

На правах рукописи

МАТИНИН АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ

ПОВЫШЕНИЕ СЕЛЕКТИВНОСТИ РАЗДЕЛЕНИЯ
СЛАБОКОНТРАСТНЫХ РУД НА ОСНОВЕ УПРАВЛЕНИЯ
ГИДРОДИНАМИЧЕСКИМ РЕЖИМОМ ФЛОТАЦИИ

Специальность 25.00.13 – «Обогащение полезных ископаемых»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» и Университете Лотарингии (Франция)

Научный руководитель: Филиппов Лев Одисеевич
доктор наук Франции, кандидат технических наук,
профессор

Официальные оппоненты:

Федотов Константин Вадимович доктор технических наук, профессор, Иркутский государственный технический университет, заведующий кафедрой обогащения полезных ископаемых и инженерной экологии имени профессора С.Б. Леонова

Лавриненко Анатолий Афанасьевич доктор технических наук, Институт проблем комплексного освоения недр РАН (УРАН ИПКОН РАН), заведующий лабораторией комплексного извлечения компонентов из минерального сырья и природных растворов

Ведущая организация: Государственный научный центр «Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет»

Защита диссертации состоится 5 июня 2013 года в 14⁰⁰ часов в аудитории К-212 на заседании диссертационного совета Д 212.132.05 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» по адресу: 119991, г. Москва, Крымский вал, д.3.

С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке НИТУ «МИСиС»
Отзывы на автореферат направлять по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, 4, НИТУ «МИСиС», ученому секретарю совета Лобовой Т.А.
Автореферат разослан « » апреля 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Т.А. Лобова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

В связи со снижением качества и увеличением объемов перерабатываемого минерального сырья, обозначились два принципиальных направления совершенствования флотационных аппаратов: создание аппаратов большой единичной производительности для импеллерных флотомашин и повышение удельной производительности за счет увеличения скорости и эффективности флотационных subprocessов для пневматических аппаратов: создание аппаратов интенсивной флотации.

В аппаратах интенсивной флотации процесс флотации осуществляется последовательно в два этапа: первоначально минеральные частицы закрепляются на пузырьках воздуха в реакторе, а затем, минерализованные пузырьки отделяются от пульпы в сепараторе. Интенсификации флотации способствует малое время и высокая интенсивность минерализации пузырьков воздуха в реакторе (от 1 до 10 с.) и возможность повышения газосодержания. Во всех прочих типах флотомашин процессы минерализации пузырьков и их отделения от пульпы происходят одновременно в одном объеме, что не позволяет независимо управлять гидродинамическими режимами отдельных subprocessов флотации.

Большой вклад в развитие флотационных аппаратов интенсивной флотации внесли Мещеряков Н.Ф., Максимов И.И., Чертилин Б.С., Краснов Г.Д., Лавриненко А.А., Полонский С.Б., Самыгин В.Д., Филиппов Л.О., Bao L., Jameson G.J., Harbort G., Finch J.A. и другие исследователи. Известно их успешное применение при переработке сульфидных и окисленных руд, промышленных минералов, солей, угля. Помимо рудной флотации, они применяются также во многих отраслях промышленности и народного хозяйства, в частности, для очистки сточных вод и регенерации экстрагентов в гидрометаллургии. К аппаратам интенсивной флотации относят флотомшины следующих марок: JAMESON, Imhoflot, PNEUFLOT, Centriflot, Pneumatic Cell, Contact Cell, которые установлены в 8 странах мира (США, Германия, Австралия, Чили, Швеция, Южная Африка, Испания, Польша).

Основными недостатками существующих аппаратов интенсивной флотации является отсутствие параметров, характеризующих оптимальные гидродинамические режимы и непроработанность конструкции отдельных зон флотомашин.

В НИТУ «МИСиС» Самыгиным В.Д. и Филипповым Л.О. разработана многозонная флотационная машина (МФМ), которая отличается от аналогов количеством пространственно выделенных зон и способами их соединения, что позволяет повысить селективность разделения за счет регулировки гидродинамического режима каждого subprocessа флотации.

Другим подходом для повышения эффективности переработки минерального сырья является совершенствование реагентных режимов, одним из перспективных направлений которого считается применение сочетания реагентов для достижения синергетических эффектов. Данное направление подробно освещено в работах Плаксина И.Н., Чантурия В.А., Ревнивцева В.И., Филиппова Л.О., Miller J.D., Rao H.K., El-Salmawy M.S. и многих других ученых. Однако данный подход имеет пределы применения, в частности для тонких классов слабоконтрастных руд, связанные с увеличением удельной площади поверхности и близкими флотационными свойствами разделяемых компонентов, обусловленные перераспределением собирателя между разделяемыми минералами.

Применение этого подхода позволило разработать безфторидную технологию разделения полевых шпатов и кварца. Однако, как показали полупромышленные испытания, как и для фторидной технологии, эффективность метода критически падает при снижении крупности обесшламливания ниже 80 мкм при флотации в импеллерных флотомашинах. Совокупность неблагоприятных факторов, таких как тонкая гранулометрия и близость поверхностных свойств разделяемых минералов, не позволяют решать проблему селективной флотации только за счет совершенствования реагентного режима, требуется также создание гидродинамических условий, позволяющих увеличить разницу в скорости флотации разделяемых минералов.

Повышения селективности разделения тонкодисперсных частиц в МФМ за счет гидродинамических эффектов при оптимальных реагентных режимах позволит снизить потери ценных компонентов с тонкими классами слабоконтрастных руд и вовлечь в производство объекты, переработка которых ранее считалась нерентабельной.

Работа выполнялась в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012 годы» по теме «Исследование и моделирование гидродинамических эффектов в многофазных потоках для интенсификации процессов флотации» (Государственный контракт от 12.05.2011 г. № 16.515.11.5036) и Европейского проекта ProMine (контракт № FP7/NMP-228559 "Nano-particle products from new mineral resources in Europe"). По результатам работы рекомендована поддержка проведения ОКР (ОТР) на основе разработанного ТЗ, за счет бюджетных средств.

Целью работы является повышение селективности разделения минералов с близкими флотационными свойствами путем создания многозонной флотационной машины, позволяющей управлять гидродинамическими режимами отдельных субпроцессов флотации.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- разработать новый подход к оптимизации процесса флотации тонких классов слабоконтрастных руд с целью повышения ее селективности, заключающийся в комбинировании флотационных реагентов различной молекулярной структуры и гидродинамических режимов;
- исследовать взаимосвязь между коэффициентом захвата минеральных частиц и крупностью пузырьков воздуха в зависимости от размера минеральных частиц и величиной диссипации энергии в системе для определения оптимальных гидродинамических режимов;
- исследовать влияние конструктивных параметров многозонной флотомашин (высоты и количества реакторов, диаметра сопла эжектора, коэффициента эжекции) на дисперсность газовой фазы;
- разработать конструкцию сепарационной камеры многозонной флотомашин, позволяющей создавать оптимальные гидродинамические режимы субпроцессов флотации в каждой зоне;
- изучить влияние отряхивающего эффекта удара пульповоздушной струи о клинообразную вставку в сепарационной камере путем регулирования скорости подачи пульпы;
- выявить влияние ультразвукового воздействия на кинетику флотации частиц различной степени флотиремости;
- опробовать разработанную конструкцию аппарата и комплексный подход на примере двух минеральных объектов.

Методы исследований: Для анализа химического состава проб использовался ряд анализов, таких как атомно-адсорбционный анализ; ICP MS, рентгено-флюоресцентный анализ (аппарат Niton) и т.д. Определение количественного фазового состава осуществлялось методом рентгенофазового анализа (AXS D8 Advance с кобальтовым антикатодом) с последующей обработкой дифрактограмм с помощью специализированного программного обеспечения EVA и Topas или методами пересчета химического состава, такими как CIPW. Также в процессе работы применялись оптическая микроскопия (Canon), электронная микроскопия (Hitachi FEG S-4800 и JEOL J7600F). Для исследования адсорбции реагентов на поверхности минералов полевых шпатов использована ИК спектроскопия диффузного отражения с последующим анализом смещения характерных реагентных пиков на ИК спектрах (BRUKER EQUINOX55). Определение удельной площади поверхности минералов для выяснения необходимой концентрации реагентов осуществлялось методом объемной адсорбции азота.

Флотационные испытания проводились в лабораторных флотомашинах различной конструкции и объема (Механобр, WEMCO, MineMet, AgitAir) и в различных модификациях многозонной флотомшины производительностью по пульпе до 5м³/ч. Проведены флотационные эксперименты в лабораторном и в опытно-промышленном масштабах в циркуляционном и проточном режимах.

Использованы следующие минеральные объекты: мономинералы магнетита, кварца, альбита и микроклина; минеральная смесь халькопирита и кварца; камерный продукт сульфидной медной флотации (месторождение Aitik, Швеция) и кварц-полевошпатовый продукт пегматитового месторождения.

Компьютерная обработка результатов исследований проводилась с использованием пакетов ПО MS Office, AutoCad, Adobe Photoshop, Eva, Topas, Niton и т.п.

Достоверность полученных результатов работы основывается на использовании большого объема экспериментальных данных, их воспроизводимости и статистической обработке, на применении современных аналитических методов и оборудования и выборочном многократном повторении экспериментов.

Научная новизна.

- установлена экстремальная зависимость между коэффициентом захвата минеральных частиц пузырьками воздуха и их крупностью при различных значениях энергии диссипации;

- обнаружен эффект повышения содержания извлекаемого компонента в пенном продукте при соударении пульповоздушной струи с препятствием в виде клинообразной вставки, что обусловлено механическим осыпанием слабогидрофобных и произвольно захваченных минеральных частиц с пузырьков воздуха при начальной скорости потока свыше 2,5 м/с;

- впервые обнаружено явление повышения селективности разделения тонких классов кварца и полевых шпатов при комплексном воздействии на процесс флотации реагентов различной молекулярной структуры: катионных и неионогенных и гидродинамических режимов: условий формирования и минерализации пузырьков воздуха и расслоения пульповоздушного потока.

Практическая значимость.

- разработана конструкция и создан экспериментальный образец пневматической многозонной флотомшины, в которой реализован подход повышения селективности за счет управления гидродинамическими режимами различных субпроцессов флотации, несовместимых по оптимальным гидродинамическим условиям;

- установлены закономерности влияния высоты реакторов (от 3,1 до 6,8 м) и коэффициента эжекции (от 0,1 до 0,8) на крупность пузырьков воздуха;

- Предложен новый элемент сепарационной камеры: клинообразная вставка способствующая осыпанию слабогидрофобных и механически извлеченных минеральных частиц с пузырьков воздуха за счет соударения пульповоздушной струи с препятствием при начальной скорости потока свыше 2,5 м/с, что приводит к снижению выноса пустой породы в пенный продукт: применительно к пиритным хвостам сульфидной медной флотации качество концентрата повысилось на 7,3 % (с 45,82 % до 53,12 % серы) без потери извлечения;

- экспериментально показана возможность повышения селективности разделения за счет комплексного воздействия на процесс флотации реагентов различной молекулярной структуры и гидродинамических режимов, что позволяет осуществить обогащение тонких классов кварц-полевошпатового сырья без применения фтористоводородной кислоты с получением кондиционного полевошпатового концентрата с содержанием суммы оксидов $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ равном 12,64 %;

- проведены сравнительные опытно-промышленные испытания разработанной конструкции и режимов работы многозонной флотомашин и механических флотомашин при равной производительности по пульпе 500 л/ч, показавшие технологические преимущества многозонной флотомашин по сравнению с импеллерными флотомашин: содержание полевых шпатов в концентрате повысилось на 9,9 %, извлечение полевых шпатов выросло на 7,2 %;

- на основании проведенной предварительной технико-экономической оценки эффективности внедрения многозонных флотомашин для пегматитовых месторождений кварц-полевошпатового сырья показано, что экономический эффект при их внедрении может составить от 20 до 56 млн. руб. в первые 2 года за счет снижения потерь ценного компонента с тонкими классами на 34 %.

На защиту выносятся:

- установленные закономерности влияния взаимного направления движения потоков пульпы и воздуха и времени пребывания пульпы в камере механической флотомашин на извлечение ценного компонента в концентрат;

- установленные закономерности влияния высоты реакторов (от 3,1 до 6,8 м) и коэффициента эжекции (от 0,1 до 0,8) на крупность пузырьков воздуха;

- конструкция пневматического многозонного флотационного аппарата, предусматривающая предварительное расслоение пульповоздушного потока за счет

центробежных сил, создаваемых в зоне реактора и отряхивание депрессируемых частиц с пузырьков воздуха в зоне сепаратора;

- результаты исследований комплексного воздействия оптимального реагентного и гидродинамического режимов на селективность флотации: усиление синергетических реагентных режимов за счет использования гидродинамических эффектов применительно к разделению тонких классов кварца и полевых шпатов без применения фтористоводородной кислоты.

Апробация работы.

Результаты исследований, приведённые в настоящей диссертационной работе, докладывались и обсуждались на ежегодной научной студенческой конференции МИСиС (Москва, 2009 г.), научном симпозиуме «Неделя Горняка» (Москва, 2010), IV France-Russia Conference «NAMES 2010»: New Achievements in Materials Sciences» (Нанси, Франция, 2010), 7-ой и 9-ой Международной научной школе молодых ученых и специалистов (Москва, 2010, 2012 – диплом за лучший доклад), Séminaire annuel RP2E (Нанси, Франция, 2011), VIII и IX Конгрессах обогатителей стран СНГ (Москва, 2011 г.), XXVI International Mineral Processing Congress «IMPC 2012» (Нью-Дели, Индия), международном совещании «Плаксинские чтения – 2012» (Петрозаводск, 2012).

Личный вклад соискателя заключается в непосредственном участии в разработке методик и проведении экспериментов, выборе методик и проведении части анализов исходных материалов и продуктов разделения, разработке и испытании экспериментальных образцов МФМ, в обработке и интерпретации полученных данных, а также участие в написании всех публикаций по выполненной работе.

Публикации.

По теме диссертационной работы опубликованы 7 статей в рецензируемых журналах, в том числе 4 в изданиях, рекомендованных ВАК, 8 тезисов докладов в сборниках конференций, 1 ноу-хау.

Структура и объём работы.

Диссертация изложена на 196 страницах и состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованной литературы из 192 наименований, 29 таблиц, 124 рисунков и 4 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности диссертационной работы, сформулированы цель и задачи работы.

В первой главе проведен анализ современных опубликованных источников, рассмотрены тенденции и проблемы развития флотационных процессов разделения тонковкрапленных руд с близкими поверхностными свойствами. Отмечено, что существуют две тенденции дальнейшего развития флотационных аппаратов: экстенсивный – увеличение объема флотокамер и интенсивный – повышение скорости и эффективности флотационных субпроцессов. Проведен обзор существующих аппаратов интенсивной флотации, показано, что, несмотря на их очевидные преимущества перед традиционными флотомашинами, они не свободны от недостатков, таких как отсутствие параметров, характеризующих оптимальные гидродинамические режимы, непроработанность конструкции отдельных зон флотомашин и имеют существенный потенциал модернизации.

Показано, что существующие реагентные режимы и потенциал их улучшения имеют предел эффективности, связанный со снижением крупности и контрастности поверхностных свойств перерабатываемых частиц. Отмечено, что одним из эффективных направлений повышения селективности разделения является применение реагентов различной молекулярной структуры.

Одним из современных направлений повышения селективности флотации является использование силовых воздействий на пульпы, таких как, ультразвуковые колебания, однако предлагаемые решения не реализуемы в промышленном масштабе из-за высокой диссипации энергии: наблюдается практически полное затухание УЗ колебаний на расстоянии 5 см от источника излучения.

Во всех без исключения областях, где используется или может использоваться классическая механическая флотация, так или иначе возможно применение многозонных флотомашин (МФМ), обеспечивающих не только технологические, но и очевидные экономические преимущества. Согласно данным компании Pneufлот применение аппаратов интенсивной флотации вместо классических флотомашин может сократить капитальные и эксплуатационные затраты почти вдвое за счет уменьшения производственных площадей, объема зданий, установочной мощности оборудования и общей стоимости оборудования.

Проблема флотационного разделения тонких частиц освещена в работах таких исследователей, как Годэн А.М., Дерягин Б.В., Духин С.С., Sutherland K.L., Ratcliff G.A., Yoon R.H., Ralston J., которые отметили, что для тонких и крупных частиц необходимы различные флотационные режимы, что связано не только с увеличением удельной площади поверхности, но и с изменением характера их движения и снижением вероятности соударения при уменьшении крупности разделяемых компонентов. Имеется три принципиальных подхода для повышения вероятности соударения: снижение крупности

пузырьков, увеличение крупности частиц и создание аппаратов, обеспечивающих высокую интенсивность взаимодействия пузырек/частица.

Проблемы, возникающие при современной переработке сырья невозможно решить с помощью только аппаратного или только реагентного подходов, следовательно необходимы новые комплексные решения. В связи с этим выделены следующие основные тенденции дальнейшего развития процессов флотационного разделения: тонких слабоконтрастных руд:

- более широкое применение аппаратов интенсивной флотации и их дальнейшая модернизация;
- применение сочетания реагентов различной молекулярной структуры для достижения синергетических эффектов;
- наложение внешних силовых полей на пульпу, например ультразвуковых колебаний.

На основе анализа существующих исследований в рассматриваемой области и подходов к их решению сформулированы основные задачи исследования. Основной идеей работы является совместное использование синергетических эффектов реагентов различной молекулярной структуры, например катионных и неионогенных и усовершенствованных конструкций аппаратов, обеспечивающих создание оптимальных гидродинамических режимов для повышения селективности разделения.

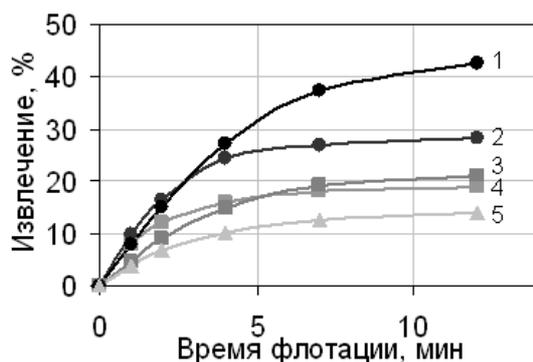
Во второй главе приведены результаты исследований влияния гидродинамических режимов работы многозонной флотомашин на дисперсность газовой фазы, коэффициент эжекции, коэффициент захвата минеральных частиц и на технологические показатели разделения с целью поиска условий проявления гидродинамических эффектов, обеспечивающих повышение селективности разделяемых компонентов. Исследовано влияние следующих факторов:

- направления движения и времени пребывания пульпы в камере флотомашин;
- конструктивных особенностей МФМ (количества и длины реакторов, диаметра сопла аэратора) на коэффициент эжекции дисперсность газовой фазы;
- ультразвуковых воздействий на кинетику флотации.

Приведены результаты исследования взаимного расположения точек ввода и вывода пульпы, времени пребывания пульпы в камере и влияние возникающих в этих случаях гидродинамических эффектов на кинетику флотации частиц магнетита при различном времени пребывания потока в камере лабораторной механической флотомашин.

Установлено, что при увеличении времени пребывания пульпы в интервале от 7 до 100 с наблюдается рост извлечения независимо от направления движения пульпы (рисунок 1). Отмечено, что при продольном движении (ввод и вывод пульпы находятся в

подпенном слое, поток пульпы перпендикулярен потоку воздуха) извлечение в 1,5 раза больше, чем при противоточном (пульпа вводится в верхней, а выводится в нижней части камеры, что создает противоточное движение пульпы и воздуха), что связано с меньшим увлечением потока минерализованных пузырьков в хвосты. При этом удельная минеральная нагрузка на единицу объема воздуха почти в три раза (от 9 до 24 г/л за первую минуту флотации) при изменении времени пребывания от 7 до 100 с.



1 – продольное 100 с; 2 – противоточное 100 с; 3 – продольное 60 с; 4 – противоточное 60 с;
5 – противоточное 7 с

Рисунок 1 – Зависимость выхода концентрата от времени флотации для продольного и противоточного направления движения потока при различном времени пребывания пульпы

С помощью компьютерного моделирования было определено влияние турбулентности и энергии диссипации в зоне минерализации - реакторе на субпроцессы захвата и отрыва частиц и пузырьков при различном соотношении их размеров. Принято допущение что в реакторе происходили только два субпроцесса: захват частиц пузырьками воздуха и их отрыв.

Кинетической характеристикой субпроцессов захвата и отрыва являются коэффициенты интенсивности захвата - K_{12} и отрыва - K_{21} . Извлечение частиц на пузырьки в реакторе (ε_r) рассчитывали по формуле:

$$\varepsilon_r(t) = (1 - \exp(-K_{12} \cdot t)) \quad (1)$$

Полученные результаты моделирования подтверждают возможность установления оптимального гидродинамического режима в реакторе для частиц различной крупности и гидрофобности путем применения пузырьков различного диаметра и поддержанием определенного уровня диссипации энергии турбулентности. Установлена зависимость оптимального размера пузырька от крупности и гидрофобности частиц при различных

значениях энергии диссипации. Показано, что для частиц с меньшей гидрофобностью интенсивность отрыва возрастает быстрее, чем для частиц с большей гидрофобностью.

Оптимальный размер пузырьков d_b для частиц различной крупности зависит от степени гидрофобности частиц. При краевом угле $\theta = 35^\circ$ - d_b зависит от размера частиц. Для $d_p = 20$ мкм $d_{bm} = 40-50$ мкм. Для $d_p = 50$ мкм, $d_b = 250 - 300$ мкм. Для $d_p = 100$ мкм, $d_b = 800 - 1000$ мкм. С увеличением диаметра частиц возрастает оптимальный размер пузырька. При краевом угле $\theta = 75^\circ$ - d_b смещается в сторону меньших размеров пузырьков. Для $d_p = 20$ мкм. $d_{bm} = 20-30$ мкм. Для $d_p = 50$ мкм, $d_{bm} = 150-160$ мкм. Для $d_p = 100$ мкм, $d_{bm} = 500 - 600$ мкм.

С целью исследования влияния конструкционных параметров, таких как длина и количество зон минерализации - реакторов и диаметр сопла аэратора на дисперсность газовой фазы реализована серия экспериментов на сконструированной нами модульной пилотной установке многозонной флотационной машины типа реактор-сепаратор РС-50 с переменным объемом и конструкцией сепаратора, количеством и длиной реакторов и производительностью до $5 \text{ м}^3/\text{ч}$. Крупность пузырьков рассчитывалась косвенным методом через определения газосодержания в сепарационной камере из разницы гидростатического давления на различных уровнях колонной части аппарата.

В результате проведенных исследований установлено, что характер изменения крупности пузырьков в зависимость от высоты реакторов имеет экстремальную зависимость, которая сохраняется для различных концентраций пенообразователя. Минимальный диаметр пузырьков (порядка 400 мкм) формируется в реакторах длиной 4,6 м при расходе воздуха 50 л/ч (рисунок 2а). Наличие экстремума соблюдается для различных концентраций пенообразователя.

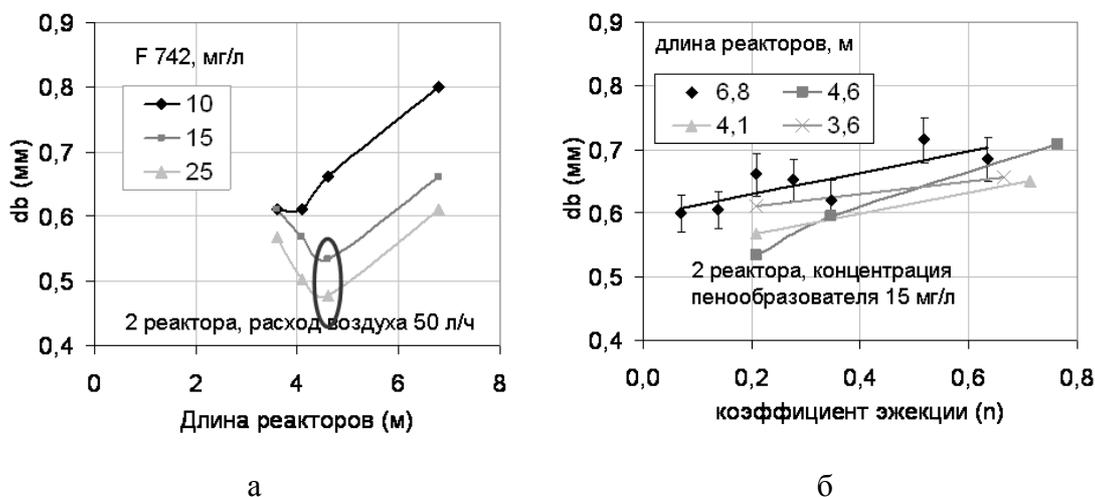


Рисунок 2 – Зависимость среднего диаметра пузырьков от длины реакторов при различных концентрациях пенообразователя (а) и при различных длинах реакторов (б)

Полученные зависимости среднего диаметра пузырька от коэффициента эжекции (рисунок 2б) показывают, что средний диаметр пузырьков увеличивается с увеличением коэффициента эжекции. Уменьшение среднего диаметра пузырьков приводит к увеличению газонаполнения в сепараторе за счет их более медленного всплытия и, следовательно, нахождения в объеме сепаратора большего объема воздуха и большего количества пузырьков.

Таким образом, возможно управлять крупностью пузырьков воздуха и коэффициентом эжекции, изменяя высоту и количество реакторов и диаметр сопла аэратора. Полученные зависимости актуальны при выборе конструкции аппарата для конкретного типа руды.

Исследования влияния ультразвуковых воздействий (УЗВ) в проточном режиме на кинетику флотации в многозонной флотационной машине на примере разделения минеральной смеси халькопирит-кварц (соотношение халькопирит/кварц 1:3) показали, что УЗВ позволяет повысить селективность разделения (рисунок 3а): прирост извлечения халькопирита на 15-20 % при сохранении качества концентрата, но при изменении частоты УЗ-колебаний в исследуемом диапазоне существенных изменений не наблюдается.

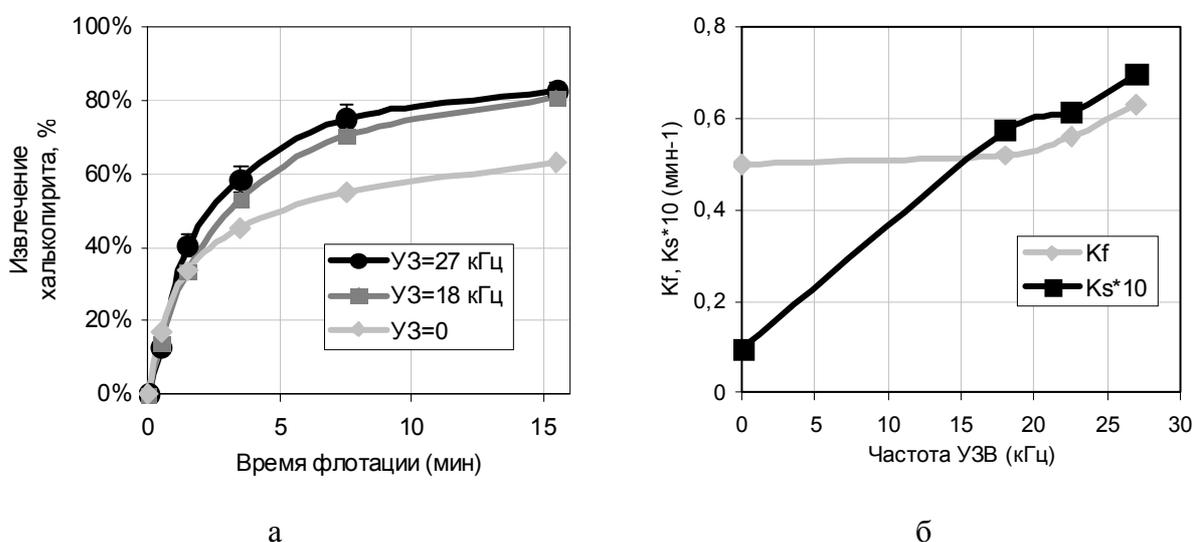


Рисунок 3 – Кинетика извлечения халькопирита при различных значениях частоты УЗВ (а) и изменения констант скорости флотации медленно и быстрофлотируемых частиц в зависимости от частоты УЗВ (б)

Отмечено, что выход концентрата при ультразвуковом воздействии (УЗВ) частотой 27 кГц повышается с 19,1 % до 24,8 %. Содержание халькопирита в пенном продукте снижается к концу флотации с 89,3 до 82,5 % без УЗВ и с 93,6 до 83,5 % при УЗВ (27 кГц).

Таким образом, повышение извлечения халькопирита в концентрат при УЗВ объясняется, увеличением выхода концентрата, а не повышением содержания халькопирита в нем.

Для анализа кинетики флотации была использована трехпараметрическая модель Келсалла, включающая в себя константы скорости для быстро и медленнофлотируемых фракций.

$$\varepsilon = (1 - \Phi)[1 - \exp(-K_f t)] + \Phi[1 - \exp(-K_s t)] \quad (2)$$

где Φ – доля медленно флотируемой фракции;

K_f – константа скорости флотации для быстрофлотируемой фракции;

K_s – константа скорости флотации для медленнофлотируемой фракции.

Изменение констант скорости флотации для быстро- и медленнофлотируемых фракций, рассчитанное с помощью модели Келсалла, в зависимости от частоты УЗВ, показывает, что константа скорости медленнофлотируемых частиц при УЗВ увеличивается в 6 раз, а быстрофлотируемых – всего на 8 % при изменении частоты колебаний с 0 до 27 кГц (рисунок 3б). При изменении частоты УЗВ от 18 до 27 кГц значительных изменений не наблюдалось.

Влияние УЗВ на кинетику флотации халькопирита может быть объяснено с помощью гипотезы дополнительной активации поверхности гидрофобной поверхности халькопирита кавитационными пузырьками, генерируемыми посредством УЗВ.

Преимущества многозонной флотационной машины по сравнению с флотационными машинами других типов заключаются в наличии пространственно обособленной проточной зоны - реактора, в которой возможно организовать специальную зону для УЗВ с низкой диссипацией энергии. Организация специальной зоны в МФМ позволяет осуществлять импульсную ультразвуковую обработку в проточном режиме с малой диссипацией энергии и продолжительностью обработки порядка 0,1 с. Данный подход позволяет управлять процессами соударения, закрепления и селективного отрыва минеральных частиц с поверхности пузырьков воздуха.

Таким образом, в результате проведенных исследований были определены области проявления гидродинамических эффектов, выражающиеся в формировании высокодисперсных газовых сред, возможности управления ими и показано, как за счет их использования можно управлять селективностью разделения.

В третьей главе представлены результаты изучения условий существования синергетических эффектов совместного применения реагентов различной молекулярной структуры на примере разделения полевых шпатов и кварца. Данный подход позволит исключить применение фторид-ионов, вызывающих как экологические, так и эксплуатационные (коррозия оборудования) проблемы. Существующие технологии разделения кварца и полевых шпатов без применения HF неэффективны для тонких классов (-100 мкм), что приводит к потерям до 37 % от исходного материала. Поэтому, необходимо разработать эффективную безфторидную технологию разделения тонких классов полевых шпатов и кварца основанной на синергетических эффектах реагентов различной молекулярной структуры и оптимизации гидродинамических режимов.

Согласно гипотезе, предложенной в работах Филиппова Л.О., при совместном использовании амина и длинноцепочного изоспирта в интервале рН 1,5-2 возможна преимущественная адсорбция реагентов на поверхности минералов полевых шпатов, способствующая гидрофобизации их поверхности при минимальной адсорбции на кварце. Таким образом создается контрастность флотационных свойств полевых шпатов и кварца. Однако, при увеличении концентрации реагентов или изменении значения рН может произойти перераспределение реагентов на поверхность кварца. Преимущественная адсорбция реагентов на поверхности полевых шпатов обеспечивается ее большей электроотрицательностью чем поверхности кварца и сходством радиусов углеводородной цепи и расстоянием между соседними адсорбционными центрами – 2,73 Å, что способствует стабилизации адсорбционного монослоя за счет дисперсионных взаимодействий между углеводородными радикалами.

Первая часть исследований заключалась в подтверждении данной гипотезы и поиске условий разделения полевых шпатов и кварца без применения фтористоводородной кислоты за счет применения синергетических эффектов реагентов различной молекулярной структуры. С помощью ИК спектроскопии определено, что при совместном применении катионного длинноцепочного амина и неионогенного изоспирта с длиной углеводородных радикалов R16 в сернокислой среде (рН 1,75-1,8) на поверхности минералов полевых шпатов образуется структура адсорбционного слоя близкая к монослою (рисунок 4). Сходство ИК-спектров в случае с применением HF и смеси реагентов подтверждает создание аналогичного монослоя на поверхности минералов полевых шпатов без применения фтористоводородной кислоты.

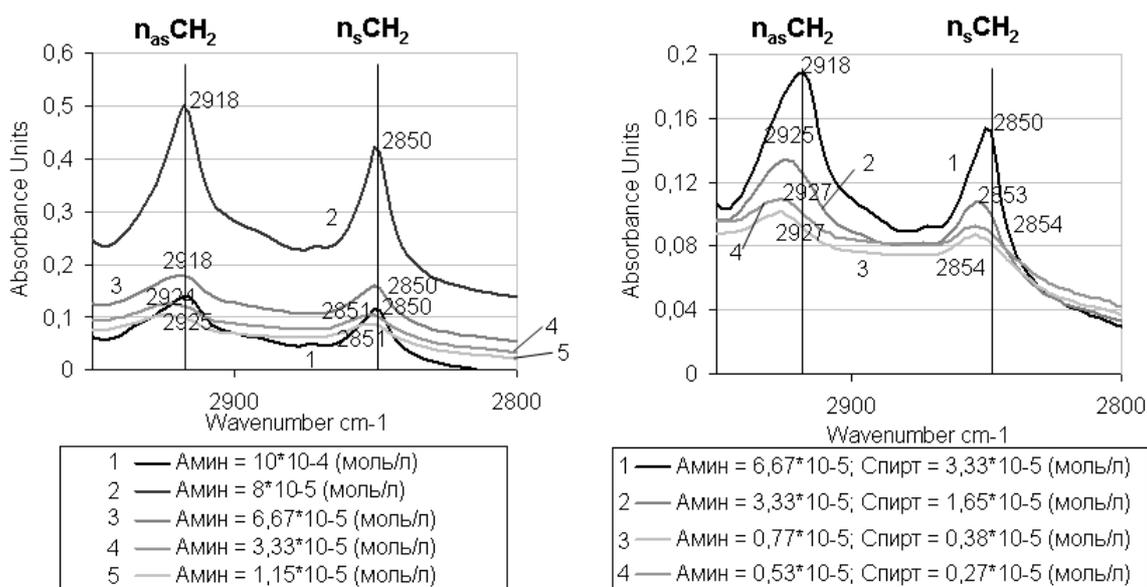


Рисунок 4 – ИК-спектры сорбции амина на микроклин с предварительной обработкой HF (слева) и без нее (справа)

В четвертой главе приведены результаты сравнительных технологических испытаний разработанной конструкции МФМ на примере двух минеральных объектов: камерного продукта сульфидной медной флотации (месторождение Aitik, Швеция) и тонких классов кварц-полевошпатного продукта пегматитового месторождения и сравнение результатов, полученных в МФМ с импеллерными флотомашинами.

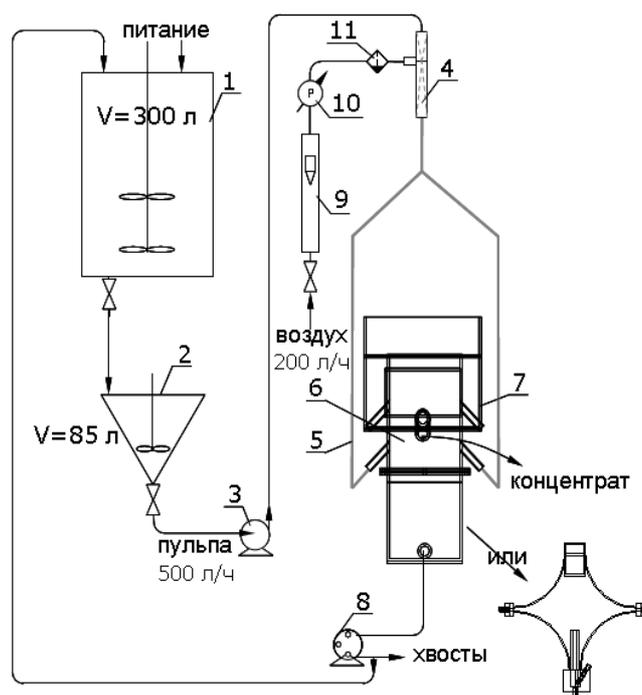
Первым объектом являлись пиритные хвосты следующего химического состава: $S_{\text{общ}}$ – 28,58 %; $Fe_{\text{общ}}$ – 27,70 %; SiO_2 – 26,66 %; Al_2O_3 – 6,87 %; CaO – 2,24 %; K_2O – 1,59 %; MgO – 1,32 %; Na_2O – 1,14 %; TiO_2 – 0,38 %; Cu – 270 ppm. По результатам химического, электронно-микроскопического и рентгенофазового анализов, а так же с помощью специализированных программ (Torus, Eva) и методик расчета фазового состава пробы (CIPW), был определен минеральный состав исходных пиритных хвостов: пирит – 51 %; биотит – 20 %; кварц – 9 %; амфиболы – 7 %; альбит – 7 %; прочие – 6 %. Материал в исходной пробе распределен по классам крупности равномерно: содержание класса -40 мкм равно 52 %.

Электронно-микроскопический анализ показал наличие сростков сульфидов с пустой породой, преимущественно относящихся к верхним классам крупности и являющихся потенциальной причиной взаимного загрязнения концентратов и хвостов флотации. Включения сульфидов могут иметь внутренний характер и сложную форму, что создает дополнительные сложности при разделении.

Проведено сравнение двух гидродинамических режимов расслоения пульповоздушного потока в сепарационной камере МФМ: за счет удара и в спокойных

условиях. Полученные результаты сравнены с показателями, достигнутыми в лабораторных импеллерных флотомашинах.

Исследования проводились в экспериментальном образце МФМ (рисунок 5), позволяющем вести флотацию в циркуляционном и проточном режимах. Установка работает следующим образом: навеска руды и необходимый объем воды помещаются в контактный чан 1 (в случае проточного режима работы) или непосредственно в зумпф насоса 2 (в случае циркуляционного режима работы), где происходит создание и кондиционирование пульпы с реагентами. После чего, с помощью центробежного насоса 3 пульпа подается в струйный аэратор 4 (производительность насоса 3 для всех экспериментов серии поддерживалась на уровне 500 л/ч). В аэратор 4 подается также воздух (сжатый или с помощью автоэжекции), расход воздуха регулируется воздушным расходомером 9, а его давление – воздушным манометром 10. В аэраторе 4 происходит смешение пульпового и воздушного потоков с диспергацией воздушного потока на тонкие пузырьки воздуха (мельче 1 мм).



1 – контактный чан; 2 – зумпф насоса; 3 – центробежный насос; 4 – аэратор; 5 – реакторы; 6 – сепаратор; 7 – пенный желоб; 8 – перистальтический насос; 9 – воздушный расходомер; 10 – воздушный манометр; 11 – гидроловушка

Рисунок 5 – Схема установки экспериментального образца многозонной флотомашины

Аэрированная пульпа поступает в реакторы 5, двигаясь по ним в турбулентном режиме со средней скоростью 2,5 м/с (скорость только пульпы), где и происходит закрепление минеральных частиц на поверхности пузырьков воздуха. Далее, аэрированная пульпа поступает в камеру сепаратора 6, где происходит ее замедление и расслаивание на

пенный и камерный продукты. Пенный продукт выводится через пенный желоб 7, а камерный продукт откачивается перистальтическим насосом 8 либо в контактный чан 1 (при проточном режиме работы), либо в зумпф насоса 2 (при циркуляционном режиме работы), либо в емкость для сбора хвостов (при заключительном цикле флотации).

Установка МФМ (рисунок 5) оборудована двумя типами прозрачных сепарационных камер (рисунок 6), позволяющими исследовать эффективность расслоения пульповоздушного потока по конечным показателям разделения.

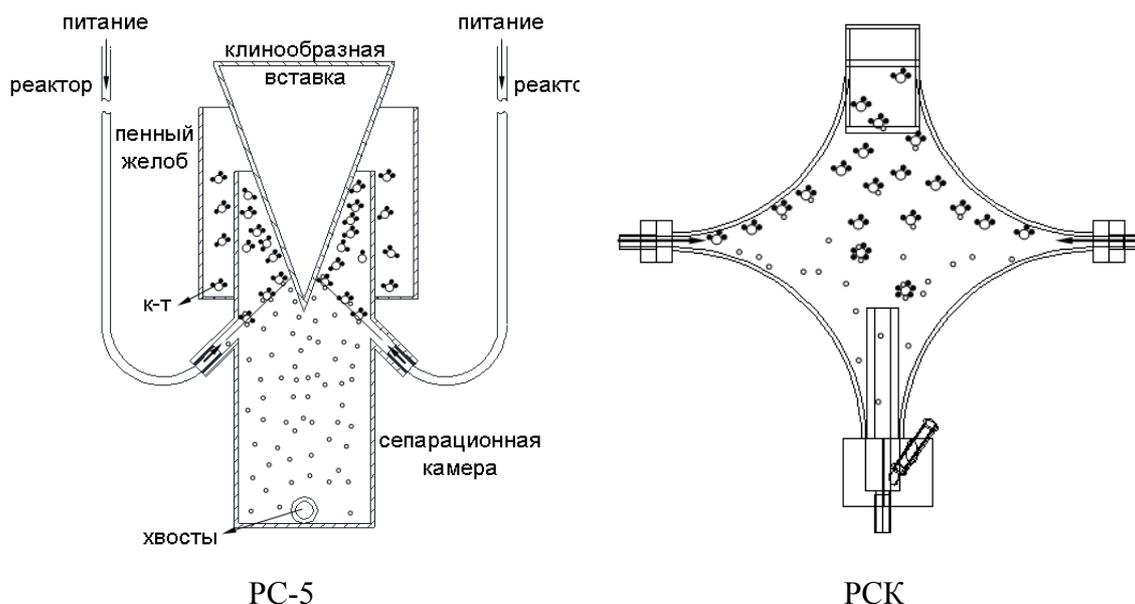


Рисунок 6 – Сепарационные камеры с расслоением за счет удара (РС-5) и спокойным расслоением (РСК) пульповоздушной смеси

Использованы следующие реагенты: серная кислота для регулирования pH (6,4 – 6,6); собиратель - этиловый ксантогенат натрия, пенообразователь - смесь полиглицолей F-742.

Сравнение конечных показателей обогащения двух типов МФМ и лабораторных флотомашин (рисунок 7) показывает возможность получения в МФМ как пиритного концентрата высшего сорта (содержание серы 51,2 %, пирита 91,5 %), так и более высокого извлечения (98,2 %). При равном расходе собирателя (100 г/т) конечные извлечения в двух модификациях МФМ находятся на одном уровне (95,6 % в РС-5 и 98,2 % в РСК), в то время как содержание пирита в флотационных концентратах при данном режиме сильно отличалось (78,5 % в РС-5 и 65,6 % в РСК). МФМ РС-5 демонстрирует оптимальное соотношение содержание/извлечение пирита при низком расходе собирателя (75 г/т). Конечные показатели при данном режиме следующие: содержание пирита 91,5 % (51,2 % серы) при извлечении 91,6 %.

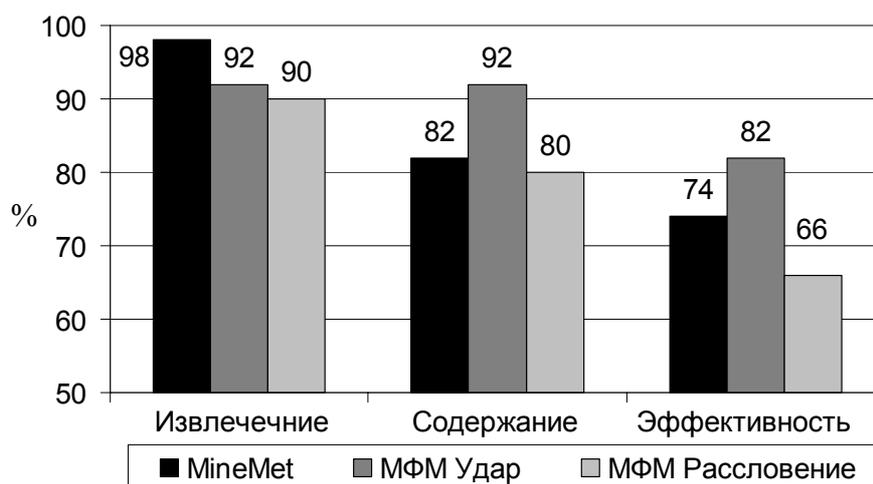


Рисунок 7 – Сравнение конечных показателей разделения в различных флотомашинах

Более высокое качество концентрата в РС 5 связано с отряхивающим эффектом, возникающим вследствие удара трехфазной струи о препятствие, в то время как в РСК имеет место механический вынос пустой породы в пенный продукт. Выход концентрата в камере РСК на 5-15 % выше, чем в камере РС-5, при сопоставимом извлечении, что объясняется более низкой эффективностью расслоения пульповоздушного потока и механическим выносом в пену частиц пустой породы в камере РСК.

Рентгенофазовый и химический анализ концентратов и хвостов МФМ показали возможность получения чистого пиритного концентрата (содержание серы – 53,12 %) и безсульфидных хвостов (минимальное полученное содержание серы – 0,65 %). Основными причинами загрязнения концентрата являются сростки и механически вынесенные частицы пустой породы.

Все исследуемые лабораторные машины (MineMet, AgitAir и WEMCO) периодического действия показали высокое извлечение (96-98 %) при среднем содержании серы в концентратах 39-49 %.

Высокая эффективность МФМ также объясняется в 1,5 раза более высокой минеральной нагрузкой пузырьков воздуха чем в лабораторных флотомашинах, что может быть связано с меньшей крупностью пузырьков в МФМ, чем в лабораторных флотомашинах (1,0-1,5 мм) и с более высокой вероятностью соударения минеральных частиц и пузырьков воздуха в зоне минерализации – реакторе.

Следующим объектом флотационных испытаний являлись тонкие классы кварц-полевошпатового продукта. Исследовалась возможность повышения селективности разделения с помощью гидродинамических эффектов, возникающих в МФМ.

Исследуемая проба является исходным питанием полевошпатовой флотации одного из действующих предприятий, перерабатывающих пегматитовые руды. Подготовка

материала для флотационных испытаний осуществлялась по следующей схеме: предварительно обесшламленная руда (19 % -150 мкм) крупностью - 1 мм поступала на грохочение по классу 150 мкм, после чего класс +150 мкм отправлялся на магнитную сепарацию для удаления мусковита (3 % в исходной пробе). Немагнитная фракция доизмельчалась на валковой дробилке, работающей в замкнутом цикле с грохотом.

Химический состав подготовленной пробы следующий: SiO_2 – 79,88 %; Al_2O_3 – 11,80 %; Na_2O – 4,92 %; K_2O – 3,60 %; Fe_2O_3 – 0,09 %. Фазовый состав представлен альбитом (48 %), микроклином (24 %), кварцем (28 %) и незначительным количеством мусковита (менее 1 %). Содержание класса +80 мкм – 63,1 %.

Флотационные испытания включали в себя следующие этапы:

- флотацию в лабораторной механической флотомашине WEMCO (крупность материала -150 мкм и -500 +100 мкм);
- флотацию в опытно-промышленной флотационной установке производительность установки 500 л/ч по пульпе (-500 +100 мкм);
- флотацию в многозонной флотационной машине (рисунок 5) с сепарационной камерой РС-5 с расслоением за счет удара (рисунок 6) производительностью по пульпе также 500 л/ч (-150 мкм).

Результаты флотации в лабораторной флотомашине показали, что режим без применения HF позволяет получать более высокое содержание полевых шпатов в концентрате (содержание кварца менее 1 %), однако извлечение значительно ниже (не более 60 %), чем в случае с применением HF. Предварительное обесшламливание пробы позволяет значительно повысить извлечение материала в концентрат (до 85 %) без применения HF. При применении HF лучшие результаты были следующими: извлечение 88,6 % при массовой доле полевых шпатов в концентрате 95,2 %.

Анализ эффективности по Ханкок-Люйкену показал, что применение HF позволяет получать результаты с большей эффективностью (на уровне 75-80 %), а без HF эффективность стабилизируется на уровне 56-58 %, начиная с расхода амина 500 г/т. Однако, при обесшламливании исходной пробы по классу 30 или 50 мкм в режиме без HF возможно получать результаты сравнимые или выше, чем с применением HF.

Отмечено, что в опытно-промышленных флотационных установках (механические флотомшины) даже применение HF для необесшламленного продукта не позволяет достигнуть удовлетворительных результатов по извлечению полевого шпата.

Для повышения эффективности разделения в МФМ исходная проба была обесшламлена по классу 30 мкм. В этом случае потери полевых шпатов составят порядка 8 % от класса -150 мкм, а эффективность разделения повысится до 54,3 %. При обесшламливании

материала по классу 50 мкм потери составят порядка 17 %, а эффективность повышается до 73,1 %.

Сравнение МФМ и опытно-промышленной флотационной установки (рисунок 8) доказывает технологические преимущества аппаратов интенсивной флотации в плане повышения извлечения (78,1 % в МФМ против 73,9 % в механических флотомашинах), качества концентрата (90,3 % против 82,3 %) и эффективности разделения (55,2 % против 48,5 %).

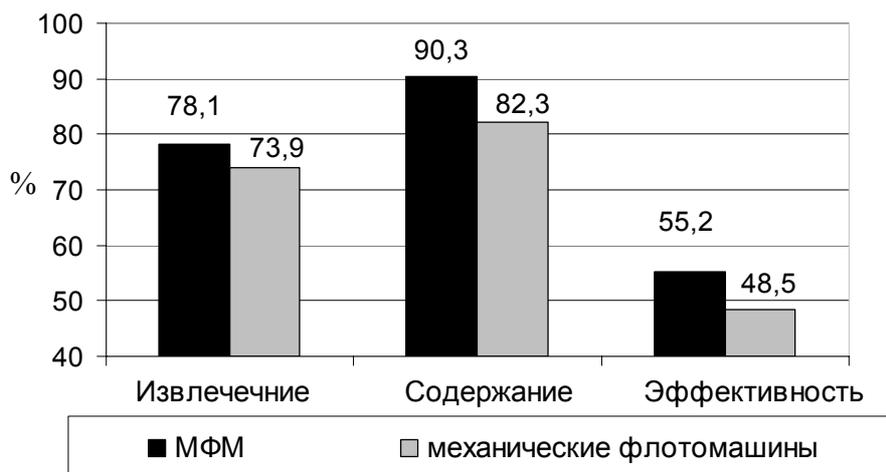


Рисунок 8 – Сравнение показателей разделения в МФМ и опытно-промышленной установке (механические флотомашины)

При сравнении технико-экономических показателей опытно-промышленной флотационной установки (4 флотокамеры MineMet, эффективный объем камеры - 25 л) и МФМ было отмечено снижение энерго и металлоемкости и повышение удельной производительности при применении МФМ (таблица 1). Также предполагается снижение эксплуатационных затрат и повышение ремонтпригодности за счет отсутствия движущихся частей (импеллера).

Таблица 1 – Сравнение технико-экономических показателей МФМ и механических флотомашин

Тип флотомашин	Механические	МФМ
Производительность, л/ч	500	500
Количество камер, шт	4	3
Объем одной камеры, л	25	5
Общий объем камер, л	100	15
Расход эл/энергии, Вт/ч	3000	750
Расход эл/энергии на одну камеру, Вт/(ч*камеру)	750	250
Эффективность разделения, %	41,6	55,2

Таким образом, переработка тонких классов кварц-полевошпатного продукта в МФМ позволила получить кондиционный полевошпатный концентрат с содержанием суммы оксидов $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ до 12,64 %. Применение МФМ позволит исключить применение HF, вовлечь в переработку тонкие классы полевых шпатов и снизить капитальные и эксплуатационные затраты, что существенно повысит рентабельность производства.

В результате проведенных технологических испытаний многозонной флотомашины были доказаны ее преимущества по сравнению с механическими флотомашинами при переработке тонких продуктов не только в технологическом, но и технико-экономическом плане.

В пятой главе приведено технико-экономическое сравнение исследуемой МФМ с существующими на рынке аппаратами интенсивной флотации с целью определения конкурентных преимуществ разрабатываемого аппарата.

Поскольку МФМ пока представлена только экспериментальным образцом, то для сравнения с ней брались младшие модели в линейке таких аппаратов интенсивной флотации как Jameson Cell и Pneuflot (таблица 2).

Таблица 2 – Сравнительные характеристики различных флотомашин интенсивной флотации

Характеристика	МФМ	Jameson Cell	Pneuflot
Модель	ЭО МФМ	Z1200/1	Pneuflot
Типоразмер (габариты), м	0,15x0,15	1,2*0,75	1,2*0,75
Объем, м ³	0,005	1,5	1,5
Установочная площадь, м ²	0,04	4	4
Производительность по пульпе, м ³ /ч	0,5	50	30
Удельная производительность, м ³ /ч/м ³	100	33,3	20
Удельная установочная площадь, м ² /(м ³ /ч)	0,08	0,08	0,13

МФМ по сравнению с прочими аппаратами интенсивной флотации (таблица 2) демонстрирует аналогичные или превосходящие характеристики в плане уменьшения объема сепарационных камер, занимаемой площади и удельной производительности на единицу объема камеры (в 3-5 раз). Также существенно повышается стабильность работы МФМ за счет отсутствия пористых поверхностей. Кроме того, за счет выделения большего числа зон и организации потоков внутри сепарационной камеры можно ожидать также повышение технологических показателей, за счет создания оптимальных гидродинамических условий

для каждого флотационного субпроцесса или добавления какого-либо внешнего воздействия (например, ультразвукового);

Проведена предварительная укрупненная технико-экономическая оценка для двух пегматитовых месторождений кварц-полевошпатового сырья: экономический эффект при внедрении многозонной флотомашины может составить от 20 до 56 млн.руб. в первые 2 года за счет снижения потерь ценного компонента с тонкими классами на 34 %.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Анализ литературных источников показал, что ни развитие флотационных аппаратов, ни усовершенствование реагентных режимов не в состоянии по отдельности обеспечить приемлемые показатели при переработке сложных тонковкрапленных руд, что связано с высокой удельной поверхностью тонкого материала и особенностями характера движения частиц;

2. Разработаны способ флотации тонких классов слабоконтрастных руд и конструкция экспериментального образца пневматической многозонной флотомашины, в которой реализован подход повышения селективности разделения тонких классов слабоконтрастных руд за счет управления гидродинамическими режимами различных субпроцессов флотации, несовместимых по оптимальным гидродинамическим условиям. В опытно-промышленном масштабе подтверждено повышение селективности за счет управления гидродинамическими режимами субпроцессами минерализации, отрыва и перехода минерализованных пузырьков в пенный продукт;

3. Выявлены качественно новые закономерности влияния гидродинамического режима флотации, обусловленного режимом минерализации пузырьков воздуха (крупностью минеральных частиц и пузырьков воздуха), способом подачи пульпы в сепарационную камеру и ее дальнейшим расслоением, на коэффициент захвата минеральных частиц пузырьками воздуха и на селективность разделения;

4. Изложены и экспериментально-расчетным путем подтверждены факты наличия экстремальной зависимости между коэффициентом захвата минеральных частиц пузырьками воздуха и их крупностью, зависящей от высоты зоны минерализации - реакторов (от 3,1 до 6,8 м) и коэффициента эжекции (от 0,1 до 0,8), что позволяет определять оптимальные условия минерализации пузырьков воздуха. Выявлены и установлены зависимости влияния взаимного направления движения потоков пульпы и воздуха, времени пребывания пульпы в камере механической флотомашины на извлечение ценного компонента в концентрат;

5. Предложен новый элемент сепарационной камеры: клинообразная вставка способствующая осыпанию слабогидрофобных и механически извлеченных минеральных

частиц с пузырьков воздуха за счет соударения пульповоздушной струи с препятствием при начальной скорости потока свыше 2,5 м/с, что приводит к снижению выноса пустой породы в пенный продукт: применительно к пиритным хвостам сульфидной медной флотации качество концентрата повысилось на 7,3 % (с 45,82 % до 53,12 % серы) без потери извлечения;

6. Впервые обнаружена и экспериментально доказана возможность повышения селективности разделения за счет комплексного воздействия на процесс флотации реагентов различной молекулярной структуры и гидродинамических режимов, что позволяет осуществить обогащение тонких классов кварц-полевошпатового сырья, в том числе, и без применения фтористоводородной кислоты с получением кондиционного полевошпатового концентрата с содержанием суммы оксидов $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ равном 12,64 %;

7. Проведены сравнительные опытно-промышленные испытания разработанной конструкции и режимов работы многозонной флотомашин и механических флотомашин при равной производительности по пульпе 500 л/ч, показавшие технологические преимущества многозонной флотомашин по сравнению с импеллерными флотомашин: содержание полевых шпатов в концентрате повысилось на 9,9 %, извлечение полевых шпатов выросло на 7,2 %;

8. Показаны конкурентные преимущества МФМ по сравнению с механическими флотомашин и существующими промышленными образцами прочих аппаратов интенсивной флотации в части удельного расхода электроэнергии, удельной производительности, удельной установочной площади и эксплуатационной надежности при равных или превосходящих технологических показателях работы.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Филиппов Л.О., Филиппова И.В., Матинин А.С., Самыгин В.Д. Сравнительные исследования эффективности обогащения в многозонной и лабораторных флотационных машинах на примере тонких пиритных хвостов // Цветные Металлы. 2012. № 11. С. 26-31.

2. Филиппов Л.О., Матинин А.С., Лехатинов Ч.А. Повышение кинетики флотации в многозонной флотационной машине типа реактор-сепаратор под влиянием импульсных воздействий в проточном режиме // Горный журнал. 2012. № 9. С. 102-106.

3. Филиппов Л.О., Самыгин В.Д., Северов В.В., Матинин А.С. Влияние ультразвукового воздействия на флотацию в реакторе-сепараторе руд различной степени контрастности // Цветные металлы. 2012. № 6. С. 15-20.

4. Самыгин В.Д., Филиппов Л.О., Матинин А.С., Северов В.В. Влияние направления движения и времени пребывания потока пульпы в камере флотомашин на эффективность флотационного процесса // Горный информационно-аналитический бюллетень (отдельные статьи). 2011. № 11. 20 С.
5. Филиппов Л.О., Самыгин В.Д., Матинин А.С., Лехатинов Ч.А., Филиппова И.В. Способ ввода реакторов в сепарационную камеру пневматической многозонной флотационной машины. Ноу-хау № 7-009-2013 ОИС от 26.03.2013.
6. Filippov L.O., Matinin A.S., Samiguin V.D., Filippova I.V. Effect of ultrasound on flotation kinetics in the reactor-separator // Journal of Physics: Conference Series. 2013. Vol. 416(1) doi:10.1088/1742-6596/416/1/012016. 6 p.
7. Filippov L.O., Samiguin V.D., Severov V.V., Matinin A.S., Filippova I.V. The effect of the ultrasonic treatment of the air-pulp flow upon the flotation // In: Proceedings of XXVI International Mineral Processing Congress «IMPC 2012», New Delhi, India, 24 - 28 September 2012, p. 1433-1442.
8. Филиппов Л.О., Филиппова И.В., Матинин А.С., Самыгин В.Д. Влияние способа расслоения пульпы в сепарационной камере многозонной флотационной машины на эффективность разделения // Сборник материалов «IX Конгресс обогатителей стран СНГ», Москва, 26-28 февраля 2013. Т. II. С. 721-724.
9. Матинин А.С., Филиппов Л.О., Филиппова И.В., Самыгин В.Д. Вовлечение в переработку тонких классов кварц-полевошпатного сырья за счет применения многозонной флотационной машины // Сборник материалов 7-ой Международной научной школы молодых ученых и специалистов, Москва, 19-23 ноября 2012. С. 438-440.
10. Филиппов Л.О., Самыгин В.Д., Матинин А.С., Филиппова И.В., Лехатинов Ч.А. Влияние ультразвукового воздействия на флотацию в реакторе-сепараторе руд различной степени контрастности // Сборник материалов «VIII Конгресс обогатителей стран СНГ», Москва, 28 февраля – 2 марта 2011. Т. II. С. 134-138.
11. Filippov L.O., Matinin A.S., Samiguin V.D. Determination of the domain of finely dispersed air bubble in the reactor-separator // In: Proceedings of «NAMES 2010»: New Achievements in Materials Sciences», Nancy, France, 26-29 October 2010. p. 23.
12. Самыгин В.Д., Филиппов Л.О., Матинин А.С. Влияние времени пребывания пульпы в камере флотомашин на константу скорости флотации // Сборник материалов международного совещания «Плаксинские чтения 2010», Казань, 2010. С. 207-211.