

На правах рукописи



ПОДКАМЕННЫЙ ЮРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ИЗВЛЕЧЕНИЯ АЛМАЗОВ В УСЛОВИЯХ ЛИПКОСТНОЙ
СЕПАРАЦИИ НА ОСНОВЕ КОМБИНИРОВАННОГО
ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО И УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

Специальность 25.00.13 – «Обогащение полезных ископаемых»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова
Российской академии наук (ИПКОН РАН) и Научно-исследовательском
геологическом предприятии Акционерной Компании «АЛРОСА»
(НИГП АК «АЛРОСА»)

Научный руководитель:

Двойченкова Галина Петровна, доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории «Теория разделения минеральных компонентов» отдела «Проблем комплексного извлечения минеральных компонентов из природного и техногенного сырья» Института проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук (ИПКОН РАН).

Официальные оппоненты:

Горячев Борис Евгеньевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Обогащение и переработка полезных ископаемых и техногенного сырья» Национального исследовательского технологического университета «Московский институт стали и сплавов» (НИТУ «МИСиС»).

Ануфриева Светлана Ивановна, кандидат химических наук, заведующий технологическим отделом ФГБУ Федерального государственного бюджетного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья имени Н. М. Федоровского» (ФГБУ «ВИМС»).

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»).

Защита состоится 1 октября 2019 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 002.074.01 при Институте проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук (ИПКОН РАН) по адресу: 111020, г. Москва, Крюковский тупик, д. 4; тел./факс 8 (495) 360-89-60.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять в адрес совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПКОН РАН и на сайте www.ипконран.рф.

Автореферат разослан «__» июля 2019 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета,
доктор технических наук

Матвеева Т.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы: Развитие основных процессов обогащения кимберлитовых руд направлено на достижение максимально полного извлечения и сохранности алмазных кристаллов. В настоящее время на мировом рынке значительно возросли цена и спрос на природные алмазы крупностью менее 5 мм, стоимость которых составляет около 25% от стоимости товарной продукции. Потери алмазов рассматриваемой крупности достигают 20% или 20 млн. долл. в год. С учетом данного факта проблема повышения их извлечения в технологических схемах обогатительных алмазоизвлекающих фабрик является актуальной.

Для извлечения алмазных кристаллов указанной крупности в технологии обогащения и доводки алмазосодержащих продуктов применяется липкостная сепарация, использующая природную гидрофобность поверхности алмазов. Основной причиной снижения технологических показатели липкостной сепарации являются высокие потери кристаллов с хвостовыми продуктами процесса, обусловленные гидрофилизацией поверхности природных алмазов вследствие формирования на ней минеральных образований при контакте с кимберлитами, которые подверглись активным гипергенным изменениям в условиях залегания месторождений. Именно к таким месторождениям относятся кимберлитовые трубки «Нюрбинская» и «Ботуобинская», рудный материал которых по данным НИГП АК «АЛРОСА» является наиболее измененным, а процесс липкостной сепарации в технологии их переработки на обогатительной фабрике №16 является заключительным, что делает потери алмазов рассматриваемого класса в данных условиях безвозвратными.

Для решения проблемы снижения потерь алмазов в операции липкостной сепарации применяют электрохимическую обработку оборотной воды, обеспечивающую восстановление природной гидрофобности алмазных кристаллов за счет удаления части гидрофилизирующих покрытий. Применение сочетания электрохимической обработки и ультразвукового воздействия на твердую и жидкую фазу пульпы является перспективным путем решения задачи повышения извлечения алмазов из кимберлитовых руд с применением метода липкостной сепарации.

Методической основой решения поставленной задачи являются разработки научной школы ИПКОН РАН под руководством академика В.А. Чантурия, связанные с работами В.Д. Лунина, Г.Н. Назаровой, Э.А. Трофимовой, Г.П. Двойченковой, В. И. Богачева, В. Г. Миненко и других ученых.

Целью работы является научное обоснование и выбор технологического режима кондиционирования пульпы и воды в цикле липкостной сепарации алмазосодержащих кимберлитов с применением ультразвуковой и электрохимической обработки, обеспечивающих удаление физически и химически закрепившихся гидрофилизирующих образований с поверхности алмазов, восстановление гидрофобности алмазных кристаллов и повышение их извлечения в концентрат.

Идея работы: Комбинирование способов ультразвуковой обработки пульпы и электрохимического кондиционирования оборотной воды для эффективного удаления и предотвращения повторного образования на поверхности алмазов гидрофилизирующих минеральных покрытий.

Задачи исследований:

- изучение минерального состава и структуры гидрофилизирующих образований на поверхности алмазов трубок «Нюрбинская» и «Ботубинская»;
- исследование механизма, установление закономерностей процесса и обоснование параметров ультразвукового воздействия, обеспечивающего удаление минеральных образований с поверхности алмаза;
- выбор параметров процесса электрохимической обработки оборотной воды, обеспечивающего удаление и предотвращение повторного образования минеральных пленок на поверхности алмаза;
- разработка технологического режима процесса липкостной сепарации, предусматривающего совместную электрохимическую и ультразвуковую обработку воды и пульпы, обеспечивающих восстановление гидрофобности и повышение извлечения поверхностно измененных алмазов.

Методы исследований: ИК-спектрофотометрия и рентгенометрические методы анализа состава поверхности алмазов, электронно-микроскопические исследования состава и рельефа кристаллов алмазов, химический анализ жидкой фазы и продуктов обогащения, лабораторные и укрупненные технологические испытания процессов ультразвуковой обработки пульпы и электрохимического кондиционирования воды, математическое планирование и обработка результатов экспериментов.

Объектами исследований в настоящей работе являются процессы:

- деструкции и удаления гидрофилизирующих минеральных образований с поверхности алмазных кристаллов в условиях применения ультразвуковых и электрохимических воздействий;
- извлечения алмазов методом липкостной сепарации.

Предметами исследований в настоящей работе приняты:

- кимберлитовые руды трубок «Ботубинская» и «Нюрбинская» и продукты их переработки;
- гидрофилизирующие поверхностные образования на алмазах трубок «Ботубинская» и «Нюрбинская»;
- параметры комбинированных ультразвуковых и электрохимических воздействий на водные системы и рудную пульпу процесса липкостной сепарации.

Научные положения:

1. Состав гидрофилизирующих поверхностных образований на алмазах трубок «Нюрбинская» и «Ботубинская», которые преимущественно представлены адгезионно закрепившимися шламовыми примазками силикатно-карбонатного

состава, содержащими значительный объем пор, заполненных водной фазой, и характеризующихся существенно меньшими (3-5 раз) в сравнении с алмазными кристаллами значениями акустического сопротивления среды.

2. Механизм и условия неразрушающего восстановления гидрофобности алмазов при ультразвуковых воздействиях, заключающиеся в избирательном кавитационном диспергировании шламовых покрытий, достигаемом путем поддержания вблизи поверхности кристаллов и внутри шламовых образований кавитационного ультразвукового поля мощностью 3-7,5 Вт/см², ослабляемого внутри алмазов до значений менее 1,5 Вт/см², при которых не возникают кавитационные явления и не происходит разрушения кристаллов.

3. Обоснование эффективности комбинированного применения ультразвуковой обработки пульпы и бездиафрагменной электрохимической обработки оборотной воды для снижения потерь поверхностно измененных алмазов в процессе липкостной сепарации, заключающееся в проявлении синергетического эффекта, обеспечивающего: удаление с поверхности кристаллов до 94% силикат-карбонатных шламовых и карбонатных пленочных гидрофилизующих образований, предотвращение их повторного закрепления и, как следствие, восстановление природной гидрофобности алмазов (увеличение краевого угла смачивания до 85⁰) и повышение флотиремости до 90%.

4. Способ подготовки алмазосодержащих продуктов к липкостной сепарации, включающий ультразвуковую обработку исходного питания в течение 1-2 мин при частоте поля 22-44 кГц и его мощности 5 - 7,5 Вт/см² в среде оборотной воды, прошедшей бездиафрагменное электрохимическое кондиционирование при плотности тока 100 А/м² и расходе электроэнергии 0,75 – 1,5 кВт*ч/м³, обеспечивающих восстановление гидрофобности и повышение извлечения алмазов на 4,13%.

Новизна разработанных научных положений:

1. Установлены новые зависимости и закономерности влияния ультразвукового воздействия на гетерофазную систему алмаз – минеральные образования – водная фаза, определяющие совокупность параметров ультразвукового поля, обеспечивающих наилучшие условия избирательного разрушения шламовых и пленочных гидрофилизующих покрытий на поверхности алмазов с восстановлением их гидрофобности до значений, соответствующих природным кристаллам.

2. Установлен синергетический эффект повышения эффективности удаления с поверхности алмазов гидрофилизующих покрытий при комбинированном применении процессов ультразвуковой обработки пульпы и электрохимического кондиционирования оборотной воды, обеспечивающих удаление с поверхности кристаллов шламовых поверхностных образований силикатно-карбонатного состава, карбонатных пленок, предотвращение повторной техногенной гидрофизации и адгезионного закрепления шламов на алмазах в процессе липкостной сепарации.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов подтверждаются удовлетворительной сходимостью результатов измерений, воспроизводимостью зависимостей выходных параметров при варьировании условий экспериментов, достижением максимальной эффективности процесса липкостной сепарации в экспериментально обоснованных интервалах варьирования интенсивности воздействий, а также положительными результатами технологических испытаний.

Научное значение заключается в установлении закономерностей процессов восстановления гидрофобности поверхностно измененных алмазов и их извлечения в процессе липкостной сепарации при использовании ультразвуковой обработки пульпы, совмещенной с электрохимическим кондиционированием оборотной воды.

Практическое значение работы заключается в разработке эффективного технологического режима подготовки алмазосодержащих продуктов к процессу липкостной сепарации, обеспечивающего повышение извлечения алмазов на 4,13%.

Реализация результатов работы: Разработанный технологический режим липкостной сепарации алмазосодержащего материала с применением комбинированных ультразвуковых и электрохимических воздействий прошел экспериментальные испытания на стендовой установке и рекомендован к дальнейшей промышленной апробации в условиях обогатительных фабрик АК «АЛРОСА».

Личный вклад автора состоит в обобщении и анализе научных информационных источников по теме диссертации, проведении лабораторных исследований влияния параметров ультразвуковой обработки пульпы и электрохимического кондиционирования оборотной воды на состав поверхности и гидрофобность алмазов, разработке методик, выполнении экспериментальных исследований и апробации технологических режимов подготовки алмазосодержащего материала к липкостной сепарации, обработке и анализе результатов исследований, формулировании выводов и заключения работы.

Апробация работы: Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международных совещаниях «Плаксинские чтения» (2016 - 2018); Международных конгрессах обогатителей стран СНГ (2017 - 2019); научных симпозиумах «Неделя горняка» (2017 - 2018); Международных конференциях «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья» (2016-2019); ученом совете НИГП АК «АЛРОСА» (2019); научных семинарах ИПКОН РАН (2014 - 2019), Международном конгрессе по обогащению полезных ископаемых (2018).

Публикации: Основные положения диссертации опубликованы в 13 работах, из них 5 статей – в журналах из перечня ВАК Минобрнауки РФ.

Объем работы: Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы из 120 наименований, содержит 54 рисунка и 22 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе показаны особенности минерального состава измененных кимберлитов руд трубок «Нюрбинская» и «Ботубинская». Рассмотрены современные схемы переработки алмазосодержащих кимберлитов, проведен анализ причин потерь алмазов и проанализированы современные методы повышения эффективности процесса липкостной сепарации. На основании проведенного анализа определены основные задачи исследований.

Во второй главе описаны основные методики исследования вещественного состава кимберлитов, состава поверхностных образований на алмазах и их гидрофобности, состава и свойств водной фазы пульпы и оборотных вод, ультразвукового и бездиафрагменного электрохимического методов кондиционирования пульпы и водных систем в процессе липкостной сепарации для модифицирования поверхностных свойств алмазов, лабораторных и укрупненных стендовых технологических испытаний разработанных технических решений.

В третьей главе представлены результаты исследований состава поверхностных образований и причин гидрофилизации алмазов трубок «Нюрбинская» и «Ботубинская».

Для определения генезиса гидрофилизирующих минеральных образований на алмазах был проведен анализ минералогического состава проб кимберлитовых руд трубок «Нюрбинская» и «Ботубинская», а также образованных в процессах их обогащения шламовых продуктов различного класса крупности.

Анализ данных минералогических исследований показывает, что в кимберлитах трубок «Нюрбинская» и «Ботубинская» преобладают частично измененные и полностью измененные минералы. Кимберлиты трубки «Ботубинская» представлены первичным и гипергенным кальцитом (31%), серпентином (19%), доломитом (17%), слюдой (10%), хлоритом (8%), тальком (2%), кварцем, гипсом (1%). Преобладает ассоциация серпентин-кальцит. Кимберлиты этой трубки являются наиболее карбонатизированными. Трубка «Нюрбинская» содержит в качестве гипергенных породообразующих минералов: доломит (20%), слюду (19%), серпентин (18%), тальк (10%), хлорит (7%), кварц (2%), смектиты, гипс (1%). Преобладает ассоциация доломит-серпентин.

В пробах шламовых продуктов переработки рассматриваемых кимберлитовых руд в наибольшей мере представлены кальцит (14%), серпентин (7%), доломит (31%), слюда (5%), хлорит (5%), кварц (19%) и рентгеноаморфные фазы (46%). Преобладает ассоциация серпентин-карбонатов. Минеральный состав шламового класса (менее 0,001 см) отличается увеличением доли серпентина (15,6%), уменьшением доли доломита (2,5%), слюды (0,1%), хлорита (2,2%), кварца (3,1%), смектитов со смешаннослойными образованиями (2,6%). Доля рентгеноаморфной фазы достигает 72%.

Результаты исследования поверхностных минеральных образований на алмазах в режимах электронного микроскопа показали наличие гидрофильных шламовых примазок, распределенных относительно равномерным слоем (рисунок 1а).

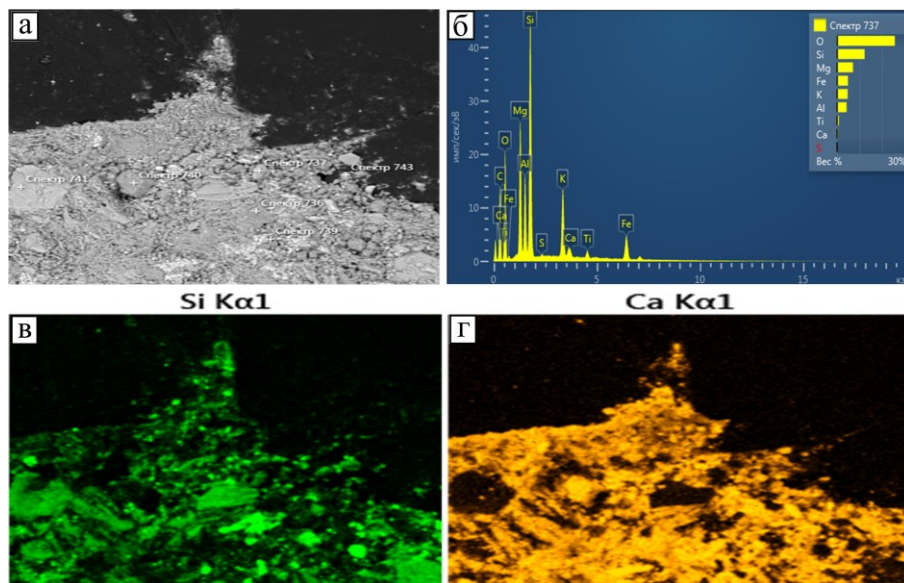


Рисунок 1. – Изображение (а), спектрограмма (б) и рентгеновские карты (в, г) распределения кремния и кальция в шламовой примазке на поверхности алмаза

Микрорентгеноспектральным методом показано, что наиболее часто встречающимися поверхностными минеральными образованиями на алмазных кристаллах являются шламовые смешанные силикатно-карбонатные и алюмосиликатные покрытия. Часто встречаются карбонат-апатитовые минеральные образования. Ввиду значительного содержания рентгеноаморфных фаз в шламах были проведены их ИК-спектроскопические исследования. В ИК-спектрах поглощения гидрофильных алмазов наблюдаются отчетливые полосы гипса, силикатов (среди них возможен тальк), карбонатов.

Анализ обобщенных данных по составу и строению поверхностных образований позволил сделать вывод, что для алмазов трубок «Нюрбинская» и «Ботуобинская» характерно распространение шламовых конгломератов силикат-карбонатно-фосфатного и тальк-сметкитового состава (59,1 и 60,4%, таблица 1). Анализ ИК-спектров показывает значительную массовую долю воды (от 7 до 37%), заполняющей поры шламовых конгломератов.

Массивные и пленочные образования распространены в меньшей мере (18,6 - 22%, таблица 1). Массивные образования представлены преимущественно карбонат-фосфатными минералами с высокой относительной долей железных минералов (до 15%) и сосредоточены в трещинах и на геометрически неоднородных участках поверхности кристалла. Пленочные образования распространены на всех видах поверхностей и характеризуются преимущественно карбонатным составом с массовой долей оксидов и карбонатов железа от 2,3 до 4,0 %.

Таблица 1. – Состав и свойства минеральных образований различного генезиса на поверхности алмазов трубок «Нюрбинская» и «Ботуобинская»

Тип поверхностного минерального образования	Относительная доля, %	Минеральный состав, %				
		Карбонаты	Фосфаты	Гидроксиды железа	Слоистые алюмосиликаты	Глины
Трубка «Нюрбинская»						
1. Шламовый конгломерат силикат-карбонат-фосфатного состава	49,5	$\frac{4-26}{15}$	$\frac{13-24}{18,5}$	$\frac{0,5-1,9}{1,7}$	$\frac{17-32}{24,5}$	$\frac{16-45}{30,5}$
2. Шламовый конгломерат тальк-сметитового типа	9,6	$\frac{3-7}{5}$	$\frac{3-7}{5}$	$\frac{0,1-1,5}{0,8}$	$\frac{33-73}{53}$	$\frac{16-28}{22}$
3. Рельефный сросток породообразующих минералов и алмаза	18,9	$\frac{23-44}{33,5}$	$\frac{13-33}{23}$	$\frac{1,5-6,5}{4}$	$\frac{12-24,5}{18,25}$	$\frac{6-18}{12}$
4. Техногенное пленочное образование	22,0	$\frac{53-80}{61,5}$	$\frac{2-16}{9}$	$\frac{1,5-4,5}{3}$	$\frac{3-12}{7,5}$	$\frac{3-12}{7,5}$
Трубка «Ботуобинская»						
1. Шламовый конгломерат силикатного карбонатного-фосфатного состава	46,3	$\frac{2-20}{11}$	$\frac{12-28}{20}$	$\frac{0,7-1,2}{0,95}$	$\frac{10-27}{29}$	$\frac{12-36}{22}$
2. Шламовый конгломерат тальк-сметитового типа	14,1	$\frac{3-9}{6}$	$\frac{3-9}{6}$	$\frac{0,1-1,7}{0,9}$	$\frac{33-63}{35}$	$\frac{16-22}{19}$
3. Рельефный сросток породообразующих минералов и алмаза	18,6	$\frac{23-44}{46}$	$\frac{13-33}{23}$	$\frac{1,9-7,5}{9,4}$	$\frac{12-24,5}{18,25}$	$\frac{9-19}{14}$
4. Техногенное пленочное образование	21,0	$\frac{46-66}{56}$	$\frac{2-12}{7}$	$\frac{1,9-3,5}{2,7}$	$\frac{4-14}{9}$	$\frac{4-14}{9}$

Влияние диагностированных поверхностных образований на гидрофобность алмазов было исследовано с применением методики измерения краевого угла смачивания на коллекции алмазных кристаллов различных типов. Результатами выполненных экспериментов показано, что природные кристаллы алмазов кубического габитуса являются менее гидрофобными по сравнению с кристаллами октаэдрического габитуса. Вследствие техногенной гидрофилизации в оборотной воде липкостной сепарации на кристаллах алмазов всех типов образуются минеральные пленки, увеличивающие гидрофильность их поверхности. Высокая степень гидрофилизации кристаллов кубического габитуса (краевой угол смачивания 50,8 - 52,6°) обуславливает повышенные потери алмазов данного типа в липкостной сепарации.

Преобладание шламовых конгломератов и техногенных пленочных образований на поверхности гидрофилизированных алмазов трубок «Нюрбинская» и «Ботуобинская» послужили основанием выбора комбинированной ультразвуковой и электрохимической технологии для восстановления их поверхностных свойств.

В четвертой главе дано обоснование параметров ультразвуковой и электрохимической обработки пульпы и оборотной воды для эффективного

восстановления гидрофобности алмазов. Задачей ультразвукового воздействия является разрушение агрегатов алмазов с адгезионно связанными с ними минеральными образованиями. Принципиальным условием при выборе режимов обработки является сосредоточение ультразвукового воздействия в области поверхностных образований на алмазе без интенсивных воздействий на сами алмазные кристаллы, что обусловлено в первую очередь необходимостью обеспечения их сохранности.

Наиболее важным параметром ультразвукового поля является мощность, при которой обеспечивается переход в кавитационный режим воздействия. Проведенными измерениями было установлено, что в водно-кимберлитовой суспензии при температуре 10-14°C порог перехода мощности воздействующего поля в кавитационный режим определяется значением 1,5 Вт/см². Данный параметр использован далее при определении допустимых интервалов значений мощности ультразвукового поля, воздействующего на алмазные кристаллы. Для выбора рабочих характеристик ультразвукового поля были рассмотрены системы: алмаз – вода и алмаз – минеральное образование – вода (рисунок 2).

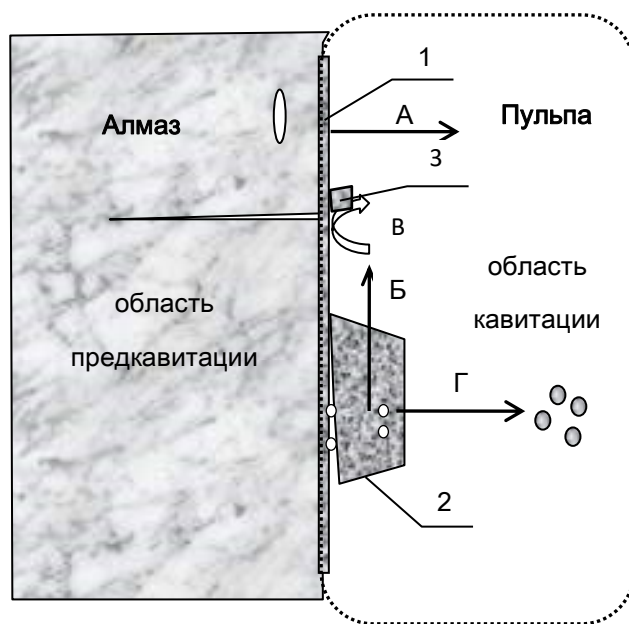


Рисунок 2. – Принципиальная схема очистки поверхности алмазов продуктами электрохимического кондиционирования водных сред и под действием ультразвуковой обработки, где: 1 – пленочное образование; 2 - рельефное образование; 3 – единичные шламовые зерна. Способы очистки: А – растворение продуктами электрохимического кондиционирования воды; Б - механическое (сдвиговое) удаление; В – механическое (вихревое) воздействие; Г – механическое (диспергационное) удаление. Область кавитации - при мощности поля более 1,5 Вт/см²; область предкавитации - при мощности поля менее 1,5 Вт/см².

Анализ акустических характеристик компонентов рассматриваемых систем показал следующее: акустическое сопротивление, определяющее степень ослабления мощности ультразвукового поля, у глин в 2-2.2 раза выше, чем у воды (таблица 2). Еще вдвое выше акустическое сопротивление сплошных карбонат-силикатных минералов. Алмаз обладает аномально высоким акустическим сопротивлением, превышающим значения воды в 7-10 раз (таблица 2).

Таблица 2. – Акустические характеристики компонентов алмазосодержащей пульпы

Наименование	Физические свойства		Акустическое сопротивление кг/(м ² *с) *10 ⁶	Коэффициент пропускания ультразвукового сигнала
	Скорость продольной волны, м/с	Плотность, кг/м ³		
Глина	3600	2200	7,92	0,54
Кварц	4950	2700	13,36	0,37
Вода	1516	1000	1,516	1
Алмаз	15000	3500	52,5	0,11

Для расчета коэффициента пропускания $\tau_{\text{проп}}$ ультразвукового сигнала в рассматриваемых веществах использовали уравнение 1.

$$\tau_{\text{проп}} = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (1)$$

где Z_1, Z_2 - акустические сопротивления контактирующих сред.

Анализ данных расчетов показал, что внутри глинистых образований происходит наименьшее ослабление мощности ультразвукового поля (коэффициент пропускания равен 0,54). В компактных минералах (кварце и других) ослабление более заметно (коэффициент пропускания равен 0,37). В алмазе, благодаря аномальной величине его акустического сопротивления, ослабление сигнала происходит почти в 9 раз (коэффициент пропускания равен 0,11).

Исходя из установленной верхней границы кавитационного эффекта в алмазе (1,5 Вт/см²) и анализа данных таблицы 2 с использованием уравнения 1 для допустимой предкавитационной мощности (1,4 Вт/см²) были рассчитаны коэффициент пропускания (0,115) и допустимая исходная мощность поля (12,5 Вт/см²). Проведенные расчеты дают основание предположить, что ультразвуковая обработка такой интенсивности не вызовет разрушения алмаза за счет кавитации воды в трещинах и порах минерала, сопровождающейся резким возрастанием давления в образующихся паровоздушных пузырьках. Однако, учитывая важность условия неразрушающей обработки и недостаточность исследования объекта в дальнейшем был выбран верхний предел мощности исходного ультразвукового поля, равный 60% от расчетной величины - 7,5 Вт/см².

Нижний диапазон мощности поля определяется необходимостью поддержания кавитационного режима внутри минеральных образований. Расчет по уравнению 1

коэффициента пропускания ультразвука внутрь шламовых покрытий дает величину 0,54. Поэтому для превышения мощности $1,5 \text{ Вт/см}^2$ внутри шламовых минеральных образований требуется приложить внешнее поле мощностью $1,6/0,54 = 3 \text{ Вт/см}^2$.

При выборе оптимальной частоты воздействующего ультразвукового поля ставилась задача равномерного распределения его интенсивности в рабочей зоне. При постоянной частоте интенсивность ультразвука (I) убывает при удалении от излучателя по экспоненциальному закону:

$$I = I_0 e^{-kh} \quad (2)$$

где: h - глубина проникновения; I_0 - интенсивность ультразвукового поля на границе рабочей зоны; k – эмпирический коэффициент поглощения, который зависит от плотности и вязкости среды, частоты ультразвукового поля.

С использованием уравнения 2 была рассчитана зависимость мощности ультразвукового поля в суспензии кимберлита от расстояния до излучателя. Анализ зависимостей, представленных на рисунке 3, показывает, что низкочастотный сигнал поглощается существенно меньше, чем высокочастотный, что определяет целесообразность применения низкочастотного ультразвукового излучения.

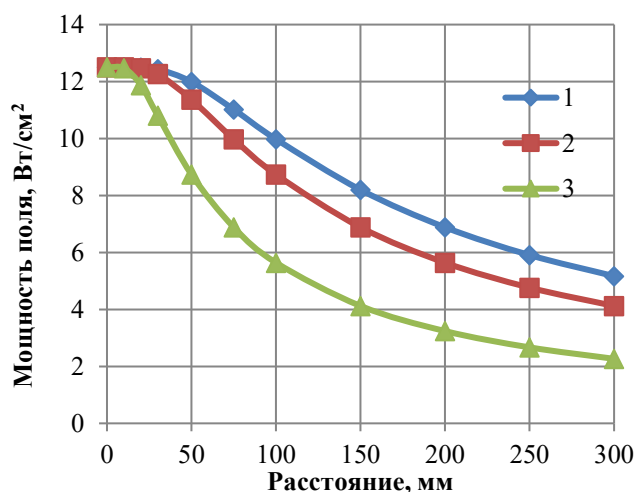


Рисунок 3. – Зависимость мощности ультразвукового поля (звукового давления) от расстояния до излучателя в суспензии кимберлита при частотах: 1- 22 кГц; 2 – 45 кГц; 3 – 130 кГц

Глубина области устойчивой обработки, где падение интенсивности воздействия не превышает 50%, составила: при частоте 22 кГц – 230 мм, частоте 45 кГц – 175 мм, частоте 130 кГц – 86 мм. Исходя из характеристик ультразвуковых генераторов было определено, что необходимый по мощности и частоте ультразвукового поля режим достигается в аппаратах с амплитудой движения рабочего органа (мембраны) 20-60 мкм.

Исходя из полученных результатов для дальнейших исследований были выбраны интервалы частот поля - от 22 до 130 кГц, мощности - от 3 до 7,5 Вт/см² (рисунок 4).

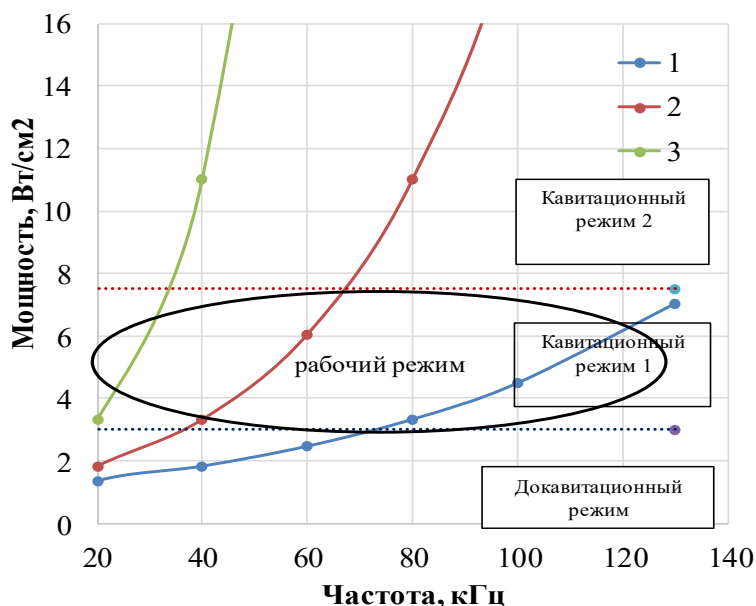


Рисунок 4. – Выбор режима ультразвуковой обработки пульпы в координатах частота - мощность сигнала при значениях хода мембраны: 1 – 20 мкм; 2 – 40 мкм; 3 – 60 мкм

Для определения оптимальных параметров электрохимического кондиционирования оборотной воды цикла липкостной сепарации была применена стендовая установка, комплекс оборудования которой включал: бездиафрагменный электролизер производительностью до 40 л/ч с рабочей площадью электродов 0,02 м²; кондиционеры с перемешивающим устройством импеллерного типа; источники постоянного тока с датчиками величины напряжения и силы электрического тока, липкостной сепаратор.

В качестве критерия оценки способности оборотной воды растворять или отлагать гидрофилизирующие пленки был применен показатель склонности оборотной воды к осаждению или растворению пленок карбоната кальция - индекс стабильности (индекс Ризнера) JS_t:

$$JS_t = 2 \cdot pH_s - pH, \quad (3)$$

который сравнивает pH среды с равновесным значением pH образования карбоната кальция CaCO₃ (pH_s), рассчитываемым по уравнению:

$$pH_s = pK_2 - pPP_{CaCO_3} - \lg[Ca^{2+}] - \lg\zeta_0 + 2,5\sqrt{I}, \quad (4)$$

где: pK₂ – отрицательный логарифм константы 2-й степени диссоциации угольной кислоты; pPP_{CaCO₃} – отрицательный логарифм произведения растворимости кальцита;

$[Ca^{2+}]$ – концентрация ионов кальция, мг/л; Щ – суммарная концентрация содержащихся в воде анионов CO_3^{2-} и HCO_3^- , мг-экв/л; I – ионная сила, мг-экв/л.

Применение индекса Ризнера для оценки технологических свойств оборотной воды в схемах алмазоизвлекающих фабрик ранее было обосновано исследованиями, проведенными Г.П. Двойченковой.

Результаты аналогичных исследований, проведенных для условий обогатительной фабрики №16 Нюрбинского ГОКа, показали, что, бездиафрагменная электрохимическая обработка оборотной воды уменьшает в ней концентрацию ионов кальция, магния и угольной кислоты, обеспечивая снижение склонности оборотной воды к осадкообразованию и ее переход в разряд склонных к растворению карбоната кальция ($JS_t > 6,5$, таблица 3).

Таблица 3. – Физико-химические характеристики оборотной воды и продуктов ее бездиафрагменного электролиза

Плотность тока, А/м ²	Время обработки, мин	pH	Ионный состав жидкой фазы, мг/л						Критерий Ризнера JS_t
			Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	ClO ⁻ и ClO ₂ ⁻	O ₂	
Без обработки		8,0	312	462	1980	375	-	1,2	6,30
100	0,5	7,9	310	410	1890	351	5,3	2,8	6,40
100	1	7,8	295	357	1840	275	19,2	3,3	6,61
100	2	7,6	288	290	1770	230	20,3	7,5	6,82
100	3	7,5	255	270	1740	160	23,4	7,8	7,00
100	5	7,4	240	262	1695	125	26,6	8,0	7,19

Проведенными исследованиями (таблица 3) была установлена требуемая продолжительность обработки (1-3 мин), обеспечивающая необходимые свойства оборотной воды ($JS_t > 6,5$).

Дальнейшие исследования были направлены на разработку комбинированной электрохимической и ультразвуковой технологии восстановления гидрофобности алмазов для условий липкостной сепарации алмазосодержащего сырья

Оценка эффективности очистки поверхности алмазов рассматриваемыми видами обработки проводилась с использованием РФЭС и ИК-спектроскопии на коллекции алмазов с поверхностными шламовыми образованиями. На рисунке 5 приведен пример результатов исследований. Анализ данных ИК-спектров показал, что поверхность одного из исследуемых алмазных кристаллов содержала шламовое покрытие, состоящее из сульфатных и карбонатных кальциевых минеральных комплексов, а также минералов алюмосиликатного состава, идентифицируемых по соответствующим пикам поглощения при характеристических волновых числах (рисунок 5а). После обработки поверхности исследуемого алмаза комбинированными электрохимическими и ультразвуковыми воздействиями количество шламовых порообразующих минералов на ней снижается (рисунок 5б).

Методика количественной ИК-спектроскопии предусматривала измерение и сравнение произведения высоты на ширину (интенсивности) характеристических пиков поглощения ИК-излучения для каждого диагностируемого минерала и алмаза (рисунок 5). По изменению соотношения интенсивностей пиков оценивали относительное изменение количества минеральной примеси на поверхности алмаза.

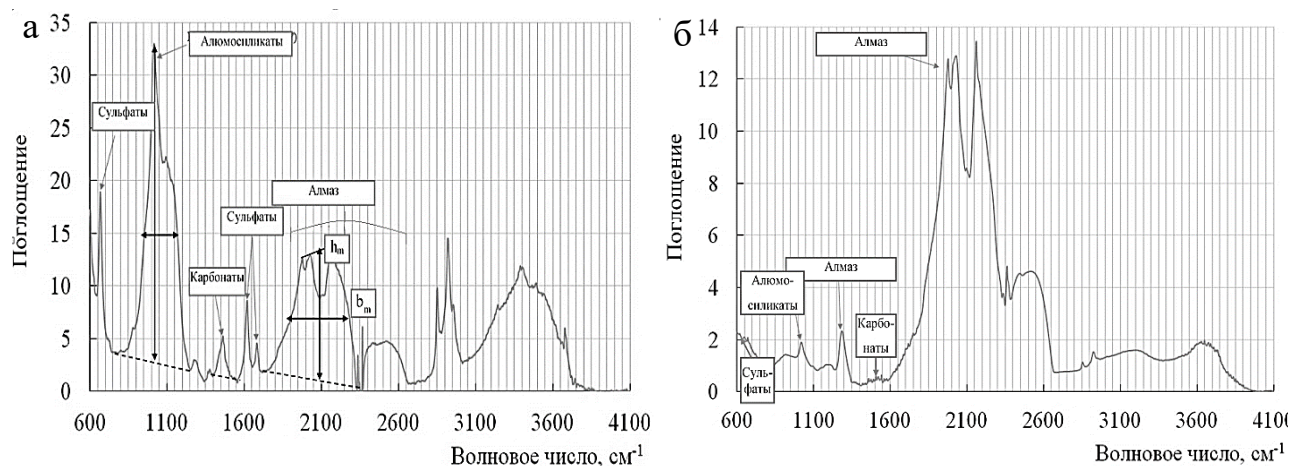


Рисунок 5. – ИК-спектры поглощения алмаза со шламовым покрытием на поверхности до (а) и после(б) комбинированной ультразвуковой и электрохимической обработки

На данном этапе исследований изучено влияние на степень очистки поверхности алмазов как комбинированных ультразвуковых и электрохимических воздействий, так и их самостоятельного применения. Результаты количественной ИК-спектроскопии показали, что применение продукта электролиза оборотной воды в течение 1-2 мин способствует очистке поверхности алмазов на 19,1-25,5% в отношении силикатных минералов и на 31,1-40,7% в отношении карбонатных минералов (таблица 4).

Таблица 4. – Степень удаления шламового покрытия с поверхности алмазов при обработке ультразвуком и электрохимически модифицированной (э/х) оборотной водой (ОВ) по данным ИК-спектроскопии

Условия	Степень удаления силикатов, %	Степень удаления карбонатов, %
Исходное шламовое покрытие	0	0
После обработки э/х ОВ 1 мин	19,1	31,1
После обработки э/х ОВ 2 мин	25,5	40,7
После обработки ультразвуком 1 мин	76,1	51,9
После обработки ультразвуком 2 мин	91,2	64,2
После обработки ультразвуком 1 мин в э/х ОВ	84,4	84,2
После обработки ультразвуком 2 мин в э/х ОВ	94,3	91,7

Эффективность очищающей способности самостоятельно применяемой электрохимически обработанной воды по отношению к карбонатам обусловлена в

первую очередь ее возросшим растворяющим действием по отношению к минеральным пленкам, имеющим преимущественно карбонатный состав (таблица 4). Применение ультразвуковой обработки как самостоятельной операции в течение 1-2 мин способствует очистке поверхности алмазов в отношении силикатных минералов на 76-91%, а в отношении карбонатных минералов – 52-64% (таблица 4). Эффективность очищающей способности ультразвуковой обработки по отношению к силикатным минералам обусловлена преимущественным удалением шламовых покрытий с минерала.

Результаты выполненных экспериментальных исследований показывают, что совместное применение электрохимически подготовленной оборотной воды и ультразвуковой обработки способствует практически полной очистке поверхности алмазов, которая составила в отношении силикатных минералов 94,3%, а в отношении карбонатных минералов 91,7% (таблица 4), что обусловлено проявлением синергетического эффекта взаимного усиления физического и химического удаления как шламовых, так и пленочных покрытий с поверхности алмаза.

Обработка алмазов ультразвуком непосредственно в продукте электрохимической бездиафрагменной обработки оборотной воды существенно увеличивает краевой угол смачивания до значений ($91,6^\circ$), превышающих уровень, достигаемый при отдельном использовании как электрохимически обработанной оборотной воды ($69,8^\circ$), так и ультразвуковой обработки ($78,3^\circ$).

Результаты экспериментов по выбору режима ультразвуковой обработки алмазных кристаллов в электрохимически модифицированной оборотной воде подтвердили, что при мощности ультразвукового поля до $7,5 \text{ Вт/см}^2$ (частоте 130 кГц) происходит рост гидрофобности алмазов, идентифицируемый по величине краевого угла смачивания, максимальный прирост которого при этом достигается при продолжительности ультразвуковой обработки 1,5 – 2 мин (рисунок 6).

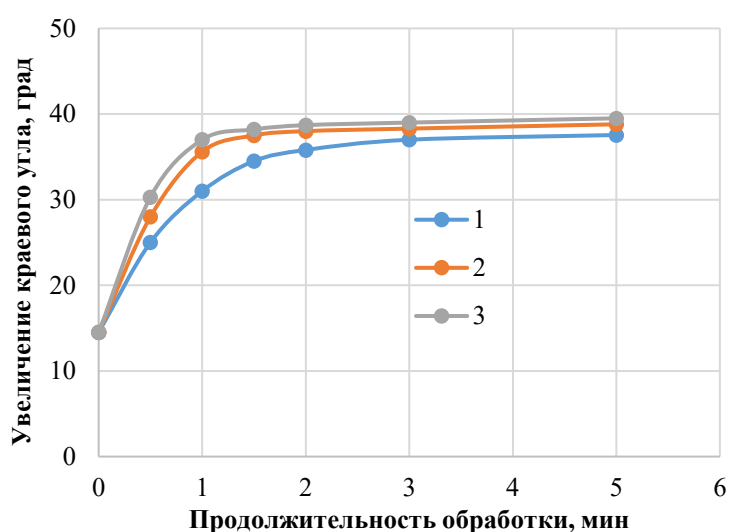


Рисунок 6. – Зависимость прироста краевого угла смачивания поверхности алмазов от продолжительности ультразвуковой обработки в электрохимически обработанной оборотной воде при частоте поля: 1 – 22 кГц; 2 – 44 кГц; 3 – 130 кГц

Необходимо отметить, что в процессе проведенных исследований все кристаллы алмазов визуально не изменили свои характеристики и сохранили исходный вес на 99,85%, что подтверждает отсутствие разрушения алмазов в выбранном диапазоне частот и мощности ультразвукового поля. Таким образом, результаты экспериментов на данном этапе подтвердили расчетные данные по обеспечению сохранности алмазов в условиях применения полей с частотой до 130 кГц и удельной мощностью до 7,5 Вт/см²

Для подтверждения возможности интенсификации процесса гидрофобизации алмазных кристаллов совместным применением электрохимической и ультразвуковой обработки были поставлены серии опытов по беспенной флотации. Результаты экспериментов показали, что в условиях продолжительности ультразвуковой обработки 1,5-2 мин с частотой 22 и 44 кГц и в среде электрохимически обработанной оборотной воды извлечение алмазов повышается более чем на 20% (рисунок 7).

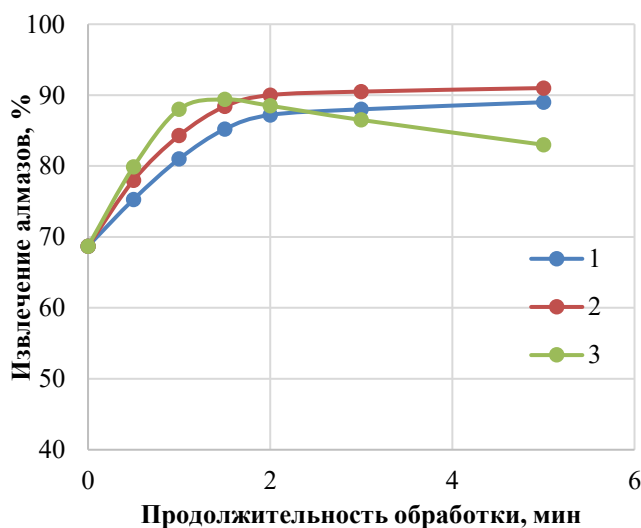


Рисунок 7. – Зависимость извлечения алмазов при беспенной флотации от продолжительности ультразвуковой обработки в электрохимически обработанной оборотной воде при частоте поля: 1 – 22 кГц; 2 – 44 кГц; 3 – 130 кГц

В главе 5 представлены результаты разработки и апробации технологии повышения эффективности липкостной сепарации с применением комбинированных электрохимических и ультразвуковых воздействий

Апробация предложенных режимов подготовки алмазов к процессу липкостной сепарации проводилась на стенде в непрерывном цикле испытаний. Выбор параметров электрохимической обработки оборотной воды производился исходя из задачи поддержания способности растворять карбонатные минералы полиминеральных гидрофилизирующих образований.

Оборотная вода в схеме обогатительной фабрики № 16 Нюрбинского ГОКа характеризуется высокой (40-42 г/л) общей минерализацией, обусловленной катионами Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, хлорид- и сульфат-анионами при близком к

нейтральному значению рН среды. Среднее значение критерия Ризнера для оборотной воды, рассчитанное по уравнениям 3 и 4 ($JS_t = 5,68$), характеризует ее как склонную к осадкообразованию ($JS_t < 6,2$).

Результаты экспериментов, выполненных на лабораторном стенде, показывают, что при бездиафрагменной электрохимической обработке оборотной воды вышеуказанного состава в течение 1-1,5 мин при расходе электроэнергии 0,75-1,5 кВтч/м³ обеспечивается ее способность к растворению карбонатных минералов ($JS_t > 6,85$, рисунок 8).

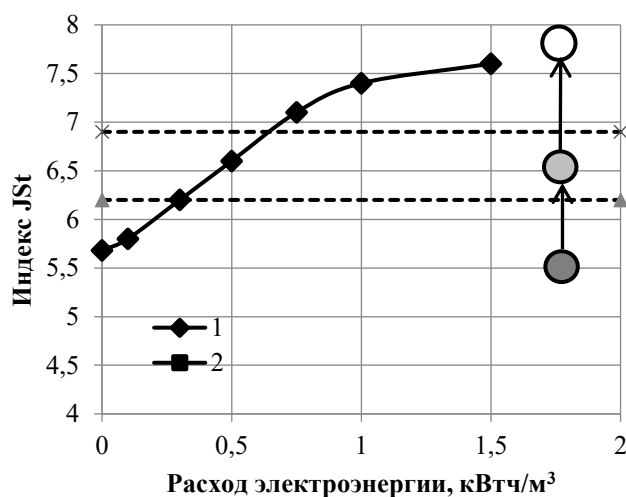


Рисунок 8. – Изменение индекса Ризнера (JS_t) при бездиафрагменной электрохимической обработке оборотной воды липкостной сепарации обогатительной фабрики № 16 Нюрбинского ГОКа, где; пунктирные линии – значения индекса для условий перехода от воды, склонной к образованию осадка (●) ($JS_t < 6,2$), к нейтральной воде (○) ($JS_t > 6,2$) и к воде, склонной к растворению осадка (○) ($JS_t > 6,85$)

При разработке комбинированной технологии подготовки алмазосодержащего сырья к липкостной сепарации в лабораторных условиях были изучены три экспериментальные схемы с использованием совместного применения ультразвуковых и электрохимических воздействий на алмазосодержащий материал и водную систему.

Согласно первой схеме последовательно в трубе подачи алмазосодержащего сырья в процесс липкостной сепарации материал проходил вначале стадию оттирки в электрохимически модифицированной оборотной воде, затем проводилась ультразвуковая обработка (в среде электрохимически модифицированной оборотной воды), и после этого алмазосодержащий материал поступал в процесс липкостной сепарации (рисунок 9а).

По второй схеме последовательно материал первоначально проходил стадию ультразвуковой обработки в среде электрохимически модифицированной оборотной воды, затем обработанная пульпа проходила стадию оттирки и направлялась на липкостную сепарацию (рисунок 9б).

По третьей схеме обработка алмазосодержащего материала первоначально осуществлялась с использованием стадии оттирки в электрохимически модифицированной оборотной воде, проводимой непосредственно в транспортной трубе, а затем с применением комбинированной электрохимической и ультразвуковой обработки алмазосодержащей пульпы в отдельном аппарате (баке с мешалкой) при низкой плотности (рисунок 9в), после чего алмазосодержащий продукт дренировался и подавался на липкостную сепарацию.

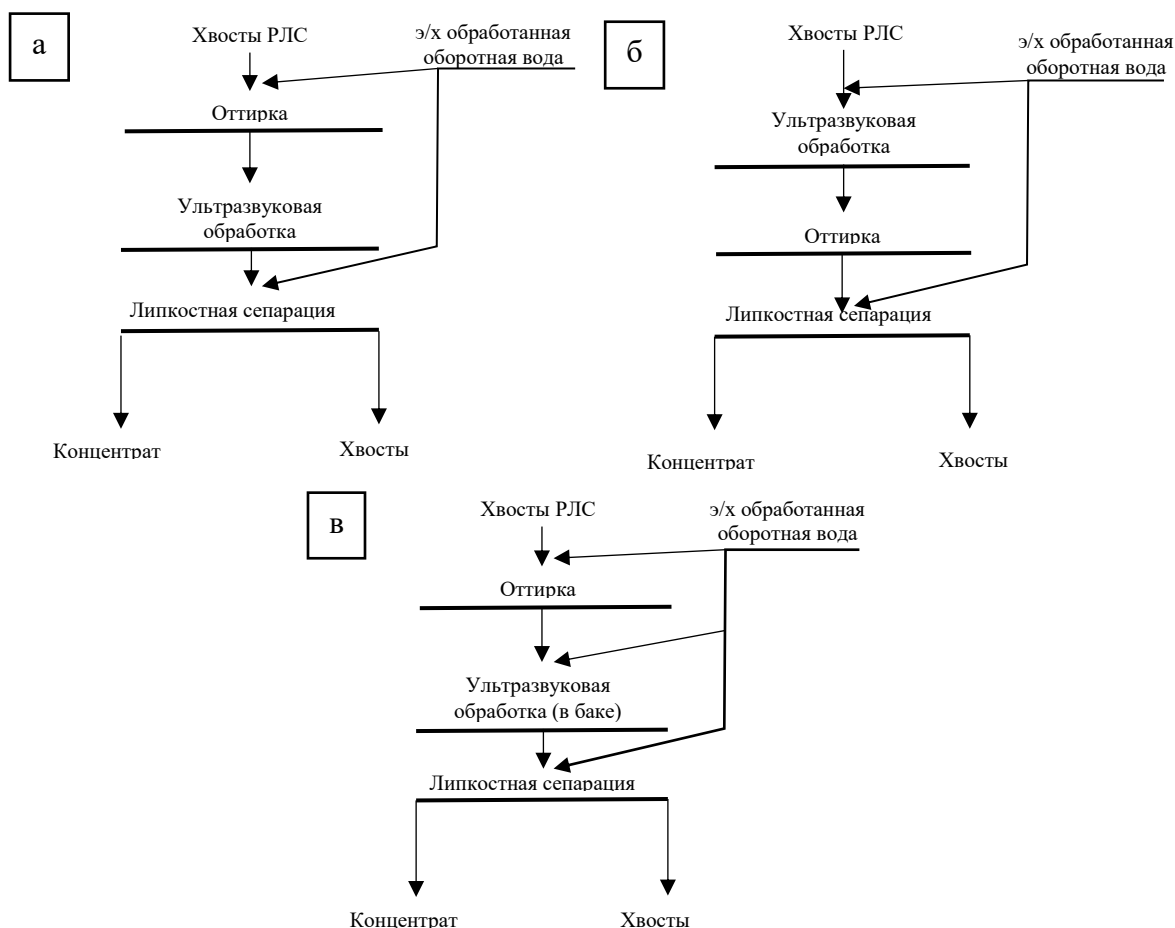


Рисунок 9. – Принципиальные схемы лабораторных исследований процесса липкостной сепарации с использованием комбинированных ультразвуковых и электрохимических воздействий

В проводимых исследованиях схем подготовки алмазосодержащего материала к липкостной сепарации были использованы режимы воздействий на оборотную воду и алмазосодержащую пульпу с поддержанием выбранных параметров электрохимического кондиционирования и ультразвуковой обработки. Анализ результатов испытаний показал, что вторая схема, предусматривающая проведение ультразвуковой обработки перед операцией оттирки и непосредственно в оборотной воде, прошедшей электрохимическую бездиафрагменную обработку, обеспечивает наибольшее повышение извлечения (на 6,3%, таблица 5).

Полученные в условиях укрупненных лабораторных испытаний данные показали перспективность и эффективность применения разработанной технологии подготовки алмазосодержащего материала к липкостной сепарации с использованием комбинированных электрохимических и ультразвуковых воздействий и определили целесообразность проведения укрупненных стендовых испытаний.

Таблица 5. – Показатели процесса липкостной сепарации при лабораторных испытаниях комбинированной электрохимической и ультразвуковой технологии

Режим подготовки алмазосодержащего материала к липкостной сепарации	Расход энергии на э/х кондиционирование оборотной воды, кВт*ч/м ²	Мощность ультразвука, Вт/см ²	Продолжительность ультразвуковой обработки, мин	Извлечение алмазов, %
Без подготовки	-	-	-	81,7
Первая схема				
Режим 1	0,75	5,0	1,0	83,0
Режим 2	0,75	7,5	1,0	83,5
Режим 3	1,0	5,0	1,0	84,3
Режим 4	1,0	7,5	1,0	85,3
Среднее				84,25
Вторая схема				
Режим 1	0,75	5,0	1,0	86,6
Режим 2	0,75	7,5	1,0	87,6
Режим 3	1,0	5,0	1,0	88,3
Режим 4	1,0	7,5	1,0	89,5
Среднее				88,0
Третья схема				
Режим 1	0,75	5,0	1,0	83,3
Режим 2	0,75	7,5	1,0	84,0
Режим 3	1,0	5,0	1,0	85,0
Режим 4	1,0	7,5	1,0	87,0
Среднее				84,75

Укрупненные испытания комбинированного метода подготовки алмазосодержащего сырья к липкостной сепарации проводили в условиях промышленного режима обогатительной фабрики №16 Нюрбинского ГОКа с использованием установленных параметров ультразвуковых и электрохимических воздействий, обоснованных результатами стендовых испытаний: расход электроэнергии на бездиафрагменное электрохимическое кондиционирование - 1 кВт*ч/м³, мощность ультразвукового поля в рабочей зоне - 7,5 Вт/см² при времени обработки 1 мин. Результаты испытаний, представленные в таблице 6, показали, что применение комбинированной обработки алмазосодержащего материала с использованием электрохимических и ультразвуковых воздействий перед липкостной сепарацией позволяет снизить потери алмазов в процессе на 4,13%.

В процессе стендовых испытаний с использованием весовых (в пределах точности 0,01 карат) и визуальных методик подтверждена сохранность кристаллов алмазов в процессе их обработки ультразвуковыми воздействиями.

Результаты расчета ожидаемого экономического эффекта, проведенного по методике АК «АЛРОСА», показали, что экономия от внедрения комбинированной схемы ультразвуковых и электрохимических воздействий в цикле липкостной сепарации алмазосодержащего сырья для условий обогатительной фабрики №16 Нюрбинского ГОКа составит около 17,7 млн. рублей в год.

Таблица 6. – Показатели процесса липкостной сепарации (ЛС) в условиях применения комбинированной электрохимической – ультразвуковой технологии восстановления гидрофобности алмазов

Режим подготовки	Класс	Содержание алмазов в хвостах ЛС, у.е.	Расчетное извлечение алмазов, %
Без кондиционирования	-6+3 мм	54,7	91,3
	-3+1 мм	62,5	87,6
	Итого	56,0	89,00
С электрохимической и ультразвуковой обработкой	-6+3 мм	33,1	91,3
	-3+1 мм	36,5	95,7
	Итого	35,0	93,13

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано новое решение актуальной научной задачи повышения извлечения алмазов в условиях липкостной сепарации на основе комбинированного электрохимического и ультразвукового воздействия, обеспечивающих повышение технико-экономических показателей обогащения алмазосодержащих кимберлитов.

Автором получены следующие основные результаты:

1. Установлено, что гидрофилизирующие поверхностные образования на алмазах, извлеченных из подверженных наиболее значительным гипергенным изменениям кимберлитов трубок «Нюрбинская» и «Ботубинская», преимущественно представлены адгезионно закрепившимися на гидрофилизированной поверхности алмазов шламовыми примазками силикатно–карбонатного состава и характеризуются значительными объемами пор, заполненных водной фазой.

2. Гидрофилизирующие шламовые образования характеризуются существенно меньшими по сравнению с алмазом значениями акустического сопротивления (в 3-5 раз), что обеспечивает избирательное протекание в них кавитационных явлений при воздействии ультразвукового поля высокой энергии и обосновывает применение ультразвуковой обработки пульпы для восстановления гидрофобности алмазов путем избирательного разрушения и удаления с поверхности алмазов гидрофилизирующих покрытий.

3. Проведенными расчетами показано, что при воздействии на алмазосодержащий материал ультразвука в течение 1-2 мин при мощности поля 3 - 7,5 Вт/см², частоте поля от 22 до 130 кГц внутри шламовых образований поддерживается

кавитационный режим (более $1,5 \text{ Вт/см}^2$), происходит интенсивное диспергирование шламовых покрытий и их удаление с поверхности алмазов. При этих условиях внутри алмаза поддерживается предкавитационный режим (до $1,5 \text{ Вт/см}^2$), не вызывающий возрастания давления в трещинах и разрушения алмаза.

4. При комбинированном применении процессов ультразвуковой обработки пульпы и электрохимического кондиционирования оборотной воды наблюдается синергетический эффект повышения эффективности удаления с поверхности алмазов гидрофилизирующих покрытий силикатно-карбонатного состава и техногенных пленок с предотвращением повторной гидрофиллизации и адгезионного закрепления шламов на алмазах в процессе липкостной сепарации.

5. Комбинированное применение ультразвуковой обработки пульпы и бездиафрагменной электрохимической обработки оборотной воды обеспечивает удаление с поверхности алмазов 94% гидрофилизирующих поверхностных образований, восстановление их гидрофобности до параметров природных кристаллов (увеличение краевого угла смачивания на $22-40^\circ$) и повышение флотуемости до 90% за счет удаления гидрофилизирующих поверхностных образований и предотвращения их повторного закрепления на алмазах под действием прошедшей электрохимическое кондиционирование оборотной воды.

6. Обоснован и разработан технологический режим подготовки к липкостной сепарации алмазосодержащих продуктов, включающий ультразвуковую обработку исходного питания при частоте 22-44 кГц и мощности $5 - 7,5 \text{ Вт/см}^2$ в среде оборотной воды, прошедшей бездиафрагменное электрохимическое кондиционирование при плотности тока 100 А/м^2 при расходе электроэнергии $0,75 - 1,5 \text{ кВт ч/м}^3$. Проведенными испытаниями показана эффективность разработанного режима подготовки сырья к липкостной сепарации, обеспечивающего повышение извлечения алмазов на 4,13%. Расчетный экономический эффект от увеличения извлечения алмазов с учетом всех затрат составил 17,7 млн. рублей в год.

Основные положения диссертационной работы опубликованы в следующих трудах:

Научные статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Чантурия В.А., Двойченкова Г.П., Ковальчук О.Е., Тимофеев А.С., Подкаменный Ю.А. Анализ распределения вторичных минералов и их ассоциаций на поверхности алмазов и в продуктах переработки метасоматически изменённых кимберлитов // Руды и металлы. - 2016. - № 2. - С. 73-83.

2. Двойченкова Г.П., Стегницкий Ю.Б., Ковальчук О.Е., Тимофеев А.С., Подкаменный Ю.А. Результаты исследований слоистых силикатов интенсивно измененных кимберлитов и тонкодисперсных фракций их преобразований // Отечественная геология. - 2016. - № 3. - С. 57-66.

3. Чантурия В.А., Двойченкова Г.П., Бунин И.Ж., Миненко В.Г., Коваленко Е.Г., Подкаменный Ю.А. Комбинированные процессы извлечения алмазов из метасоматически измененных кимберлитовых пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 2017. - № 2. - С. 117-127.

4. Двойченкова Г.П., Подкаменный Ю.А., Тимофеев А.С., Ковальчук О.Е. Экспериментальное исследование взаимосвязи состава кимберлитовых руд и механизма формирования минеральных образований на поверхности природных алмазов // Горный журнал. - 2017. - № 11. - С. 45-51.

5. Чантурия В.А., Двойченкова Г.П., Тимофеев А.С., Подкаменный Ю.А. Исследование минеральных образований на поверхности алмазных кристаллов и условий их деструкции в процессах переработки текущих и отвальных хвостов алмазоизвлекающих фабрик // Горный журнал. - 2019. - № 2. - С. 61-65.

Другие публикации:

6. Подкаменный Ю.А., Двойченкова Г.П., Ковальчук О.Е., Тимофеев А.С. Анализ распределения вторичных минералов и их ассоциаций в кимберлитовых трубках западной Якутии // Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых. 12-я международная научная школа молодых ученых и специалистов. - 2015. - С. 298-302.

7. Чантурия В.А., Двойченкова Г.П., Подкаменный Ю.А. Классификация минеральных образований на поверхности алмазов, не извлекаемых физико-химическими методами сепарации кимберлитовых руд // Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья (Плаксинские чтения - 2017). Материалы международной научной конференции. - 2017. - С. 64-66.

8. Подкаменный Ю.А., Ковальчук О.Е., Двойченкова Г.П. Модификация технологических свойств алмазов в условиях контакта с порообразующими минералами кимберлитовых руд // Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья (Плаксинские чтения - 2017). Материалы международной научной конференции. - 2017. - С. 88-91.

9. Подкаменный Ю.А., Двойченкова Г.П., Ковальчук О.Е. Закономерности формирования минеральных образований на поверхности природных алмазов измененных кимберлитовых пород // 50 лет российской научной школе комплексного освоения недр земли Материалы Международной научно-практической конференции. - 2017. - С. 471-475.

10. Chanturia V.A., Dvoichenkova G.P., Bunin I.Z., Mینenko V.G., Podkamenny Yu.A., Kovalenko E.G. Combination processes of diamond recovery from metasomatically altered kimberlite rocks // Journal of Mining Science. - 2017. - 53. -№ 2. - Pp. 317-326.

11. Podkamennyi Yu.A., Dvoichenkova G.P., Kovalchuk O.E. Experimental substantiation of the relationship between the structural and chemical properties of mineral formations on natural diamonds and the composition of kimberlite ore // Innovative technologies are key to successful mineral processing Book of Abstracts. 2018. - С. 243.

12. Подкаменный Ю.А., Двойченкова Г.П., Ковальчук О.Е. Влияние вещественного состава кимберлитовых пород на гидрофобно-гидрофильное состояние поверхности алмазных кристаллов // В сборнике: Молодежь и научно-технический прогресс в современном мире сборник докладов IX Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. 2018. - С. 97-100.

13. Podkamennyi Yu.A., Dvoichenkova G.P., Kovalchuk O.E. Experimental substantiation of the relationship between the structural and chemical properties of mineral formations on natural diamonds and the composition of kimberlite ore // Proceedings of 29th International Mineral Processing Congress. -2019. - Pp. 4083-4092.