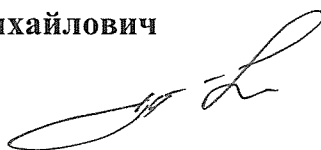


На правах рукописи

Никитин Роман Михайлович



**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ РАЗДЕЛЕНИЯ
МИНЕРАЛОВ ФЛОТАЦИЕЙ
В АКТИВИРОВАННЫХ ВОДНЫХ ДИСПЕРСИЯХ
ВОЗДУХА ПРИ ОБОГАЩЕНИИ
АПАТИТ-НЕФЕЛИНОВЫХ РУД**

Специальность 25.00.13 - Обогащение полезных ископаемых

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

Санкт-Петербург – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр Российской академии наук».

Научный руководитель:

доктор технических наук

Скороходов Владимир Федорович

Официальные оппоненты:

Ксенофонтов Борис Семенович

доктор технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э.Баумана», профессор

Ромашев Артем Олегович

кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет», кафедра обогащения полезных ископаемых, доцент

Ведущая организация - федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук.

Защита диссертации состоится 13 декабря 2018 г. в 12 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.224.03 при Санкт-Петербургском горном университете по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, В.О., 21 линия, д. 2, ауд. № 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 12 октября 2018 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета:



Бричкин
Вячеслав Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Развитие техники и технологии обогащения минерального сырья невозможно без новых знаний о закономерностях движения и распределения компонентов гетерогенных сред процессов флотации (ГСПФ), что требует новых подходов к исследованиям на основе применения современных приборного обеспечения и цифровых технологий. Важную роль при этом играют исследования новых способов и методов флотации, таких как флотация в активированных водных дисперсиях воздуха (АВДВ).

Наряду с представлениями газообразной дисперсной фазы как транспортного агента, не оказывающего существенного влияния на показатели флотации (Абрамов А.А., Богданов О.С., Классен В.И. и др.), существуют точки зрения рассматривающие пузырьки воздуха как активную фазу пульпы и акцентирующие роль пенного слоя, адсорбционно-сольватных оболочек на пузырьках, изменения концентрации реагентов на границе раздела газ-жидкость, дисперсности пузырьков (Тагарт А.Ф., Дерягин Б.В., Эйгелес М.А., и др.).

Применение АВДВ базируется на взаимодействии минеральных частиц с пузырьками воздуха, на поверхности которых до их попадания в объем флотационной пульпы сформирован слой гетерополярного ПАВ. Особенностью флотации в АВДВ является взаимодействие частиц минералов с пузырьками воздуха - носителями активной поверхности, приводящее к образованию прочных флотокомплексов. (Соложенкин П.М., Шахматов С.С., Скороходов В.Ф.).

Исследование флотации все в большей степени становится возможным благодаря развитию вычислительных методов через построение моделей гетерогенных сред, описываемых посредством аппарата вычислительной гидродинамики. Современные подходы к исследованию гидродинамики гетерогенных сред реализуются в адекватных и гибких математических моделях и основываются на результатах физических и вычислительных экспериментов (Ксенофонтов Б.С., Нехаев И.Н., Bakker A., Song T., Volker M.).

Актуальность работы обусловлена важностью решения проблем комплексности и глубины разделения минералов оптимизацией гидродинамических режимов флотации в АВДВ и обоснованием возможности применения вычислительного эксперимента для решения исследовательских, технических и технологических задач обогащения полезных ископаемых.

Цель работы: Совершенствование способа флотации минералов в активированных водных дисперсиях воздуха для улучшения технико-экономических показателей разделения минералов.

Идея работы заключается в использовании выявленных в вычислительных и физических экспериментах закономерностей движения и распределения компонентов гетерогенных сред процесса флотации в АВДВ для совершенствования техники и технологии разделения минералов.

Задачи, решаемые в ходе выполнения работы:

1. Выявление зависимости удельной площади и толщины адсорбционного слоя на поверхности раздела газ-жидкость в АВДВ от концентрации гетерополярного ПАВ с учетом статистических величин размеров и формы пузырьков.
2. Исследование распределения концентраций и скоростей компонентов флотационной пульпы с получением значений технологических показателей флотации в вычислительном эксперименте, верифицируемом по технологической схеме действующего производства.
3. Исследование возможности получения кондиционного апатитового концентрата из бедной апатитсодержащей руды флотацией с использованием АВДВ.
4. Исследование влияния способа подачи АВДВ на аэрацию пульпы в вычислительном эксперименте для определения возможности улучшения гидродинамических режимов флотации при получении нефелинового концентрата с использованием устройств приготовления и дозирования АВДВ.

Научная новизна работы.

1. Разработан алгоритм оценки зависимости удельной площади и толщины адсорбционного слоя на поверхности раздела газ-жидкость в АВДВ от концентрации гетерополярного ПАВ, позволяющий учитывать статистические величины размеров и форму пузырьков и определять значения констант условий однозначности при моделировании флотации в вычислительном эксперименте.
2. Предложен метод исследования гидродинамики флотационной пульпы и прогнозирования технологических показателей флотации на основе инициализации узких сепарационных фракций питания флотации, заключающейся в получении конечных значений величин свойств минеральных частиц таких, как плотность, крупность, поверхностная энергия,

соотношение минералов в сростках, для подготовки и проведения вычислительных экспериментов над моделями гетерогенных сред процессов флотации.

3. На примере грубозернистой флотации бедной апатитсодержащей руды в АВДВ показана возможность повышения извлечения P_2O_5 при снижении расхода собирателя.

Практическая значимость.

1. Разработанный метод инициализации узких сепарационных фракций питания флотации рекомендуется для формулировки условий однозначности в вычислительных экспериментах над моделями различных ГСПФ.

2. Обоснована возможность применения колонной флотационной машины промышленного образца для проведения основной грубозернистой флотации бедной апатитсодержащей руды.

3. Разработанный прототип устройства подачи АВДВ рекомендуется для модернизации и разработки флотационных машин и устройств для флотации минералов в АВДВ.

Методы исследования.

1. Алгоритм оценки зависимости удельной площади и толщины адсорбционного слоя на границе раздела газ-жидкость в АВДВ от концентрации гетерополярного ПАВ;

2. Метод инициализации узких сепарационных фракций гетерогенной среды процесса флотации;

3. Метод исследования зависимости показателей флотации от режима приготовления и дозирования АВДВ;

4. Гранулометрический, минералогический и фазовый анализ технологических проб питания флотации;

5. Лабораторные и вычислительные эксперименты по флотационному разделению минералов.

Положения, выносимые на защиту.

1. Обоснована возможность прогнозирования технологических показателей флотации в вычислительных экспериментах на основе инициализации узких сепарационных фракций питания флотации.

2. Повышение извлечения полезных компонентов при получении апатитового и нефелинового концентратов достигается оптимизацией гидродинамических режимов флотации в активированных водных дисперсиях воздуха.

Степень достоверности и апробация результатов.

Степень достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, содержащихся в диссертации, обусловлена данными,

полученными в лабораторных исследованиях и их соответствием ранее проведенным в Горном институте - обособленном подразделении Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра "Кольский научный центр Российской академии наук" (ГоИ КНЦ РАН) исследованиям, верификацией результатов вычислительных экспериментов по технологической схеме действующего производства, использованием специализированных программных средств, имеющих лицензионную поддержку в Российской Федерации.

Положения диссертации были представлены в работе 22 конференций, из которых 2 проходили на зарубежных площадках (Македония, Болгария). В их работе автором сделано 9 очных докладов. Разработки, выполненные в ходе подготовки диссертации, были представлены автором в составе экспозиций ГоИ КНЦ РАН в работе 11 выставок, из которых 3 проходили на зарубежных площадках (Германия, Швеция, Китай).

Результаты выполнения работы опубликованы в 25 печатных трудах, в том числе в 7 статьях в журналах, входящих в перечень ВАК при Министерстве образования и науки Российской Федерации.

Структура и объем работы. В работе – введение, 4 главы, заключение. Работа имеет объем 155 страниц, включая 36 рисунков, 34 таблицы, список литературных источников из 116 наименований.

Благодарности.

Выражаю благодарность и признательность за научное руководство работой, переданный опыт и знания доктору технических наук В.Ф. Скороходову; за интерес и внимание, проявленные к моей работе, конструктивные критику и замечания научным сотрудникам ГоИ КНЦ РАН В.А. Ивановой, А.С. Опалеву, М.С. Хохуле, Г.В. Митрофановой, Т.Н. Мухиной, С.П. Месяц, С.П. Остапенко, В.В. Марчевской, В.В. Бирюкову, А.С. Китаевой.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы актуальность, цель и идея работы; названы применяемые методики; изложены научная новизна и практическая значимость; выдвинуты защищаемые положения.

В первой главе рассмотрены основы гидродинамики газовой фазы при флотации, примеры использования флотации в АВДВ,

элементы теории гидродинамики гетерогенных сред, сформулированы задачи работы.

Во второй главе представлены результаты исследований по разработке алгоритма оценки зависимости удельной площади и толщины адсорбционного слоя на границе раздела газ-жидкость в АВДВ от концентрации гетерополярного ПАВ; обоснован метод инициализации узких сепарационных фракций (УСФ) питания флотации для подготовки и проведения вычислительных экспериментов.

В третьей главе с использованием разработанных методов выявлены зависимости удельной площади и толщины адсорбционного слоя на поверхности раздела газ-жидкость в АВДВ от вида и концентрации различных ПАВ; на примере основной нефелиновой флотации показано применение метода инициализации УСФ питания флотации; дано описание постановки, проведения и обработки результатов вычислительного эксперимента над моделью флотации.

В четвертой главе показана возможность грубозернистой флотации бедной апатитовой руды (4,8% P_2O_5) в АВДВ с получением кондиционного апатитового концентрата при извлечении порядка 90% P_2O_5 при снижении расхода собирателя. Обоснована возможность проведения основной грубозернистой флотации в АВДВ бедной апатитсодержащей руды с использованием стандартного оборудования. Обсуждаются результаты промышленных испытаний устройств приготовления и дозирования АВДВ в основной флотации нефелина. Предложен прототип устройства радиального распределения АВДВ, способствующего более равномерному распределению газовой фазы и повышению аэрации пульпы.

Заключение содержит выводы по результатам работы.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Обоснована возможность прогнозирования технологических показателей флотации в вычислительных экспериментах на основе инициализации узких сепарационных фракций питания флотации.

Твердая фаза питания флотации представлена совокупностью мономинеральных и полиминеральных частиц, обладающих различными физическими и физико-химическими свойствами, значения величин которых имеют непрерывное распределение. Проведение вычислительного эксперимента над моделью ГСПФ

требует определения конечного числа твердых дисперсных (вторичных) фаз с конечными значениями величин свойств частиц их составляющих. Вычислительный эксперимент основывается на определении условий однозначности модели. Граничные условия сепарационного процесса – это геометрия и механика сепарационной машины, внешние воздействия (электромагнитное поле, теплопередача и т.д.), массовый баланс. Начальные условия это, в первую очередь, физические и физико-химические свойства УСФ питания процесса. Разработанный метод инициализации УСФ позволяет определять значения величин свойств компонентов твердой фазы питания флотации как начальные условия модели флотации. Метод основывается на результатах гранулометрического и минералогического анализов, а также анализа сростковых фаз питания флотации. В методе учтены распределение минеральных частиц по крупности, минеральный состав, степень раскрытия сростков, содержание полезного компонента, оценка поверхностной энергии частиц. Метод обеспечивает получение результатов моделирования в значениях содержания и извлечения полезного компонента.

Вычислительный эксперимент имел целью демонстрацию возможностей моделирования флотации в комплексе ANSYS Fluent. Точкой отбора пробы питания явился перелив коллектора магнитной сепарации хвостов апатитовой флотации в АО "Апатит", прошедших двухстадиальную классификацию. В результате инициализации 9 (девяти) УСФ были определены конечные значения величин свойств их частиц (Таблица 1).

В эксперименте было получено объемное распределение скорости пульпы в камере флотационной машины, позволившее выявить зоны гидродинамической активности, характеризующиеся образованием турбулентных потоков, снижающих вероятность элементарного акта флотации, и зоны с низкой гидродинамической активностью, способствующей понижению концентрации газовой фазы (Рисунок 1-а).

Получены индикаторные распределения концентрации УСФ, где индикатором является объемная доля фракции в питании, позволяющие оценить распределение фракции в камере по сравнению с распределением в питании (Рисунок 1-б). Получены средневзвешенные распределения концентрации УСФ, для которых центр определен как среднее арифметическое объемных долей твердых фаз модели, позволяющие установить качественную и количественную прогнозные оценки формирования камерного и

Таблица 1. Размер частиц, плотность, объемная доля, массовое содержание полезного компонента и поверхностная энергия частиц УСФ пробы

Свойства	Обозначение узкой сепарационной фракции								
	p_{11}	p_{12}	p_{13}	p_{21}	p_{22}	p_{23}	p_{31}	p_{32}	p_{33}
$d_e, \text{мм}$	0,243	0,155	0,080	0,243	0,155	0,080	0,243	0,155	0,115
$\rho, \text{кг/м}^3$	2649	2652	2654	2750	2815	2900	2763	2991	3201
$\alpha, \text{м}^{-3}$	0,146	0,212	0,283	0,044	0,024	0,013	0,014	0,013	0,251
$\beta_{Al_2O_3}^p$	0,329	0,328	0,327	0,253	0,231	0,207	0,174	0,116	0,055
$E_s, \text{Дж/м}^2$	1,323	1,327	1,328	1,378	1,402	1,416	1,415	1,454	1,472

d_e - математическое ожидание величины эффективного размера из распределения Розина-Раммлера; ρ - плотность; α - объемное содержание в твердой фазе питания; $\beta_{Al_2O_3}^p$ - массовое содержание Al_2O_3 ; E_s - поверхностная энергия частиц.

пенного продуктов (Рисунок 1-в). Получено представление о расположении изоповерхностей концентраций (Рисунок 1-г). В таблицах 2 и 3 приведены полученные значения технологических показателей моделируемого процесса флотации. Разброс соответствующих значений позволяет сделать вывод о возможности прогнозирования технологических показателей флотации в вычислительных экспериментах на основе аппарата вычислительной гидродинамики и инициализации УСФ питания флотации при заданных питании, типе и производительности оборудования.

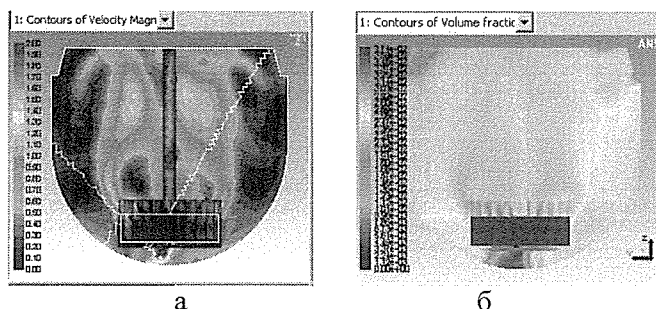


Рисунок 1. а) Распределение скоростей ГСПФ;
 б) Индикаторное распределение концентрации УСФ p_{13} (см. Таблицу 1), имеющей объемное содержание в питании (пульпе) 0,0374 и расход подачи 11,765 кг/с;

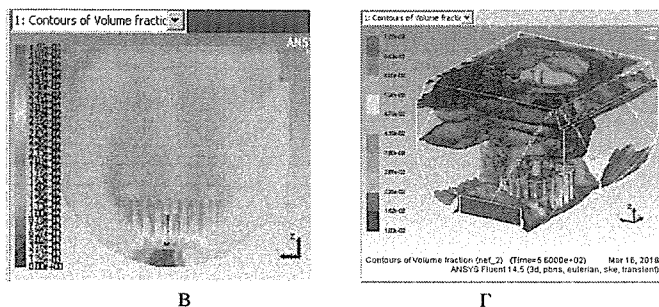


Рисунок 1. в) Средневзвешенное распределение концентрации УСФ p_{13} (см. Таблицу 1) при средней объемной доле твердых фаз модели 0,0418; г) Исоповерхности концентрации УСФ, обогащенной нефелином;

Таблица 2. Выхода камерного и пенного продуктов модели

Параметр	Камерный продукт модели		Пенный продукт модели	
	Расчет	Результат	Расчет	Результат
Выход, γ	89,61%	89,71%	10,39%	10,29%

Таблица 3. Содержание и извлечение Al_2O_3 и P_2O_5 в продуктах модели

Параметр	Al_2O_3		P_2O_5	
	Расчет	Результат	Расчет	Результат
$\beta_{кам}$	24,44%	24,61%	0,52%	0,53%
$\epsilon_{кам}$	92,42%	93,19%	84,31%	84,97%
$\beta_{пен}$	17,29%	16,95%	0,83%	0,82%
$\epsilon_{пен}$	7,58%	7,36%	15,69%	15,39%

2. Повышение извлечения полезных компонентов при получении апатитового и нефелинового концентратов достигается оптимизацией гидродинамических режимов флотации в АВДВ.

Исследование грубозернистой флотации бедной апатитсодержащей руды в АВДВ.

Использовалась бедная апатитовая руда, измельченная до 100% -1 мм с распределением свободного апатита и апатита в сростках 73,8 и 26,2% и исходным содержанием P_2O_5 4,81%. Исследовались режимы пенной сепарации с подачей пульпы на пенный слой и комбинированной флотации с разделением минералов и в объеме пульпы, и пенной сепарацией, в которых собиратель (олеат натрия) подавался и в перемешивание, и в

исходный раствор. Флотация в АВДВ обеспечивалась увеличением времени активации пузырьков воздуха за счет заглубления диспергатора, собиратель подавался только с исходным раствором.

Флотацией в АВДВ было показано, что без предварительной гидрофобизации поверхности апатит флотируется, извлечение P_2O_5 возрастает при увеличении времени нахождения пузырьков в исходном растворе, прирост извлечения наблюдается при увеличении концентрации собирателя в исходном растворе до 50 мг/л, а дальнейшее повышение концентрации более чем в два раза позволяет повысить извлечение не более чем на 1,61%. Результаты опытов сравнивались от общего расхода собирателя по максимуму извлечения и по равной эффективности флотации (Таблицы 4 и 5).

Флотация в АВДВ обеспечила снижение общего расхода собирателя, но уступила первым двум режимам по селективности. Поэтому была предложена схема обогащения бедной апатитовой руды крупностью до 100% –0,5 мм, апробированная в лабораторных условиях, с выделением в голове процесса отвального хвоста с выходом 90,0 %. Основная флотация проводилась в АВДВ при расходе собирателя 110 г/т. Черновой концентрат подвергался классификации, доизмельчению до 100% класса –0,2 мм и перемешиванию с получением конечного концентрата, содержащего 39,5% P_2O_5 при извлечении 90%. Схема позволила по сравнению со стандартной схемой обогащения сократить удельные затраты до 20% за счет снижения расхода собирателя и энергозатрат при измельчении.

Таблица 4. Показатели разделения при максимальных извлечениях ценного компонента

Процесс	Пенная сепарация			Комбиниров. режим			Флотация в АВДВ		
	400			350			169,5		
G*, г/т	γ, %	β, %	ε, %	γ, %	β, %	ε, %	γ, %	β, %	ε, %
Показатели	γ, %	β, %	ε, %	γ, %	β, %	ε, %	γ, %	β, %	ε, %
Пенный продукт	20,58	19,58	83,77	22,73	18,17	85,86	23,06	16,48	79,01
Эффективн., %	66,38			66,32			58,78		

Таблица 5. Показатели разделения при соизмеримо равной эффективности флотации

Процесс	Пенная сепарация			Комбиниров. режим			Флотация в АВДВ		
	325			200			169,5		
G, г/т	γ, %	β, %	ε, %	γ, %	β, %	ε, %	γ, %	β, %	ε, %
Показатели	γ, %	β, %	ε, %	γ, %	β, %	ε, %	γ, %	β, %	ε, %
Пенный продукт	13,62	25,31	71,67	14,89	23,38	72,38	21,06	17,94	78,55
Эффективн., %	60,98			60,39			60,39*		

* Значение является максимальным из опытов с наибольшим общим расходом собирателя.

Вычислительный эксперимент над моделью грубозернистой основной флотации бедной апатитсодержащей руды в АДВ в стандартном оборудовании.

Для обоснования проведения грубозернистой основной флотации бедной апатитсодержащей руды в АДВ в стандартном оборудовании был проведен вычислительный эксперимент над моделью ГСПФ в камере колонной флотомашины СЕТСО. В эксперименте использовался метод инициализации УСФ. В результате эксперимента были получены распределения скоростей флотационной пульпы (Рисунок 2) и распределение концентраций УСФ в объеме флотомашины. Значения технологических показателей модели флотации (Таблицы 6, 7) позволяют сделать вывод о близости их значений с соответствующими значениями технологических показателей грубозернистой основной флотации бедной апатитсодержащей руды в разработанной схеме.

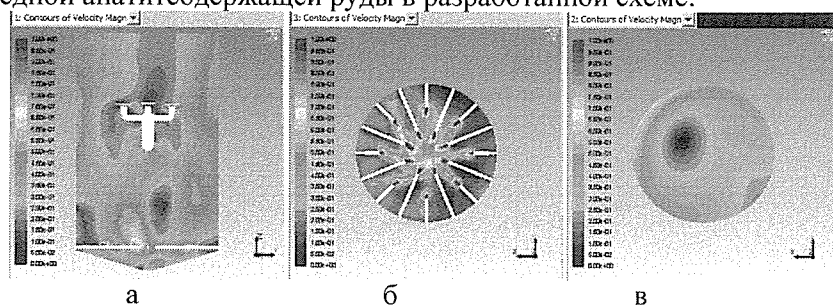


Рисунок 2. Проекция распределения скорости пульпы
а) - осевая $z0y$ проекция; б) - горизонтальная проекция на уровне диспергаторов; в) - горизонтальная проекция на уровне выхода пенного продукта

Таблица 6. Выхода камерного и пенного продуктов, %

Параметр	Питание	Пенный продукт		Камерный продукт	
		По схеме	Модель	По схеме	Модель
Выход, γ	100	34,72	37,76	65,28	62,24

Таблица 7. Содержание и извлечение P_2O_5 , %

Параметр	Питание	Пенный продукт		Камерный продукт	
		По схеме	Модель	По схеме	Модель
Содержание, β	4,25	9,53	8,34	1,44	1,77
Извлечение, ϵ	100	77,84	74,10	22,16	25,90

Таким образом, гидродинамический режим флотации в типовой колонной флотомашине в совокупности с использованием

АВДВ позволяет обеспечить вывод из процесса переработки материала с низким содержанием полезного компонента, что предопределяет возможность реализации предложенной схемы в условиях производства и, тем самым, вовлечения в переработку бедной апатитсодержащей руды при снижении энергозатрат на подготовительных операциях дробления и измельчения.

Результаты промышленных испытаний устройства приготовления и дозирования АВДВ в основной флотации нефелина в АО "Апатит".

Исследования, проведенные в ГоИ КНЦ РАН, показали, что при обратной флотации нефелина в АВДВ из обесшламленных хвостов апатитового передела получают кондиционные нефелиновые концентраты. В развитие этих исследований были проведены промышленные испытания с использованием устройства для приготовления и дозирования АВДВ, установленного на первой линии флотомашин ОК-38 нефелинового цикла АО "Апатит". Первый этап испытаний состоял в опробовании обратной нефелиновой флотации при обычном режиме подачи собирателя. На втором этапе испытаний собиратель подавался через устройства приготовления и дозирования АВДВ при сокращении расхода на 40%. Условия проведения третьего этапа испытаний были идентичными условиям второго этапа, но с увеличением диаметра выпускных патрубков устройства для приготовления и дозирования АВДВ с 9 до 14 мм. Средневзвешенные значения показателей флотации на этапах испытаний представлены в таблице 8.

Таблица 8. Результаты испытаний устройств приготовления и дозирования АВДВ

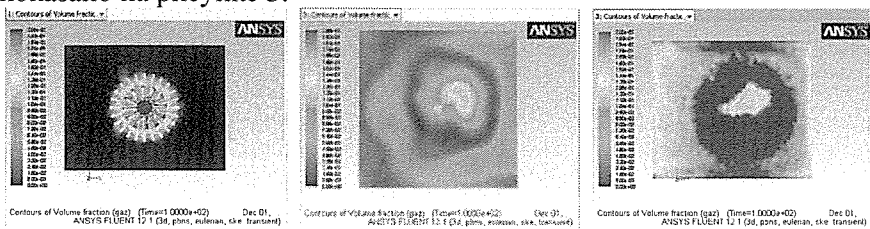
Режим флотации	Смен	Расход собирателя, кг/т				Содержание Al_2O_3	
		Основная	Контрольн.	Всего	$\Delta, \%$	Питание	Концентрат
Стандарт	34	2,23	1,03	3,26	0	21,67	28,64
АВДВ 1	5	0,99	0,86	1,85	43,3	20,98	28,16
АВДВ 2	35	1,37	0,73	2,10	35,6	21,59	28,42

Испытания показали, что как в стандартном режиме, так и в режиме подачи собирателя в виде АВДВ после основной флотации получается кондиционный концентрат с содержанием Al_2O_3 выше 28,0%. При этом в случае флотации в АВДВ стало возможным практически полностью отказаться от подачи собирателя в камеры контрольной флотации, что не отразилось на качестве концентрата, а уменьшение расхода собирателя достигало 56%.

Исследование влияния способа подачи АДВ

на аэрацию флотационной пульпы в вычислительном эксперименте

Моделированием работы флотомашины ОК-38 в вычислительном эксперименте исследовалось распределение концентрации газовой фазы в рабочем объеме. В эксперименте определялись объемное содержание газовой фазы и аэрация пульпы [$\text{л}/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$]. Распределение газовой фазы по горизонтам камеры показано на рисунке 3.



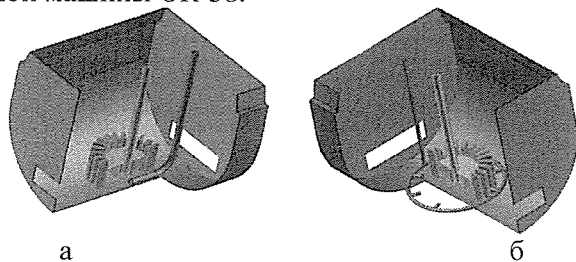
а

б

в

Рисунок 3. Эпюры распределения газовой фазы по горизонтам камеры ОК-38 (вид сверху, поток питания слева направо, вращение праввинтовое, нулевая отметка – верхняя плоскость диска импеллера: а) - $-0,25$ м; б) - $1,25$ м; в) - $2,25$ м

Были выявлены возможности интенсификации флотации путем оснащения камеры флотационной машины устройством радиального распределения (УРР) АДВ, установленным в окружной зоне статора. Для обоснования модификации конструкции для подачи активированной газо-жидкостной смеси были разработаны модели процесса аэрации при точечной подаче и при использовании для подачи АДВ УРР. На рисунке 4 приведены соответствующие конструктивные модификации камеры флотационной машины ОК-38.



а

б

Рисунок 4. Конструктивные модификации камеры флотационной машины ОК-38

а) - с точечной подачей АДВ; б) - с УРР

Начальные условия всех экспериментов были приняты таким образом, что, при подаче АВДВ, суммарный расход воздуха через вал импеллера и с АВДВ был равен расходу воздуха при штатном режиме работы. При этом соотношение соответствующих воздушных потоков в последующих экспериментах не менялось и составляло 4÷1. На рисунке 5 приведены графики распределения аэрации пульпы по высоте камеры флотационной машины ОК-38 в штатном режиме работы - А; Б и В - зависимости, полученные при точечной подаче АВДВ и через устройство радиального распределения АВДВ.

Установлено, что с ростом селективности флотации, при неизменном расходе воздуха, применение АВДВ позволяет увеличить аэрацию пульпы, а использование устройства радиального распределения не только повышает аэрацию, но и увеличивает долю участия во флотации активированной поверхности границы раздела газ-жидкость. При этом увеличение аэрации происходит, в том числе, и за счет перераспределения газовой фазы подаваемой через канал импеллера, что позволяет при повышении эффективности флотации снизить издержки уменьшением расхода подаваемого воздуха.

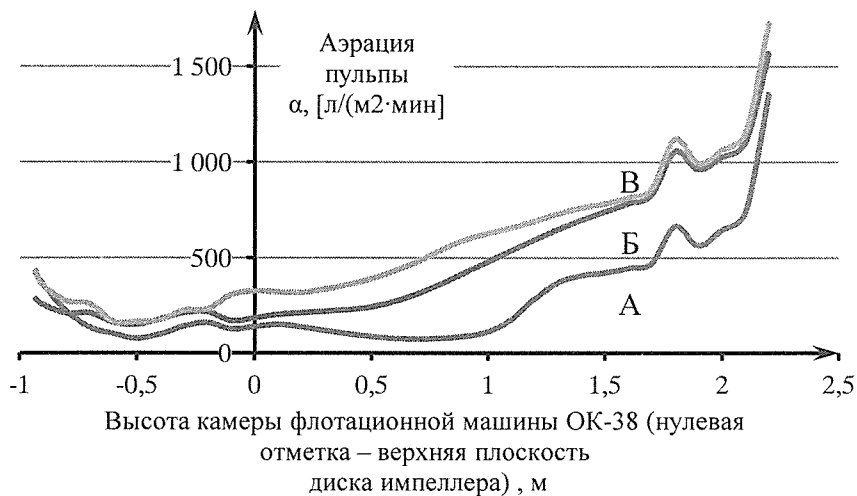


Рисунок 5. Изменение аэрации пульпы по высоте камеры флотационной машины ОК-38. А - штатный режим работы; Б - режим с точечной подачей АВДВ; В - режим с подачей АВДВ через устройство радиального распределения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решение поставленных задач осуществлялось в лабораторных исследованиях, выработкой подходов к подготовке и проведением вычислительных экспериментов. К основным результатам диссертации можно отнести следующие:

1. Предложен метод прогнозирования технологических показателей флотации и исследования гидродинамики флотации на основе метода инициализации узких сепарационных фракций, заключающейся в получении конечных значений плотности, крупности, поверхностной энергии, соотношения минералов в сростках минеральных частиц, входящих в их состав, и проведения вычислительного эксперимента над моделью гетерогенной среды процесса флотации.

2. На примере обратной нефелиновой флотации показаны этапы подготовки, проведения и анализа результатов вычислительного эксперимента над моделью гетерогенной среды процесса флотации, в результате которого выявлены закономерности распределения концентраций и скоростей УСФ в камере флотационной машины, получено представление о внутренней кинетике процесса и формировании продуктов разделения минералов.

3. Рассмотрены результаты лабораторных исследований грубозернистой флотации бедной апатитовой руды, показавшие, что применение АВДВ позволяет добиваться при соизмеримой эффективности процесса значительного снижения общего расхода собирателя. Использование основной грубозернистой флотации в АВДВ позволяет при переработке бедной апатитсодержащей руды выводить из процесса отвальные хвосты с выходом до 90% с последующим получением товарного апатитового концентрата при извлечении до 90%.

4. Рассмотрены результаты промышленных испытаний устройства приготовления и дозирования АВДВ в основной флотации нефелина в АО "Апатит". Показано, что использование АВДВ позволяет получать кондиционный концентрат при значительном диапазоне состава и качества исходного питания. Также показано, что использование АВДВ способно значительно снизить суммарный расход флотационных реагентов при сохранении качества концентрата.

5. Исследовано влияние способа подачи АВДВ на результат аэрации флотационной пульпы. Предложен прототип устройства радиального распределения АВДВ. Проведен сравнительный анализ

аэрации флотационной пульпы при различных режимах подачи АВДВ, показавший большую эффективность использования предложенного устройства.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ.

1. Скороходов В.Ф., Никитин Р.М., Якушкин В.П. Моделирование процесса флотации с применением систем инженерного анализа. / Горный информационно-аналитический бюллетень (Научно-технический журнал) №4 2012 г. - М.: Горная книга. 2012. С. 156-164.
2. Скороходов В.Ф., Никитин Р.М. Исследование CFD методом формирования стационарного состояния газовой фазы в рабочем объеме флотационных машин. / Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: Материалы XVIII Международной научно-технической конференции, 3-4 апреля 2013 г., Екатеринбург. - «Форт Диалог-Исеть». 2013. С. 202-206.
3. Skorokhodov V.F., Khokhulya M.S., Opalev A.S., Biryukov V.V., Nikitin R.M. Computational Fluid Dynamics as the Research Tool for Minerals Separation Processes. / Proceedings of 5-th Balkan Mining congress. 18-21 September 2013, Ohrid, Republic of Macedonia. 2013. P. 299-304.
4. Скороходов В.Ф., Никитин Р.М. Вычислительный эксперимент над моделью гетерогенной системы процесса флотации нефелина. / Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки минерального сырья (Плаксинские чтения - 2013): Материалы Международного совещания. Томск, 16-19 сентября 2013 г. - ТПУ. 2013. С. 501-504.
5. Скороходов В.Ф., Никитин Р.М. CFD моделирование процессов разделения минеральных компонентов флотацией. / IX Конгресс обогатителей стран СНГ (26-28 февраля 2013 г.) Сборник материалов, т. II. Москва. - МИСиС. 2013. С. 519-521.
6. Skorokhodov V.F., Khokhulya M.S., Opalev A.S., Biryukov V.V., Nikitin R.M. Computational Fluid Dynamics Methods in Research and Analysis of Mineral Separation. / Journal of Mining Science. 2013. V.49, Issue 3. - Road Town: Pleiades Publishing, 2013. P. 507-513.
7. Скороходов В.Ф., Хохуля М.С., Опалев А.С., Бирюков В.В., Никитин Р.М. Применение методов вычислительной гидродинамики к исследованию и анализу процессов разделения минералов. / Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых (ФТПРПИ) №3 2013 г. - Новосибирск. ИГД СО РАН. 2013. С. 179-187.

8. Мельников Н. Н., Скороходов В. Ф., Месяц С. П., Иванова В. А., Билин А. Л., Белобородов В. И., Хохуля М. С., Захарова И. Б., Митрофанова Г. В., Рыбин В. В., Остапенко С. П., Никитин Р. М., Петров А. А., Опалев А. С., Волкова Е. Ю. Экологическая стратегия развития горнодобывающей отрасли. / Горный журнал № 12, 2013. - М.: Руда и металлы. 2013. С. 109-116.
9. Скороходов В.Ф., Никитин Р.М., Рухленко Е.Д., Веселова Е.Г. Оценка флотационных свойств компонентов пробы питания основной нефелиновой флотации для вычислительного эксперимента. / Вестник Кольского научного центра РАН. № 2, 2013 г. - КНЦ РАН. 2013. С. 79-91.
10. Скороходов В.Ф., Никитин Р.М., Степанникова А.С., Олейник А.Г. Использование средств инженерного анализа для исследования распределения минералов в продуктах обогащения нефелиновой флотации. / Труды Кольского научного центра РАН №5 2013(18) г. Информационные технологии, выпуск 4. - КНЦ РАН. 2013. С. 176-182.
11. Скороходов В.Ф., Никитин Р.М., Степанникова А.С. Моделирование процесса получения нефелинового концентрата из хвостов апатитового производства на основе изучения распределения минералов в продукты флотации. / Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых. Материалы 11 Международной научной школы молодых ученых и специалистов. 24-28 ноября 2014 г. - М.: ИПКОН РАН. 2014. С. 259-266.
12. Скороходов В.Ф., Хохуля М.С., Опалев А.С., Бирюков В.В., Никитин Р.М. Применение информационных технологий для повышения полноты извлечения минералов из различных видов минерального сырья. / Экологическая стратегия развития горнодобывающей отрасли - формирование нового мировоззрения в освоении природных ресурсов. Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции с участием иностранных специалистов. Апатиты, 13-15 октября 2014 г. - Реноме. 2014. С. 287-296.
13. Скороходов В.Ф., Никитин Р.М., Степанникова А.С. Изучение распределения минералов в продукты флотации с использованием CFD моделирования (на примере получения нефелинового концентрата из хвостов апатитового производства). / Экологическая стратегия развития горнодобывающей отрасли - формирование нового мировоззрения в освоении природных ресурсов. Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции с участием иностранных специалистов. Апатиты, 13-15 октября 2014 г. - Реноме. 2014. С. 312-318.

14. Скороходов В.Ф., Никитин Р.М., Якушкин В.П., Степанникова А.С. Исследование распределения минералов в продуктах флотации на основе математического аппарата вычислительной гидродинамики (на примере получения нефелинового концентрата). / Горный информационно-аналитический бюллетень (Научно-технический журнал) №12 2014 г. - М.: Горная книга. 2014. С. 123-137.
15. Скороходов В.Ф., Никитин Р.М. Использование вычислительного эксперимента для исследования флотационного разделения минералов. / Труды Кольского научного центра РАН №5 2014(24) г. Информационные технологии, выпуск 5. - КНЦ РАН. 2014. С. 246-250.
16. Скороходов В.Ф., Никитин Р.М., Степанникова А.С. Исследования процесса флотации CFD методом в информационных технологиях. / Международная научно-техническая конференция «Комбинированные процессы переработки минерального сырья: теория и практика», посвященная 95-летию создания кафедры обогащения полезных ископаемых (19-20 мая 2015 г.) Сборник научных трудов, Санкт-Петербург, 2015 г. - СПбГУ. 2015. С. 101-102.
17. Скороходов В.Ф., Никитин Р.М., Степанникова А.С. Инициализация узких сепарационных фракций при проведении вычислительного эксперимента над моделью гетерогенной системы процесса флотации. / Современные процессы комплексной и глубокой переработки труднообогатимого минерального сырья (Плаксинские чтения - 2015): Материалы Международного совещания. Иркутск, 21-25 сентября 2015 г. - Полиграфический центр «РИЭЛ». 2015. С. 258-261.
18. Скороходов В.Ф., Никитин Р.М., Степанникова А.С. Вычислительная гидродинамика в информационных технологиях для исследования процесса флотации. / X Конгресс обогатителей стран СНГ (17-19 февраля 2015 г.) Сборник материалов, т.1. Москва. - МИСиС. 2015 г. С. 153-156.
19. Скороходов В.Ф., Никитин Р.М., Степанникова А.С. CFD метод исследования распределения минералов в продуктах флотации (на примере получения нефелинового концентрата). / Горный информационно-аналитический бюллетень (Научно-технический журнал) №10 2015 г. - М.: Горная книга. 2015. С. 132-145.
20. Скороходов В.Ф., Никитин Р.М., Степанникова А.С., Якушкин В.П. Инициализация узких сепарационных фракций при проведении вычислительного эксперимента над моделью гетерогенной системы процесса флотации. / Горный

информационно-аналитический бюллетень (Научно-технический журнал) №11 2015 г. - М.: Горная книга. 2015. С. 63-73.

21. Скороходов В.Ф., Никитин Р.М., Бирюков В.В., Степанникова А.С. Вычислительный эксперимент над моделью процесса разделения минералов флотационным методом. / Труды Кольского научного центра РАН №29 2015 г. - КНЦ РАН. 2015. С. 185-211.

22. Скороходов В.Ф., Никитин Р.М., Бирюков В.В., Степанникова А.С. О начальных условиях для математической модели процесса флотации в вычислительном эксперименте. / Ресурсосбережение и охрана окружающей среды при обогащении и переработке минерального сырья (Плаксинские чтения - 2016): Материалы Международного совещания. Санкт-Петербург, 26-30 сентября 2016 г. - М.: Руда и металлы. 2016. С. 162-165.

23. Скороходов В.Ф., Никитин Р.М., Бирюков В.В., Степанникова А.С. Обоснование механизма формирования адсорбционной пленки, образующейся на пузырьках воздуха, и расчет удельной площади поверхности раздела газ-жидкость в активированных водных дисперсиях воздуха. / Ресурсосбережение и охрана окружающей среды при обогащении и переработке минерального сырья (Плаксинские чтения - 2016): Материалы Международного совещания. Санкт-Петербург, 26-30 сентября 2016 г. - М.: Руда и металлы. 2016. С. 567-570.

24. Никитин Р.М., Бирюков В.В., Скороходов В.Ф., Степанникова А.С. Прогнозирование технологических показателей флотации в вычислительном эксперименте. / Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья (Плаксинские чтения - 2017): Материалы Международного совещания. Красноярск, 12-15 сентября 2017 г. - СФУ. 2017. С. 166-169.

25. Никитин Р.М., Скороходов В.Ф., Степанникова А.С., Бирюков В.В. Подход к исследованию зависимости удельной площади поверхности раздела газовой и жидкой фазы и толщины адсорбционной пленки на поверхности пузырьков воздуха от вида и концентрации собирателя при приготовлении активированной водной дисперсии воздуха. / Труды Ферсмановской Научной сессии ГИ КНЦ РАН. - ГИ КНЦ РАН. 2017. С. 317-320.