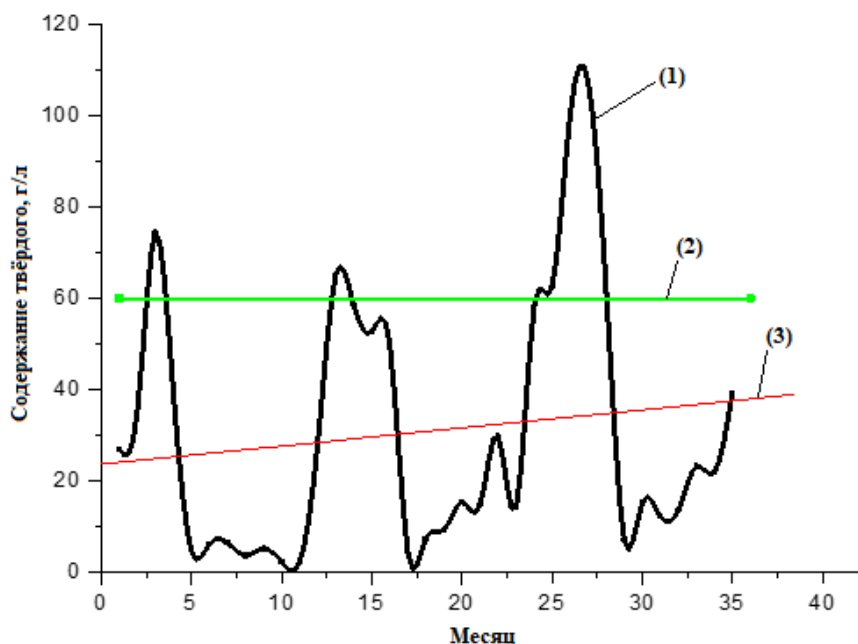


Рисунок 5.3 – График прогнозирования содержания взвесей на основе статистических архивных данных: линия 1 – средняя концентрация взвесей в месяц, г/л; линия 2 – среднее значение концентрации твердых частиц для всего промежутка времени; линия 3 – теоретический предел работы коагулянта с положительным водным балансом (возможность получить закрытый цикл воды)

5.3 Принципиальная технологическая схема и технические параметры использования кальцийалюмосиликатного реагента и уплотнителя для осветления оборотной воды

Технологическая линия осветления оборотной воды, представленная на рисунке 5.4, предусматривает использование нерастворимого мелкодисперсного порошка кальцийалюмосиликатного реагента [74] фракционным составом 125 мкм и влажностью 15–20% кальцийсодержащего уплотнителя, в качестве которого используется белитовый шлам.

Карьерная вода из трубок Архангельская и им. Карпинского-1, подаваемая на перекачивающую насосную станцию, отправляется на стадию осветления от взвешенных веществ в вертикальный отстойник с мешалкой (поз. 3) дозировка кальцийалюмосиликатного реагента осуществляется посредством винтового питателя (поз. 1) из склад-бункера (поз. 2), часть осветлённой карьерной воды аккумулируется в баке запаса (поз. 4), так как разбавление оборотной воды носит периодический характер, и после осветления воды требуется доочистка на однослойном сорбционном фильтре (поз. 5), после которого происходит выпуск воды на поля поверхностной фильтрации, а сгущённый продукт направляется на утилизацию. Оборотная вода обогатительной фабрики направляется в усреднитель взвешенных веществ (поз. 6), оборудованный промышленным нефелометром и уровнемером, при повышенном содержании взвешенных веществ в усреднитель подаётся осветлённая оборотная вода из бака запаса осветлённой карьерной воды, после усреднителя оборотная вода с заданным содержанием взвешенных веществ подаётся в кавитационный гомогенизатор (поз. 7), где происходит процесс смешения пульпы и реагента, дозировка реагента происходит из склад-бункера реагента (поз. 1), пульпа с реагентом подаётся в сгуститель (поз. 8), по истечении 1–2 ч с помощью винтового питателя (поз. 2) из склад-бункера (поз. 1) в сгуститель подаётся кальцийсодержащий уплотнитель, по истечении 4 ч осветлённый слой насосами подаётся на обогатительную фабрику, а сгущённый продукт направляется на утилизацию. С целью аккумуляции дополнительной воды для разбавления оборотной воды в период с ноября по апрель (поз. 4).

Для непрерывной подачи осветлённой воды на обогатительную фабрику необходимо 3 системы подачи, смешения и сгущения пульпы, работа сгустителей и подача осветлённой воды таким образом будет непрерывной. Технические параметры осветления оборотной воды кальцийалюмосиликатным реагентом и ввода уплотнителя представлены в таблице 5.1:

Таблица 5.1 – Параметры осветления оборотной воды применяемые для кальциалюмосиликатного реагента и уплотнителя-белитовый шлам

Наименование	Значение
Содержание взвешенных веществ, г/л	не более 40
Дозировка АСК реагента, г/л	4
Дозировка уплотнителя, г/л	20
Время отстаивания оборотной воды после добавления реагента, ч	2
Время отстаивания оборотной воды после добавления уплотнителя, ч	4
Время перемешивания реагента в осветлителе карьерной воды, мин	5-7

Основные показатели, которые необходимо ввести в технологический цикл [42]:

– погодно-климатическая поправка, т.е. в период с апреля по октябрь аккумулировать оборотную воду для периода добычи и обогащения ноябрь-март;

– рекомендуется вести контроль содержания Жидкое (содержание взвесей): Твердое (руда) на стадии размолла за счёт ведения контроля подачи алмазосодержащей руды с двух трубок с учётом их минерального состава и возможности изменения Ж:Т за счёт изменения регулируемой скорости вращения самой мельницы [39,40,85].

В таблице 5.2 приведён водный баланс для 2019–20 гг., полученный в ходе осветления с учётом, что объём потребляемой оборотной воды равен 2300 м³/ч. Баланс рассчитан на оптимальное содержание взвешенных веществ $\approx 20\text{--}25$ г/л.

Для проведения процесса разбавления и осветления оборотной воды необходимо добавлять объёмы чистой карьерной воды $\approx 5,25$ млн. м³ воды в год. Знак «-» обозначает излишек воды, который можно вернуть в систему, чтобы уменьшить дефицит водного баланса на первое время запуска технологии при условии её накопления в аккумулирующих емкостях. Также отрицательные значения устанавливают дефицит технологической воды при полном закрытии цикла обогащения.

Полный замкнутый водный цикл с учётом аккумулирования осветлённой воды по данной технологии возможен через 2–3 года [6].

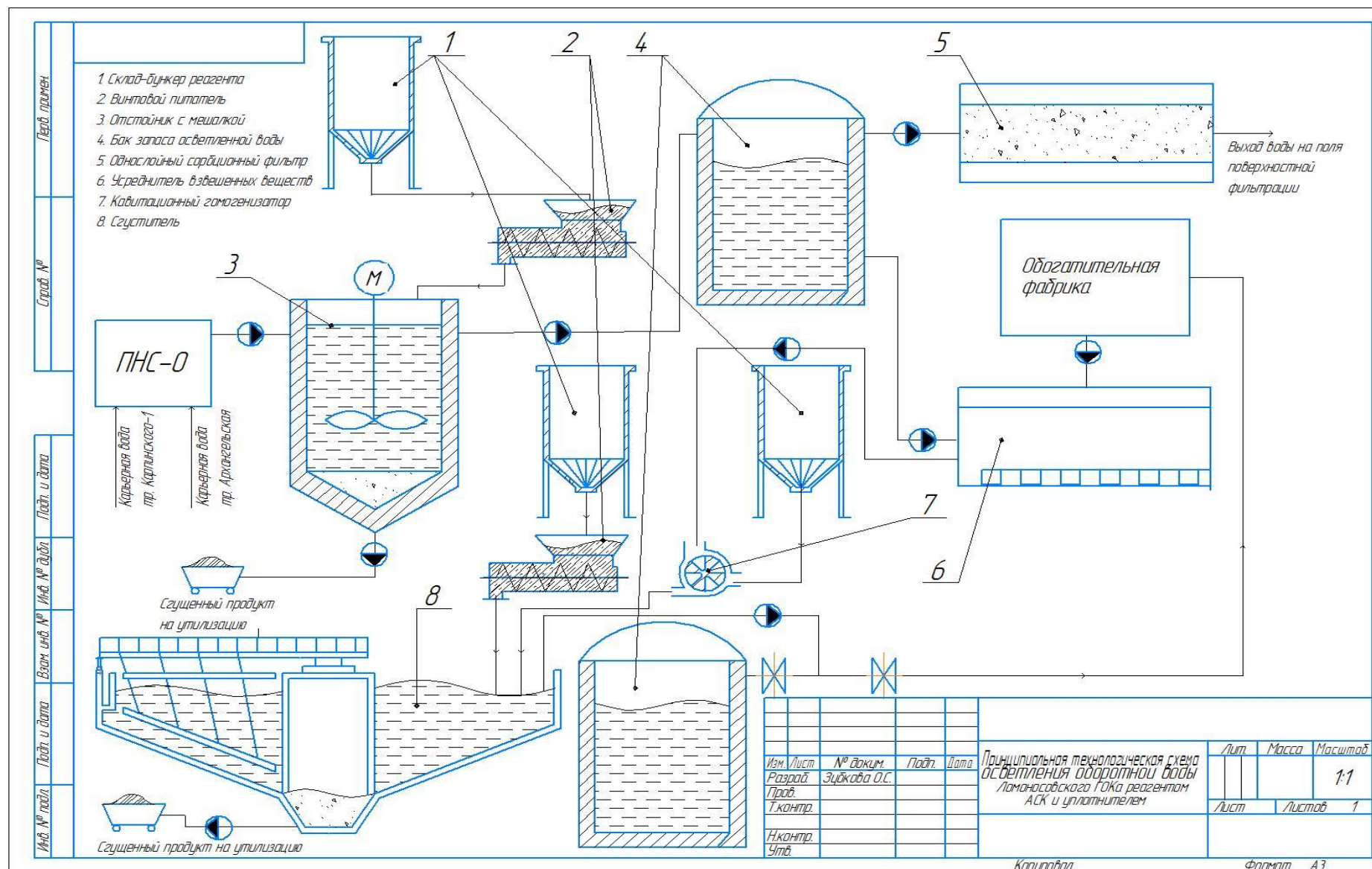


Рисунок 5.4 – Принципиальная технологическая схема осветления оборотной воды Ломоносовского ГОКа

Таблица 5.2 – Ориентировочный годовой баланс очистки оборотной воды на промышленной установке с часовым расходом пульпы 2300 м³/ч

Месяц	Суспензии, м³	Разбавление до 20 г/л, м³	Расход чистой воды, м³	Осветлённой воды, м³	Полученного осадка, м³	Потребление чистой воды, м³
Январь	1656000	4968000	3312000	3229200	1738800	82800
Февраль	1656000	8280000	6624000	2898000	5382000	3726000
Март	1656000	8280000	6624000	2898000	5382000	3726000
Апрель	1656000	4968000	3312000	1738800	3229200	1573200
Май	1656000	1656000	0	248400	1407600	-248400
Июнь	1656000	1656000	0	993600	662400	-993600
Июль	1656000	1656000	0	993600	662400	-993600
Август	1656000	1656000	0	993600	662400	-993600
Сентябрь	1656000	1656000	0	579600	1076400	-579600
Октябрь	1656000	1656000	0	579600	1076400	-579600
Ноябрь	1656000	3312000	1656000	1159200	2152800	496800
Сумма	18216000	39744000	21528000	16311600	23432400	5216400
Среднее	1656000,0	3613090,9	1957090,9	1482872,7	2130218,2	474218,2
Прогноз на 2020 г (среднемес. значения)	1656000	4140000	2484000	1449000	2691000	1035000
Разность с 2019	0,0	526909,1	526909,1	-33872,7	560781,8	560781,8
% от 2019	0	12,72727273	21,212121	-2,3376623	20,839161	54,18181818

Избыток аккумулированной осветленной воды можно включать в оборотную воду фабрики, направлять на технологические нужды фабрики, однако при достоверности годового баланса, представленного в таблице 5.2, необходимо добавлять воду для разбавления взвешенных веществ в оборотной воде на протяжении всего года для проведения процесса осветления оборотной воды в сгустителях.

5.4 Технико-экономический анализ эффективности разработки

Согласно Постановлению Правительства РФ от 03.03.2017 № 255 (ред. от 27.12.2019) «Об исчислении и взимании платы за негативное воздействие на окружающую среду» (вместе с «Правилами исчисления и взимания платы за негативное воздействие на окружающую среду») (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2020) [65] и полученным данным предоставленным в главе 3, таблице 3.14 (точка №3), был рассчитана плата за негативное воздействие на окружающую среду согласно формулам 5.1–5.2, результаты расчётов без применения реагента предоставлены в таблице 5.3:

$$P_{нд} = \sum_{i=1}^n M_{нд\ i} * H_{пл\ i} * K_{от} * K_{нд} \quad (5.1)$$

$$P_{вр} = \sum_{i=1}^n M_{вр\ i} * H_{пл\ i} * K_{от} * K_{вр} \quad (5.2)$$

Согласно усреднённым данным предприятия суммарный объем карьерной воды, подаваемый на поля поверхностной фильтрации, составляет 2 372 500 м³/год, ставки для расчётов платы были взяты согласно Постановлению Правительства РФ от 13.09.2016 № 913.

Таблица 5.3 – Плата за негативное воздействие на окружающую среду карьерного водоотлива

Загрязняющее вещество	Концентрация на выходе с ППФ в проёме реки, мг/дм ³	Норма согласно Сан-Пин 2.1.5.9 80-00, мг/дм ³	$H_{пл\ i}$, руб/т	$M_{нд\ i, T}$	$M_{вр\ i}$	$K_{нд}$	$K_{вр}$	$P_{нд}$, руб.	$P_{вр}$, руб.
Магний	14,1	50	14,9	33,215	–	1	–	4 949 035,0	–
Взвешенные в-ва	156	0,75	977,2	370,11	368,33	–	5	–	1 799 295,103
Железо	1,08	0,3	5950,8	2,5623	1,85	–	5	–	71 175,0

Продолжение таблицы 5.3

Алюминий	0,5	0,2	18388,3	1,18625	0,711	–	5	–	4 745,0
Сумма	–							4 949 035,0	1 919 795,73
Итого	–								1 920 290,634

В год плата за сброс превышенных загрязняющих веществ в р. Золотица будет составлять 1 920 290,634 руб. за счёт ввода карьерной воды в технологический цикл, данную сумму можно снизить в двое. К примеру, плата за негативное воздействие на окружающую среду за хранение вскрывшихся пустых пород за 2012 г. составила 19,07 млн. рублей [71], в 2018 г – 9,74 млн. рублей [72].

Расход кальцийалюмосиликатного реагента и уплотнителя-белитовый шлам с учётом контроля твёрдого в оборотной воде не выше 20 г/л, требуемая масса кальцийалюмосиликатного сухого реагента определяется произведением расхода реагента на 1 м³ и объёмного расхода обрабатываемой пульпы: для реагента: 5 кг/м³ · 2600 м³/ч = 13 т/час или 312 т/сутки; для уплотнителя: 20 кг/м³ · 2600 м³/ч = 52 т/час или 1 248 000 т/сутки.

Расчётная цена производства кальцийалюмосиликатного реагента согласно патенту №2683082, которая согласованна с Пикалёвским глинозёмным комбинатом в производственных условиях составит 5200 руб./т. Затраты на реагентную обработку оборотной воды в количестве 22 776 000 м³/год представлены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Затраты на реагентную очистку оборотной воды в течение года

Исследуемая обработка оборотной воды	Требуемое количество реагента, мл, г/л	Стоимость реагентов за 1 т, руб.	Затрачиваемая сумма на обработку оборотной воды в год	Общая сумма затрат в год
Кальцийалюмосиликатным реагентом + уплотнитель белитовый шлам	содержание твёрдого 20 г/л - 4-5; содержание твёрдого не более 40-45 г/л - 20	5200	473 740 млн. руб. для осаждения твёрдого в диапазоне не более 20 г/л, 2,4 млрд. руб. для осаждения твёрдого 40-45 г/л	655 948 млн. руб./2,55 млрд. руб.
	белитовый шлам-20	400	182 208 млн. руб.	

Продолжение таблицы 5.4

Алюминий серно- нокислый ALS 50 Kemira Aluminium sulphate (раствор 7-8%)	20	18500	8,43 млрд. руб.	8,43 млрд. руб.
«Аква Аурат»+NaOH (ГОСТ Р 55064- 2012)	«Аква Аурат»- 20	99760	45,44 млрд. руб.	48,86 млрд. руб.
	NaOH -5	30000	3,4 млрд. руб.	48,86 млрд. руб. 155, 18 млрд. руб.
Флокулянт Praestol+Ca(OH) ₂ +Хлорид железа	Хлорид железа - 10	55000	1,25 млрд. руб.	155, 18 млрд. руб.
	Ca(OH) ₂ - 4	150000	13, 67 млрд. руб.	
	Флокулянт - 0,1	260000	592 176 млн. руб.	

Из таблицы 5.4 видно, что закупка реагентов кальцийалюмосиликатного реагента и белитового шлама стоит в 3 раза дешевле, с учётом того, что на сгущение твёрдого в оборотной воде 40 г/л необходимо добавлять больше реагента, чем сгущение твёрдого в оборотной воде готовым 7%-ым раствором сернокислого алюминия.

При условии обеспечения переработки 4 млн. тонн пульпы в год, выход сгущенного концентрированного осадка после применения минеральных осадителей составит порядка 55-60% = 2,2-2,4 млн. т, которые можно реализовать в качестве товарного продукта.

Целевые продукты, возможные к получению при переработке сапонитового шлама, который находится в чаше хвостохранилища и в отвалах, представлены на рисунке 5.5.



Рисунок 5.5 – Распределение по приоритетным технологическим направлениям утилизации сапонитового шлама

На основе годовых отчётов ПАО «Севералмаз» был произведён расчёт затрат на возведение гидротехнических сооружений и дохода от переработки шлама в хвостохранилище в минеральные удобрения без учёта пустой вскрывшейся породы, представленный в таблице 5.5 [94]. Расчёт вёлся с 2015 года, после того как была введена в эксплуатацию 2 линия и был осуществлен выход на производственные мощности обогатительной фабрики. На 2020 г. планируется возведение гидротехнического сооружения до отметки 140 м.

С учётом химического состава сгущённого продукта, исследованного после нормированного осаждения согласно технологическим нормам осаждения, приоритетными являются кальций-магниевосодержащие минеральные удобрения, контроль качества реагента и основных действующих веществ можно осуществлять, варьируя количество добавляемого реагента и уплотнителя во время осветления оборотной воды. Массовая доля питательных веществ, % находящиеся в сгущённом осадке описаны в главе 4, раздел 4.12: $MgO \approx 20$, $CaO \approx 15$, $K_2O \approx 1,25$, удобрение может использоваться для нейтрализации кислых почв ($pH=11,0-12,0$), не растворим в воде.

Ориентировочная стоимость таких удобрений составляет в сухом виде 12–15 руб./кг (например, удобрение Dolomag G) и в жидком виде 350–900 руб./л (например, удобрения Фолирус Кальций-Магний, Calcium Magnesium Supplemen), перерасчёт будет вестись на стоимость жидкой формы удобрения, так как сгущённый продукт характеризуется при со-

держании 21 г/л влагосодержанием 86,5 %, а при 40 г/л твёрдого в оборотной воде влагосодержание составляет 94 %; для расчёта стоимости удобрения в сухом виде была взята разность между влажным и сухим осадком после сгущения.

Таблица 5.5 – Расчёт затрат на возведение гидротехнических сооружений и дохода от переработки шлама

Год	Отметка высоты гребня дамбы, м	Уложено хвостов в чашу хвостохранилища, млн. т	Стоимость работ, руб.	Стоимость Са-Mg содержащего удобрения в жидком виде, трлн. руб.	Стоимость Са-Mg содержащего удобрения в сухом виде, руб.
2015	Увеличение мощностей ОФ	8,2	107 860 000,0	2,87	15 968 421 053,0
2016	131	12,2	218 000 000,0	4,27	23 757 894 737,0
2017	132	16,2	447 446 619,0	5,67	31 547 368 421,0
2018	135	20,2	394 580 000,0	7,07	39 336 842 105,0
2019	138	26,6	371 984 782,0	9,31	51 800 000 000,0
Итого			1 539 871 401,0	29,2	162 411 000 000,0

Расчёты таблиц 5.3 и 5.5 показывают, что ввод карьерной воды в предложенный технологический цикл вдвое сбавит негативное воздействие и соответствующую плату за него, а получение из сгущённого продукта удобрения является финансово перспективным направлением.

С учётом соблюдения технического регламента промышленной установки (таблица 5.1) по осаждению твёрдого реагентами кальцийалюмосиликат и белитовый шлам, при осаждении 4 млн. т в год пульпы, цена реализации получаемого сгущенного концентрированного осадка на основании средней рыночной цены на удобрение, при условии сниженной концентрации СаО, составит для сухого удобрения 7,82 млрд. руб./год, для жидкого 840 млрд. руб./год, таким образом при реализации комплексной переработки сапонитовой руды чистая прибыль предприятия от реализации сгущённого продукта в качестве жидкого удобрения составит 837,45 млрд. руб./год, без учёта реализации основной продукции-алмаза.

Также ассортимент выпускаемой продукции можно увеличить за счёт ввода вскрывшейся пустой сапонитовой породы находящейся в отвалах [35,44,63,100].

5.5 Выводы по главе 5

1. Выявлена зависимость погодно-климатических условий (температурный режим) на процесс отстаивания сапонитовой пульпы в хвостохранилище.

2. Рассчитан водный баланс с учётом разбавления оборотной воды в период повышенного содержания твёрдого в пульпе с учётом норм дозировки кальцийалюмосиликатного реагента и уплотнителя, по выявленным зависимостям спрогнозирован выход технологической линии на закрытый режим, который составил 2–3 года.

3. Разработана схема получения осветлённой оборотной воды с применением кальцийалюмосиликатного реагента и уплотнителя от взвешенных веществ для обогатительной фабрики Ломоносовского ГОКа, включающая следующие стадии: осаждение взвешенных веществ в карьерном водоотливе → разбавление оборотной воды обогатительной фабрики очищенной карьерной водой → складирование или утилизация сгущённого продукта → подача осветлённой оборотной воды на обогащение руды.

4. В результате технико-экономического анализа выявлена сумма платежей за негативное воздействие карьерного водоотлива. Дополнительную прибыль можно получить за счёт получения удобрений из сгущённой части после процесса осветления оборотной воды и переработкой уложенной части шлама в чаше хвостохранилища, это решение позволит не только решить экологические проблемы хранения шлама, но и окупит затраты предприятия, потраченные на реализацию технологической линии осветления оборотной воды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные экспериментальные и теоретические исследования показали эффективность и целесообразность использования в качестве реагента-осадителя сапонитовой взвеси синтезированного кальцийалюмосиликатного реагента и белитового шлама в качестве уплотнителя сгущённой части, а также экономическую выгоду от реализации сгущённого уплотнённого сапонитового осадка в качестве высококонцентрированного удобрения. Основные научные положения диссертации и приведенные технические разработки способствуют дальнейшему развитию научных основ теории и технологии осветления оборотных вод горно-обогатительных комбинатов, а полученные результаты могут быть рекомендованы при проведении научно-исследовательских и проектных работ, не только применительно к водоподготовке оборотной воды с применением минерального осадителя, но и к процессам утилизации шлама в качестве товарных продуктов.

В результате проведенного исследования в заключении можно сделать ряд выводов:

1. Установлено влияние минерального состава сапонитовой руды двух кимберлитовых трубок на процесс размола, бесконтрольная подача руд влияет на переизмельчение частиц сапонита и приводит к осложнению его осаждения в чаше хвостохранилища.

2. Установлено влияние гранулометрического состава частиц сапонита в сливах после процесса обогащения руды на скорость их осаждения без применения реагентов, по результатам расчётов скорости осаждения показана целесообразность ввода реагентов.

3. На основе изученного минерального и химического состава сбрасываемых вод и вод, поступающих на обогащение, разработан кальцийалюмосиликатный реагент, при взаимодействии реагента с водой образуются гидратированные фазы силиката кальция, которые представляют собой соединения, способные к катионному и анионному обмену, что позволяет данным веществам проникать в межплоскостное пространство слоев минерала и взаимодействовать с находящимися там ионами. Данный механизм взаимодействия позволяет уплотнить межслоевое пространство кристаллической решетки минерала и выделить из нее свободную воду.

4. Применяя уплотнитель, в качестве которого был взят белитовый шлам, выявили значительное ускорение процесса осаждения образовавшихся частиц, отдача дополнительной чистой воды и повышение плотности сгущённого продукта.

5. Экспериментально установлено, что неорганические и органические коагулянты (флокулянтов) не обладают эффективными осадительными свойствами при колебаниях сапонитовой взвеси в оборотной воде концентрацией выше 60–100 г/л, поскольку добавление

коагулянта и флокулянта приводит к загустеванию сапонитовой пульпы и требует ее разбавления дополнительным количеством воды.

6. Установлена концентрация твёрдого в сапонитовой пульпе в количестве 40–50 г/л, оптимальная дозировка кальцийалюмосиликатного реагента 4–5 г/л и уплотнителя – белитового шлама 20 г/л для процесса осаждения взвешенных сапонитовых частиц.

7. Показана возможность применения кальцийалюмосиликатного реагента для осаждения взвешенных веществ в водной среде с различным химическим составом взвесей.

8. На основе химического состава сгущённого продукта показана эффективность его дальнейшей утилизации.

9. Используя статистический анализ климатических данных Архангельской области четырех времен года и содержания взвешенных веществ в оборотной воде, подтвердили чёткое влияние климатического температурного параметра, который следует включить в технологическую карту контроля изменения приготовления оборотной воды.

10. Разработана принципиальная технологическая схема осветления оборотной воды кальцийалюмосиликатным реагентом и вводом уплотнителя со степенью извлечения воды 45–50 %, отдельно разрабатывалась линия очистки карьерной воды, её аккумулярование для дальнейшего разбавления оборотной воды.

11. В результате технико-экономического анализа показано негативное влияние сброса карьерной воды без дополнительной очистки и не введения её в технологический цикл, а также перспективность утилизации сгущённого продукта в качестве минерального удобрения; после выхода технологической линии осветления оборотной воды на производственную мощность переработка и ведение контроля химического состава удобрения, получаемого из переработки и сгущения уже имеющейся сапонитовой пульпы, которая уложена в чаше хвостохранилища Ломоносовского ГОКа.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ПАО – публичное акционерное общество;
СанПиН – Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы;
ОФ – обогатительная фабрика;
ГОК – горно-обогатительный комбинат;
XRD – рентгеновская дифракция;
DTA-TGA (ДТА) – дифференциальный термический анализ;
у.с.к. – условно-ситовый класс;
ВПС – водопонижающая скважина;
MLR – множественная линейная регрессия;
PLS – регрессия наименьших квадратов;
АО – акционерное общество;
АК – акционерная компания;
РФА – рентгенофлуоресцентный анализ;
ПНД Ф – природоохранные нормативные документы федеративные;
ГСО – государственный стандартный образец;
ЕМФ – единица мутности по формазину;
ppm – (от англ. parts per million) миллионная доля или $10^{-4} \%$;
NTU – Nephelometric Turbidity Unit;
ВК – водоприёмный колодец;
УХХ – участок хвостового хозяйства;
ПНС – перекачивающая насосная станция;
ПДК – предельно допустимые концентрации;
Å – Ангстрем, $1 \text{ Å} = 0,1 \text{ нм}$;
АСК – кальцийалюмосиликатный коагулянт;
КСН – классификатор спиральный наклонный;
ГН – гигиенические нормы;
ОХА – оксихлоридный коагулянт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов, В.Я. Комплексная переработка нефелин-апатитового сырья / В.Я. Абрамов, А.И. Алексеев, Х.А. Бадалянц. – М.: Металлургия, 1990. – 391 с.
2. Алексеев, А. И. Химия воды/ А.И. Алексеев, А.А. Алексеев. –СПб.: Химиздат, Ч.II. 2007. – 456 с.
3. Алексеев, А.И. Комплексная переработка апатит-нефелиновых руд на основе создания замкнутых технологических систем/А.И. Алексеев// Записки Горного института. –2015. –№215. –С.75-82.
4. Алексеева, Л. П. Механическое смешение реагентов с обрабатываемой водой/ Л. П. Алексеева, В. Л. Драгинский, А. В. Моисеев// Водоснабжение и санитарная техника. –2001. –№ 3. –С. 16-19.
5. Алексеева, Л. П. Оценка эффективности применения оксихлорида алюминия по сравнению с другими коагулянтами / Л. П. Алексеева / Водоснабжение и сан. техника. – 2003. – 477 с.
6. Алфёрова, А.А. Замкнутые системы водного хозяйства промышленных предприятий, комплексов и районов / А.А. Алфёрова. – М.: Стройиздат, 1987. – 272 с.
7. Андреева, Н.А. Химия цемента и вяжущих веществ: учеб. пособие / Н.А. Андреева. – СПб.: СПбГАСУ, 2011. – 46 с.
8. Антонов, Н.В. «Комплекс гидротехнических сооружений на месторождении им. М. В. Ломоносова ОАО «Севералмаз». [Электронный ресурс]. – Режим допуска: <http://elib.spbstu.ru/dl/2/7078.pdf/download/7078.pdf?lang=en>.
9. Бауман, А.В. Сгущение и водооборот. Комплексные решения «НОУ-ХАУ» / А.В. Бауман. – Новосибирск, Гормашэкспорт, 2011. – 52 с.
10. Бахарев, В.А. Очистка оборотной воды алмазодобывающего предприятия в хвостохранилище акустическим способом / В.А. Бахарев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 8. – С. 77–85.
11. Белов, С.В. Карбонатиты и кимберлиты (взаимоотношения, минералогия, прогноз)/ С.В. Белов, А.А. Бурмистров, Н.Н. Зинчук, А.В. Лапин, А.В. Толстов, А.А. Фролов. –М.: НИИ-Природа, 2005. – 540 с.
12. Бересневич, П.В. Охрана окружающей среды при эксплуатации хвостохранилищ/П.В. Бересневич, П.К. Кузьменко, Н.Г. Неженцева – М.: Изд-во Недра, 1993. – 128 с.
13. Бетехтин, А.Г. Курс минералогии / А.Г. Бетехин. – М.: Гос. изд-во геологич. лит-ры, 1951. – 543 с.

14. Бовкун, А.В. Основные достижения лаборатории месторождений алмаза геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова в исследовании минералогии кимберлитов Архангельской алмазоносной провинции (1980–2010 гг.) / А.В. Бовкун, В.К. Гаранин // Сборник публикаций по результатам V и VI ежегодных научных чтений им. Г.П. Кудрявцевой. – М.: Изд. Институт прикладной минералогии, 2013. – С. 29–44.
15. Буланов, Е.Н. Рентгенография. Физические основы метода и практическое приложение. Электронное учебно-методическое пособие / Е.Н. Буланов. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2014. – 49 с.
16. Бутт, Ю. М. Химическая технология вяжущих материалов / Ю. М. Бутт, М. М. Сычев, В. В. Тимашев. – М.: Высшая школа, 1980. – 472 с.
17. Вейцер, Ю. И. Осаждение коагулирующих суспензий / Ю. И. Вейцер, З. А. Колобова // Сборник научных трудов АКХ. Водоснабжение. – М., 1960. – № 1. – С. 56–72.
18. Вержак, В.В. Сапонит из месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова/ В.Н. Аполлонов, В.В. Вержак, К.В. Гаранин, В.К. Гаранин, Г.П. Кудрявцева, В.Г. Шлыков//Геология и разведка. –2003.– № 3. – С. 64–73.
19. Волженский, А. В. Минеральные вяжущие вещества: технология и свойства: учебник для вузов / А. В. Волженский, Ю. С. Буров, В. С. Колокольников. – М.: Стройиздат, 1979. – 476 с.
20. Галкин, Ю.Ю. Фазовый анализ структуры цементного камня, изолированного при его раннем нагружении / Ю.Ю. Галкин, С.А. Удодов // Транспортные сооружения. – 2018. – №1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://t-s.today/PDF/21SAT5118.pdf>.
21. Гаранин, В.К. Введение в минералогии алмазных месторождений/ В.К. Гаранин. – М.: Изд-во МГУ, 1989. – 200 с.
22. Гершенкоп, А.Ш. Переработка техногенного сырья Кольского полуострова/ А.Ш. Гершенкоп, // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2010. №1. –С. 4–8.
23. Головных, Н. В. Использование техногенных отходов в глиноземном производстве при переработке нефелинового сырья / Н. В. Головных, И. И. Шепелев, А. Г. Пихтовников, С. Н. Горбачев // Цветные металлы. – 2012. – № 5. – С. 84–88.
24. Горкин, А.П. География. Серия: Современная иллюстрированная энциклопедия / А.П. Горкин. – М.: Росмэн, 2006. – 624 с.
25. Григорьева, Л.В. Применение грубодисперсных порошков в процессах осветления воды / Л.В. Григорьева, С.П. Романова, В.В. Далидович // Неделя науки-2016: сб. тез. VI науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (с междунар. участием), 30 марта – 1 апр. 2016. – СПб., 2016. – С. 238.

26. Гулиева, Н.М. Химический анализ и физические свойства природного минерала – сапонита/Н.М. Гулиева//НАУКОВІ НОТАТКИ. –2014.–№ 44. – С. 78–82.
27. Дементьев, Ю.А. Электролитная коагуляция сапонитосодержащих глинистых минералов/Ю.А. Дементьев, А.М. Айзенштадт, А.Л. Невзоров, М.А. Айзенштадт, А.С. Тутыгин//Наука северному региону (сборник трудов). –2010. – №83. – С. 129–136.
28. Драгинский, Я.Л. Коагуляция в технологии очистки природных вод/ Я.Л. Драгинский, Л. П. Алексеева. – М.: Науч. изд, 2005. – 576 с.
29. Егоров, А.П. Общая технология неорганических веществ: учеб. пособие для учащихся техникумов / А. П. Егоров, А. И. Шерешевский, И. В. Шманенков. – М.: Химия, 1964. – 688 с.
30. Запольский, А.К. Коагулянты и флокулянты в процессах очистки воды: Свойства. Получение. Применение /А.К. Запольский, А.А. Баран. – Л.: Химия, 1987. – 204 с.
31. Захаров, В.И. Разработка и усовершенствование технологии получения очищенного нефелинового коагулянта. / В.И. Захаров, В.А. Матвеев, Д.В. Майоров// Научно-технический прогресс в производственном объединении «Апатит», 1989, Ч. II, – С. 81-87.
32. Зубкова О.С. Усовершенствование технологии обогащения сапонитовой руды в процессе добычи алмазов / А.И. Алексеев, О.С. Зубкова, А.С. Полянский // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2020. – № 1. – С. 74–80.
33. Зубкова, О.С. Анализ и инновационный выбор сырьевых источников производства серной кислоты/ О.С. Зубкова, Д.А. Алферова// Сборник докладов III круглого стола «Высокие технологии: потенциал и перспективы». – 2018. – С.72-75.
34. Зубкова, О.С. Инновационное развитие технологии сорбционной очистки воды с применением модифицированных углеродсодержащих сорбентов/ О.С. Зубкова, О.О. Конончук// Сборник докладов II круглого стола: «Высокие технологии: потенциал и перспективы». – 2016. – С.24-26.
35. Зубкова, О.С. Инновационное решение экологических проблем комплексной переработки сапонитовой руды // Сборник статей международной научно-практической конференции «Научно-технический потенциал как основа социально-экономического развития» (28 февраля 2018 г., г. Москва). – 2018. – С.425-431. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://impulse-science.ru/wp-content/uploads/2018/03/K-14.pdf>.
36. Зубкова, О.С. Инновационные методы расчета термодинамических величин оксихлорида алюминия/ О.С. Зубкова, О.О. Конончук, А.В. Лопатина// Сборник докладов II круглого стола: «Высокие технологии: потенциал и перспективы». – 2016. – С.36-38.

37. Зубкова, О.С. Инновационные подходы к очистке карьерных и подотвальных вод при добыче алмазов// Сборник докладов III круглого стола «Высокие технологии: потенциал и перспективы». – 2018. – С.148-152.
38. Зубкова, О.С. Оценка применения реагентного способа очистки карьерных сапонитсодержащих вод Ломоносовского горно-обогатительного комбината г. Архангельска/ О.С. Зубкова, А.И. Алексеев// Сборник статей двадцать девятой международной научной конференции «ТЕХНОКОНГРЕСС». – 2018. – С.3-9.
39. Зубкова, О.С. Повышение экологичности добычи алмазов за счёт анализа химического состава кимберлитовой руды и прогнозирования её алмазоносности / О.С. Зубкова, А.И. Алексеев, И.Н. Киваев // Научное обозрение. – 2017. – №22. – С. 119–122.
40. Зубкова, О.С. Повышение экологичности добычи алмазов за счёт анализа химического состава кимберлитовой руды и прогнозирования её алмазоносности / О.С. Зубкова, А.И. Алексеев, И.Н. Киваев – Текст: электронный// Международный научно-исследовательский журнал «Успехи современной науки». – 2018. – №1. – С.13-17. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.modernsciencejournal.org/release/2018/USN_2018_1.pdf.
41. Зубкова, О.С. Разработка экономически эффективной технологии очистки воды на основе комплексной переработки сапонитовой руды с применением оксихлоридного коагулянта – Текст: электронный / О.С. Зубкова, А.В. Лопатина// Международный научный журнал «Инновационное развитие». – 2017. – № 5. – С.20-26. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://xn---7sbe2acjpbjdjw0d5c.xn--p1ai/file/arhiv/ir/ir-5-2017.pdf>.
42. Зубкова, О.С. Разработка экономически эффективной технологии очистки воды с использованием кальцийалюмосиликатного реагента для алмазодобывающего горно-обогатительного предприятия/ О.С. Зубкова, А.И. Алексеев// Сборник трудов XII Санкт-Петербургского конгресса (Санкт-Петербург, 12 – 30 ноября 2018 г.). – 2018. – С.90-92.
43. Зубкова, О.С. Химико-технологические основы получения и применения оксихлоридного коагулянта – Текст: электронный/ О.С. Зубкова, А.И. Алексеев, А.В. Лопатина// Научная дискуссия: инновации в современном мире. Сборник статей по материалам LXVI междунар. науч.-практ. конф. – 2017. – №6(65). – С.12-20. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.internauka.org/archive2/inno/6%2865%29.pdf>.
44. Иванов, А.К. Исследование агрофизических свойств субстратов на основе торфа и хвостов обогащения кимберлитов месторождении алмазов им. М. В. Ломоносова/ А.К. Иванов, А.И. Денисова, Е.Н. Наквасина// Горный журнал. – 2012.– №7. –С. 91–95.

45. Иванов, А.К. Результаты экологического мониторинга на месторождении алмазов им. М. В. Ломоносова/ А.К. Иванов// Горный журнал. –2012.– № 7. – С. 89–90.
46. Иванов, И.Н. История становления и современное состояние ОАО «Севералмаз» / И.Н. Иванов, С.Н. Белый // Горный журнал. – 2012. – № 7. – С. 5–8.
47. Карпенко, Ф.С. Условия накопления сапонитсодержащих осадков и технология их сгущения в хвостохранилище месторождения алмазов им. М. В. Ломоносова: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук: 25.00.08 / Федор Сергеевич Карпенко. – М., 2009. – 36 с.
48. Ковкова, Т.М. Проблемы осаждения тонкодисперсных глинистых материалов в хвостохранилище ОАО «Севералмаз»/ Т.М. Ковкова, А.М. Костров, В.В. Коленченко, С.А. Уваров, П.П. Зайков// Обогащение руд. – 2010. –№2. – С. 49-50.
49. Конкурс инновационных проектов АК «АЛРОСА». «Экономически рентабельное экологически безопасное обесшламливание оборотных вод обогатительной фабрики № 1 Ломоносовского горно-обогатительного комбината ОАО «Севералмаз» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.severalmaz.nl/work/mil.php>.
50. Конспект лекций по курсу «Флотационные методы обогащения». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studfiles.net/preview/5678949/page/6/>.
51. Коршунов, А.А. Моделирование геофильтрационных процессов в ограждающей дамбе хвостохранилища/ А.А. Коршунов, А.Л. Невзоров, С.А. Уваров// Сергеевские чтения. Моделирование при решении геологических задач. –2009. – С. 361-364.
52. Кузин, Е.Н. Технология коагулянтов на основе отходов апатит - нефелиновой флотации в инженерной защите объектов окружающей природной среды.: дис. ... канд. техн. наук:05.17.01/Евгений Николаевич Кузин.–М., 2015. – 168 с.
53. Левин, Б.В. Комплексная переработка минерального сырья - стратегическое направление развития горно-перерабатывающего комплекса России /Б.В. Левин// Современные проблемы природопользования. Апатиты: Наука, 2005. – С. 28–40.
54. Лурье, Ю.Ю. Аналитическая химия промышленных сточных вод/ Ю.Ю. Лурье. –М.: Химия, 1984. – 448 с.
55. Маилова, Ф. Х. кзы. Исследование эффективности коагулянтов в процессе очистки воды с целью организации элективного курса в профильных классах по химии: ВКР ... по спец. 44.03.05. Пед. образование профиль. Биология, химия / Ф. Х. Маилова; науч. рук. Е. М. Попова. – Тобольск: Тюм. гос. ун-т, Тобол. пед. ин-т им. Д.И. Менделеева 2016. – 72 с.
56. Макарова, И.А. Физико-химические методы исследования строительных материалов: учеб. пособие / И.А. Макарова, Н.А. Лохова. – Братск. БрГУ, 2011. – 139 с.

57. Меньшиков, И.Н. Коллоидно-химические свойства частиц железа, модифицированных полифторированным диалкилдисульфидом: диссертация кандидата химических наук: 02.00.11 / Иван Никитич Меньшиков. – СПб., 2015. – 102 с.
58. Милашев, В.А. Петрохимия кимберлитов Якутии и факторы их алмазоносности/ В.А. Милашев - Л.: Изд-во Недра, 1965. -176 с.
59. Миненко, В.Г. Обоснование и разработка электрохимического метода извлечения сапонита из оборотной воды/ В.Г. Миненко// Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. –2014.– № 3. – С. 180–186.
60. Михеев, В.И. Рентгенометрический определитель минералов / В.И. Михеев. – М.: Гос. науч.-техн. изд-во лит. по геологии и охране недр. – 833 с.
61. Монастырский, В.Ф. Выбор технологических схем переработки и обогащения алмазосодержащих руд / В.Ф. Монастырский, Г.П. Двойченкова, Г.П. Зуев, С.О. Луйк // Вестник Якутского государственного университета. – 2006. – Т. 2. – Вып. 4. – С. 38–43.
62. Наквасина, Е.Н. Влияние сапонитсодержащих хвостов обогащения кимберлитов на состав торфяных субстратов/ Е.Н. Наквасина, О.Н. Земцовская, А.И. Денисова//Arctic Environmental Research. –2015.– № 2. – С. 65–72.
63. Наквасина, Е.Н. Применение сапонит-содержащих материалов в качестве минерального удобрения при выращивании картофеля в Архангельской области / Е.Н. Наквасина// Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2019.– №1. – С. 60-68.
64. Настенко, А.О. Современные коагулянты и флокулянты в очистке природных и сточных вод / А.О. Настенко, О.И. Зосуль // Международный студенческий научный вестник. – 2015. – № 3. – С. 21–24.
65. Об исчислении и взимании платы за негативное воздействие на окружающую среду» (вместе с «Правилами исчисления и взимания платы за негативное воздействие на окружающую среду»): Постановление Правительства РФ № 255 от 03.03.2017.
66. Об охране окружающей среды: федер. закон № 7-ФЗ от 10.01.2002.
67. Облицов, А.Ю. Утилизация отходов обогащения алмазоносной руды месторождения имени М.В. Ломоносова: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.36 / Антон Юрьевич Облицов. – СПб., 2012. – 161 с.
68. Осипов, В.И. Принципы размещения и экологической безопасности хвостохранилища Поморского ГОКа/ В.И. Осипов, А.А. Чистяков, Ф.Г. Касаткин// Геоэкология. –1994.– № 1. – С. 28–43.

69. Официальный web-site truff.info. Интегрированная база данных спектров комбинационного рассеяния, данных дифракции рентгеновских лучей и химии для минералов. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://truff.info>.
70. Официальный web-site ПАО «Севералмаз» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.severalmaz.ru/investoram/godovye-otchety/>.
71. Официальный web-site ПАО «Севералмаз». Годовой отчет ПАО «Севералмаз» за 2012 год. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.severalmaz.ru/investoram/godovye-otchety/>.
72. Официальный web-site ПАО «Севералмаз». Годовой отчет ПАО «Севералмаз» за 2018 год. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.severalmaz.ru/investoram/godovye-otchety/>.
73. Патент 2448052 Российская Федерация, МПК C02F 1/52 (2006.01), C02F 103/10 (2006.01). Способ сгущения сапонитовой суспензии: № 2010146180/05: заявл. 08.11.2010; опубл. 20.04.2012. Бюл. № 11 / Утин А.В.; заявитель и патентообладатель Утин А. В. – 5 с.
74. Патент 2675871 Российская Федерация. МПК C02F1/52, B01D21/01, C02F101/10, C02F103/10. Способ осаждения сапонитовой пульпы с применением кальцийалюмосиликатного реагента: № 2017136638: заявл. 17.10.2017; опубл. 25.12.2018, Бюл. №36 / Зубкова О.С., Алексеев А.И., Бричкин В.Н., Конончук О.О. // заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский горный университет. – 9 с.
75. Патент 2683082 Российская Федерация, МПК C01B 33/24; C02F 1/52. Способ получения кальцийалюмосиликатного неорганического коагулянта: № 2018120250; заявл. 31.05.2018; опубл. 26.03.2019, Бюл. №9 / Зубкова О.С., Алексеев А.И., Бричкин В.Н. // заявитель Санкт-Петербургский горный университет. – 10 с.
76. Патент № 2669272 Российская Федерация, МПК C02F 9/04 (2006.01), C02F 1/52 (2006.01), B01D 21/01 (2006.01), C02F 101/10 (2006.01), C02F 103/10 (2006.01). Способ сгущения сапонитовой суспензии: №2018101348: заявл.: 15.01.2018: опубл. 09.10.2018. Бюл. № 28 / Алексеев А.И., Бричкин В.Н., Зубкова О.С., Конончук О.О.; заявитель Санкт-Петербургский горный университет. – 9 с.
77. Пашкевич, М.А. Экологический мониторинг: Учебное пособие / М.А. Пашкевич, В.Ф. Шуйский. Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет). –СПб, 2002. – 89 с.
78. Петров, В.П. Каолиновые месторождения СССР / В.П. Петров // Каолиновые месторождения и их генезис. – М., 1968. – С. 7–12.

79. Плановский, А.Н. Процессы и аппараты химической технологии / А.Н. Плановский, В.М. Рамм, С.З. Каган. – М.: Госхимиздат, 1962. – С. 243–244.
80. Посухова, Т.В. Отходы алмазодобывающей промышленности: минеральный состав и способы утилизации / Т.В. Посухова, С.А. Дорофеев, К.В. Гаранин, Гао Сяоин // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. – 2013. – № 2. – С. 38–48.
81. Приготовление растворов флокулянтов. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://floculant.ru/content/files/Teoriya_primeneniya.pdf.
82. Прокопенко, А.В. Исследования института «Иргиредмет» в области обогащения алмазосодержащих руд месторождения им. М. В. Ломоносова/ А.В. Прокопенко, Т.В. Баранова, В.В. Коленченко// Горный журнал. – 2012. – №7. – С. 61–63.
83. Рабинович, В.А. Краткий химический справочник / В.А. Рабинович, З.Я. Хавин. – Л.: Химия, 1977. – 392 с.
84. Равич, Б. М. Комплексное использование сырья и отходов/ Б.М. Равич, В.П. Окладников, В.Н. Лыгач, М.А. Менковский. –М.: Химия, 1988. – 287 с.
85. Разработка технологии очистки воды для обогатительной фабрики Ломоносовского ГОКа ПАО «Севералмаз» от взвешенных веществ с применением кальцийалюмосиликатного реагента: отчёт о научно-исследовательской работе: х/д №153-03-19-СА / Санкт-Петербургский горный университет; рук. Алексеев А.И.; исполн.: О.С. Зубкова, М.М. Залилова. – СПб., 2019. – 51 с.
86. Рекомендации по применению коагулянта «Аква-Аурат» и приготовлению его водных растворов. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vagner-ural.ru/uploadedFiles/images/Filtr%20material/akva-aurat-30-instrukciya.pdf>.
87. СанПиН 2.1.5.980-00. Гигиенические требования к охране поверхностных вод. – М., 2000.
88. Сизяков, В.М. Синтез и физико-химические свойства гидрокарбоалюмината кальция / В.М. Сизяков, Г.М. Высоцкая, Д.И. Цеховольская // Цветные металлы. –1974. –№ 9. –С. 28–30.
89. Сизяков, В.М. Нефелиновое сырьё / В.М. Сизяков, Н.С. Шмаргуненко, М.Н. Смирнов. –М.: Наука, 1978. –236 с.
90. Сизяков, В.М. Повышение комплексности переработки нефелинового сырья на основе содовой конверсии белитового шлама / В.М. Сизяков, В.Н. Бричкин, Р.В. Куртенов // Обогащение руд. –2016. –№1.– С. 54–59.
91. Скирдов, И. В. Очистка сточных вод в гидроциклонах / И.В. Скирдов. –М.: Стройиздат, 1975. – 100 с.

92. Скопинцев, Б. А. Коагуляция природных вод сернокислым алюминием при низких температурах / Б. А. Скопинцев, М. Т. Голубева // Водоснабжение и санитарная техника. – 1938. – № 10. – С. 45-54.
93. Тарасов, Р.В. Анализ возможности повышения термической стойкости материалов при комбинировании глин и шлаков в жаростойких композициях / Р.В. Тарасов, Л.В. Макарова, А.А. Батынова // Современные научные исследования и инновации. – 2015. – № 2. – Ч. 2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://web.snauka.ru/issues/2015/02/46911>.
94. Тендеры: проектирование в строительстве гидротехнических сооружений. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: rostender.info/category/tendery-oao-severalalmaz-11519?yclid=1646670218394630560.
95. Ткачев, К.В. Технология коагулянтов/ К.В. Ткачев, А.К. Запольский, Ю.К. Кисиль. –Л.: Химия, 1977. –184 с.
96. Устинов, В.Н. Месторождение им. М. В. Ломоносова: Геологическое строение и алмазоносность/ В.Н. Устинов, С.И. Митюхин// Горный журнал. –2012. –№7. – С. 18–24.
97. Фекличев, В.Г. Диагностические константы минералов: справочник/ В.Г. Фёкличев. – М.: Недра, 1989. – 228 с.
98. Фортыгин, В.С. Из истории открытия Архангельской алмазоносной провинции/ В.С. Фортыгин, В.А. Ларченко, Н.Ф. Пылаев// Горный журнал. – 2012. –№7. –С. 9–11.
99. Чантурия, В.А. Особенности фазового минералогического состава поверхности алмазных кристаллов, извлекаемых из хвостов обогащения алмазосодержащего сырья/ В.А. Чантурия, О.Е. Ковальчук, Г.П. Двойченкова//Инновации и инвестиции. – 2013. –№7. – С. 264–267.
100. Чертес, К.Л. Рекультивация отработанных карьеров/ К.Л. Чертес, Д.Е. Быков// Экология и промышленность России. –2002. – №2. – С. 18–22.
101. Чистяков, А.А. Процессы структурообразования и консолидации техногенных сапонитовых осадков (в связи с созданием хвостохранилища Поморского ГОКа): автореф. ... дис. канд. геол.-минерал. наук: 04.00.07 / Алексей Андреевич Чистяков. – М., 1994. – 24 с.
102. Чуркина (Зубкова), О.С. Исследования химизма (механизма) сорбции катионов железа (III) углеродсодержащими соединениями / О.С. Чуркина (Зубкова), А.И. Алексеев, П.В. Голубев // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2016. – № 36(62). – С. 48–51.

103. Шендерович, Е.М. Развитие технологии обогащения алмазосодержащих руд месторождения им. М. В. Ломоносова/ Е.М. Шендерович, И.В. Белевич, А.М. Костров, Ю.Л. Самофалов, А.Ф. Махрачев// Горный журнал. – 2012. – №7. – С. 54-57.
104. Шпилевая, Д.В. Геологическое строение, минеральный состав и эколого-экономические аспекты освоения трубки Архангельская: месторождение алмазов им. М.В. Ломоносова: дис. ... канд. геол.-минерал. наук: 25.00.11 / Дарья Владимировна Шпилевая. – М., 2008. – 150 с.
105. Bratby, John. Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment/ John Bratby. Second Edition. Published by IWA Publishing, –2006. – PP. 450.
106. Ovenden, Ch. Flocculation behaviour and mechanisms of cationic inorganic micro-particle /polymer systems/ Ch. Ovenden, X. Huining / Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2002. Vol. 197 (1–3). PP. 225–234.
107. Ukiwe, Lugard. Nwoko, C.I.A. Okere-Chijioke, M. Kinetic Study of Aluminum Sulphate and Ammonium Aluminum Sulphate Coagulants in Wastewater Treatment/ Lugard Ukiwe, C.I.A. Nwoko, M Okere-Chijioke// Journal of Advances in Chemistry. –2013. – Volume. 3. №3. –pp. 222–228. DOI: <https://doi.org/10.24297/jac.v3i3.924>.
108. Zubkova, O.S. Influence of the development of the mineral resources sector of the Arkhangelsk region on the environment – Text: electronic/ A.I. Alexeev, O.O. Kononchuk, O.S. Zubkova // Innovation-Based Development of the Mineral Resources Sector: Challenges and Prospects. 11th conference of the Russian-German Raw Materials. – 2018. – № 11. – pp. 437-447.
109. Zubkova, O.S. Research of combined use of carbon and aluminum compounds for wastewater treatment/ O.S. Zubkova, A.I. Alekseev, M.M. Zalilova // Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. [Russ. J. Chem. & Chem. Tech.]. – 2020. – Volume 63. №4. – pp. 86-91.
110. Zubkova, O.S. Scientific Background for Processing of Aluminum Waste / O.S. Zubkova, O.O. Kononchuk, A.I. Alekseev, V.I. Udovitsky//EDP Sciences - Web of Conferences. IInd International Innovative Mining Symposium (Devoted to Russian Federation Year of Environment). – Volume 21. – pp. 1-8.
111. Zubkova, O.S. Complex processing of saponite waste of a diamond-mining enterprise/ A.I. Alexeev, O.S. Zubkova// Journal of Mining and Geological sciences. –2019. – Volume 62. № 2. – pp.183-188.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акт отбора автолитовой брекчи с месторождения им. Ломоносова, г. Архангельска



ПАО «СЕВЕРАЛМАЗ»

Россия, 163006, Архангельск, ул. Карла Маркса, д.15,
Тел.: (812) 65-75-07, тел./факс: (812) 65-75-27
e-mail: severalmaz@severalmaz.ru

10 ноября 2017 года

В 3-х экземплярах
п. Светлый

АКТ

об отборе пробы автолитовой брекчи

Комиссия в составе:

Заместитель начальника ЦТК ЛГОКа – А.В. Филин
Мастер СР – А.В. Соколюк
Мастер ЦТК ЛГОКа – Е.А. Мелюкова

Составили настоящий акт о том, что:

28 октября 2017 года произведен отбор проб автолитовой брекчи трубок Архангельской (координаты отбора пробы: $x = 262431$, $y = 510540$, $z = -65$, блок А-3-В) и им. Карпинского-1 (координаты отбора пробы: $x = 262494$, $y = 510691$, $z = -15$, блок К-3-В). Руда была подвергнута истиранию, класс -1 мм упакован в 4 (четыре) пластиковые бутылки объемом 1,5 л каждая, а класс +1 мм упакован в 2(два) мешка и опломбирован (тр. Архангельская - пломба №5743771, тр. Карпинского-1 – пломба №5743772).

Комиссией произведен полный просмотр отобранных проб на предмет наличия алмазов в пластиковых бутылках и мешках.

Видимых алмазов в приготовленных пробах не обнаружено.

Сухой вес материала класса +1 мм составляет:

проба №1 тр. Архангельская – 4,65кг;

проба №2 тр. Карпинского-1 – 3,66кг.

Выше указанные пробы будут отправлены в Горный Университет г. Санкт-Петербурга для научно-исследовательских работ.

Члены комиссии:

Заместитель начальника ЦТК ЛГОКа

Мастер СР

Мастер ЦТК ЛГОКа

А.В. Филин

А.В. Соколюк

Е.А. Мелюкова

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акт отбора автолитовой брекчии с месторождения им. Ломоносова, г. Архангельска



СЕВЕРАЛМАЗ

ПАО «СЕВЕРАЛМАЗ»

Россия, 163000, Архангельск, ул. Карла Маркса, д.15.
Тел.: (8182) 65-75-07; тел./факс: (8182) 65-75-27
e-mail: sevalmaz@severalmaz.ru

24 января 2017 года

п. Светлый

АКТ

об отборе пробы автолитовой брекчии

Комиссия в составе:

Начальник ЦТК ЛГОКа – Л.В. Мельниченко
Главный геолог ЛГОКа – В. Ким
Мастер СР – М.Ю. Кутузов
Мастер ЦТК – Н.С. Тихон

Составили настоящий акт о том, что:

24 января 2017 года произведен отбор проб автолитовой брекчии (содержание сапонита 40-80%) трубок им. Карпинского-1 горизонт -6 и Архангельской горизонт -54. Руда была подвергнута истиранию, класс-1мм упакован.

Комиссией произведен полный просмотр отобранной пробы в количестве 2 (двух) пластиковых бутылок, объемом 5 литров каждая, на предмет наличия алмазов. Видимых алмазов в приготовленной пробе не обнаружено.

Выше указанная проба будет отправлена в г. Санкт-Петербург Горный Университет для научно- исследовательских работ.

Члены комиссии:

Мастер ЦТК

Мастер СР

Главный геолог ЛГОКа

Начальник ЦТК ЛГОКа

Н.С. Тихон

М.Ю. Кутузов

В.Ким

Л.В. Мельниченко

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Гистограмма гранулометрии слива с классификаторов спиральных наклонных

2017.03.22 12:32:48



LA-950 Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer
 Horiba LA950 for Windows (Net) Ver7.20

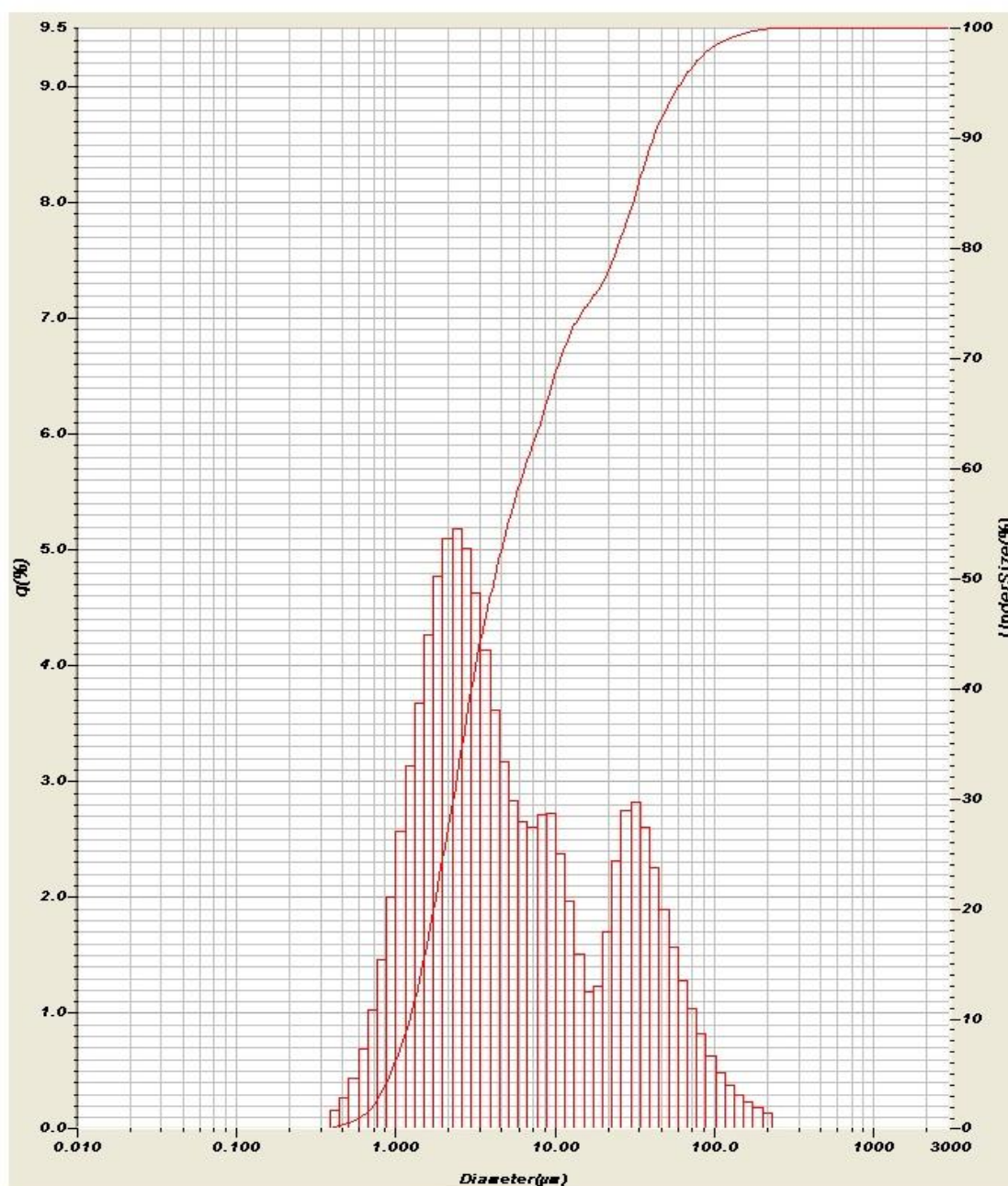
ID# : 201703200929956
 Sample Name : koag-3
 Material :
 Lot Number :
 Data Name : 201703200929956

Circulation Speed : 10
 Ultrasonic Time : 1 min.
 Ultrasonic Power : 7
 Agitation Speed : 10

Median Size : 4.15539(μm)
 Mean Size : 14.78573(μm)
 Mode Size : 2.4252(μm)
 Std.Dev. : 24.6593(μm)

Refractive Index (R) : Fraunhofer Kernel(Fraunhofer Diffraction Sample(0.000 - 0.000i),Fraunhofer Diffraction Sai
 Refractive Index (B) : Fraunhofer Kernel(Fraunhofer Diffraction Sample(0.000 - 0.000i),Fraunhofer Diffraction Sai

Contribute % on Diameter



ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Акт отбора образцов (проб) карьерной воды Ломоносовского ГОКа, г. Архангельск



ПУБЛИЧНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«СЕВЕРАЛМАЗ»

Промышленная лаборатория ПАО "Севералмаз"

Юридический адрес: 163000, г. Архангельск, ул. Карла-Маркса, д.15

Фактический адрес: Архангельская область, Приморский район, вахтовый поселок Светлый, строение 100

тел. +7(8182)65-75-07, факс +7(8182)65-75-27

АКТ №
отбора образцов (проб)
от "10" ноября 2018 г.

Наименование предприятия, организации (заявителя):

Ломоносовский ГОК

Адрес юридический, телефон:

Адрес фактический:

п. Светлый

Структурное подразделение:

Участок карьерного водоотлива

Объект исследования:

вода карьеров тр Карпинского1 и тр. Архангельская, поля фильтрации вод карьерного водоотлива

Цель отбора проб:

Исследования на осаждаемость и уплотнение осадка

НД на метод отбора проб:

Климатические условия окружающей среды на месте отбора проб:

Температура
воздуха, °С

1

Влажность воздуха, %

87

Давление:

752 мм рт.с

Условия отбора проб:

нет

Условия транспортировки проб:

нет

Дата отбора:

10.11.2017

Время отбора:

16-30

Дата доставки:

10.11.2017

Время доставки:

17-00

Сведения о консервации:

Особые пометки, дополнительные сведения:

Маркировка пробы при отборе	Время отбора	Наименование пробы	Точка и место отбора	Объем пробы, л	Материал емкости для отбора проб	Определяемые показатели
б/м	15-30	вода	Зумпф водоотлива карьера тр. Карпинского1	5	ПЭТ	
б/м	15-50	вода	Зумпф водоотлива карьера тр. Архангельской	5	ПЭТ	
б/м	16-30	вода	Выход с полей фильтрации	5	ПЭТ	

Ф.И.О., должность лица, производившего отбор проб:

Дерябина Е.А. Лаборант

(наименование должности)

Ф.И.О., должность представителя, присутствующего при отборе:

Яркулов Б.К. мастер УВО

(наименование должности)

Ф.И.О., должность лица, принявшего пробу

Климец Г.Н. зам. директора по

производству

(наименование должности)

Дерябина Е.А. 1

(расшифровка подписи)

Яркулов Б.К. 1

(расшифровка подписи)

Климец Г.Н. 1

(расшифровка подписи)

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Акт о промышленном опробовании результатов кандидатской диссертационной работы

Утверждаю:

Генеральный директор

ПАО «Севералмаз»

А.В. Письменный

«14» 06 2019 г.

АКТ

о промышленном опробовании
результатов кандидатской диссертационной работы
Зубковой Ольги Сергеевны

«Комплексная переработка сапонитовых руд с добавкой щелочного алюмосиликатного сырья»

Комиссия в составе:

Председатель: Начальник обогатительного комплекса ПГРЭ

Б.С. Шильников

Члены комиссии: Начальник ОФ Ломоносовского ГОКа

А.В. Бондарев

Главный инженер ОФ Ломоносовского ГОКа

В.А. Шестаков

составили настоящий акт о том, что в промышленных условиях проведены испытания способа очистки дренажных (карьерных) вод, оборотной воды Обогащительной фабрики, сгущение хвостовой пульпы ПАО «Севералмаз» с применением кальцийалюмосиликатного реагента.

Сравнительные испытания дренажных (карьерных) вод с применением кальцийалюмосиликатного реагента, сернокислого алюминия, оксихлоридного коагулянта, анионного флокулянта показали:

— эффективность очистки по взвешенным веществам (мутность) составила в среднем 80% для кальцийалюмосиликатного реагента, 81,9% для сернокислого алюминия, 82,9% для оксихлоридного коагулянта, 79,7% для анионного флокулянта.

Установлено, что осаждение взвешенных веществ в оборотной воде Обогащительной фабрики начинается с концентрацией твёрдого от 50-60 г/л, уровень чистой воды для коагулянта сернокислого алюминия – 3 см, коагулянта оксихлорида – 2,3 см, кальцийалюмосиликатного реагента – 0,7 см, анионного флокулянта – 5,5 см. Плотность осажённой части для кальцийалюмосиликатного реагента, сернокислого алюминия, оксихлоридного коагулянта, анионного флокулянта составила 1,04 г/см³.

Сравнительные испытания оборотной воды Обогащительной фабрики с применением кальцийалюмосиликатного реагента, сернокислого алюминия, оксихлоридного коагулянта, анионного флокулянта показали, что осаждение твёрдого в оборотной воде, наиболее эффективно в диапазоне концентрации твёрдого от 30-40 г/л, уровень чистой воды для коагулянта сернокислого алюминия и кальцийалюмосиликатного реагента составил – 3 см, оксихлоридного коагулянта – 11 см, анионного флокулянта – 7 см. Плотность осажённой части для кальцийалюмосиликатного реагента, сернокислого алюминия, оксихлоридного коагулянта, анионного флокулянта составила 1,03 г/см³.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что использование предложенного способа очистки дренажных (карьерных) вод, оборотной воды с применением кальцийалюмосиликатного реагента позволяет очистить воду от взвешенных веществ и уплотнить осадок.

Результаты исследовательской работы позволяют использовать предлагаемое техническое решение при выполнении КТЭО строительства узла сгущения хвостов Обогащительной фабрики Ломоносовского ГОКа.

Председатель: Начальник обогатительного комплекса ПГРЭ

Б.С. Шильников

Члены комиссии: Начальник ОФ Ломоносовского ГОКа

А.В. Бондарев

Главный инженер ОФ Ломоносовского ГОКа

В.А. Шестаков

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Акт о внедрении в учебный процесс

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по образовательной
деятельности
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
горный университет»
д.т.н., профессор А.П. Господариков

« 27 » 04 2018 г.

АКТ

внедрения в учебный процесс
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет»
результатов диссертационной работы Зубковой Ольги Сергеевны
«Комплексная переработка сапонитовых руд с добавкой щелочного
алюмосиликатного сырья»

Результаты диссертационной работы Зубковой Ольги Сергеевны «Комплексная переработка сапонитовых руд с добавкой щелочного алюмосиликатного сырья» внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет».

Для обучения студентов по направлению подготовки 18.03.01 «Химическая технология» по специальности «Химическая технология неорганических веществ» разработана виртуальная лабораторная работа «Исследование вязкости различных жидкостей методом Стокса» в рамках курса «Общая химическая технология».

Виртуальная лабораторная работа представляет собой программу для ЭВМ, позволяющую определить вязкости основных технологических жидкостей и растворов обогатительных фабрик (карьерная вода, промывные воды), НПЗ (нефть легкая, нефть тяжелая, бензин, керосин, моторное масло SAE 10, моторное масло SAE 40, мазут) и предприятий химической промышленности (медно-аммиачные растворы травления печатных плат, промывные воды).

На основе данных, полученных при работе над диссертацией, составлен алгоритм для написания программы для ЭВМ. При тестировании программы для ЭВМ установлено соответствие значений вязкости, получаемых в ходе виртуальной лабораторной работы экспериментально полученным значениям вязкости промышленных растворов и жидкостей.

Декан факультета
переработки минерального сырья
д.т.н., профессор

В.Ю. Бажин

Заведующая кафедрой
химических технологий
и переработки энергоносителей
д.т.н., профессор

Н.К. Кондрашева