

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр
«Кольский научный центр Российской академии наук»

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук **Скороходов Владимир Федорович**

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	5
Глава 1. Основы гидродинамики и математического моделирования гетерогенных сред в процессах флотационного разделения минералов.....	11
1.1. Влияние газовой фазы на разделение минералов при флотации. Аэраторы.....	11
1.2. Элементы математического аппарата исследований гидродинамики гетерогенных сред.....	18
Задачи, решаемые в ходе выполнения работы.....	30
Глава 2. Методы оценки физических и физико-химических свойств узких сепарационных фракций питания флотации.....	31
2.1. Алгоритм оценки зависимости удельной площади и толщины адсорбционного слоя на поверхности раздела газ-жидкость в активированной водной дисперсии воздуха от концентрации гетерополярного ПАВ.....	31
2.2. Инициализация узких сепарационных фракций для проведения вычислительного эксперимента над моделью гетерогенной среды процесса флотации.....	39
2.3. Выявление зависимости показателей флотации от параметров активированной водной дисперсии воздуха.....	51
Выводы по Главе 2.....	59
Глава 3. Изучение характеристик активированной водной дисперсии воздуха. Инициализация узких сепарационных фракций питания флотации и вычислительный эксперимент над моделью гетерогенной среды процесса флотации.....	61
3.1. Оценка зависимости удельной площади и толщины адсорбционного слоя на границе раздела газ-жидкость в активированной водной дисперсии воздуха от вида и концентрации гетерополярного ПАВ.....	61

3.2.	Вычислительный эксперимент над моделью гетерогенной среды процесса флотации на основе инициализации узких сепарационных фракций (на примере модели гетерогенной среды процесса флотации хвостов апатитового производства при получении нефелинового концентрата).....	67
3.2.1.	Цель и задачи вычислительного эксперимента.....	67
3.2.2.	Геометрический образ рабочего объема камеры флотационной машины ОК-38 и расчетная сетка модели.....	70
3.2.3.	Проба питания и инициализация узких сепарационных фракций питания основной нефелиновой флотации на основе результатов гранулометрического и минералогического анализов, а также анализа сростковых фаз питания моделируемого процесса.....	72
3.2.4.	Технологическая схема получения нефелинового концентрата в АО "Апатит" и расчет базовых параметров качественно-количественных показателей модели процесса флотации в первой камере технологической схемы.....	92
3.2.5.	Постановка и проведение вычислительного эксперимента. Обработка полученной в ходе эксперимента числовой и графической информации.....	95
	Выводы по Главе 3.....	105
Глава 4.	Оптимизация гидродинамических режимов флотации апатитсодержащих руд в активированной водной дисперсии воздуха.....	106
4.1.	Исследования флотуемости бедных апатитсодержащих руд в активированной водной дисперсии воздуха.....	106
4.2.	Вычислительный эксперимент по обоснованию проведения основной флотации бедной апатитсодержащей руды в активированной водной дисперсии воздуха в стандартном оборудовании.....	116
4.3.	Результаты промышленных испытаний устройства	

приготовления и дозирования активированной водной дисперсии воздуха в основной флотации нефелина в АО "Апатит"	121
4.4. Исследование влияния способа подачи активированной водной дисперсии воздуха на аэрацию флотационной пульпы в вычислительном эксперименте.....	127
Выводы по Главе 4.....	136
Заключение.....	138
Список сокращений.....	142
Список литературы.....	143

ВВЕДЕНИЕ

Процесс флотационного разделения лежит в основе большинства технологий получения минеральных концентратов. Появившись во второй половине XIX столетия в виде запатентованного В.Хейнсом метода концентрации металлов из руд и пород [1], флотация находит свое применение во множестве отраслей промышленности – переработке рудного и техногенного минерального сырья, очистке промышленных сточных вод, различных химических технологиях.

Теория флотации находится на стыке таких наук, как физика твердого тела, физическая и коллоидная химия, многофазная гидродинамика [2]. К этим научным дисциплинам следует добавить положения кристаллоэнергетики [3] и геоэнергетической теории академика А.Е.Ферсмана [4].

Исследование процесса флотации все в большей степени становится возможным благодаря бурному развитию вычислительных методов, основанных на применении мощных и быстродействующих компьютерных программ, через построение моделей гетерогенных сред, описываемых посредством математического аппарата вычислительной гидродинамики.

За последние десятилетия сформировались взаимодополняющие друг друга направления развития флотационного метода, в число которых входят разработка новых технологических приемов [5, 6, 7, 8], совершенствование реагентных режимов [9, 10, 11, 12], создание перспективных конструкций флотационных машин и аппаратов [13, 14, 15, 16].

В ГоИ КНЦ РАН на протяжении ряда лет осуществляются исследования и разработки способа флотации в АВДВ, позволяющего стабилизировать технологические показатели флотации, повысить ее селективность, снизить расход реагентов (Соложенкин П.М., Шахматов С.С., Скороходов В.Ф.). АВДВ нашли свое применение на ряде обогатительных предприятий при получении флотацией раз-

личных минеральных концентратов, а также при создании технологий глубокой очистки промышленных сточных вод [17, 18, 19, 20].

Актуальность работы.

Естественное снижение показателей обогатимости добываемого рудного сырья при росте требований рынка к расширению ассортимента, количеству и качеству минеральных продуктов и при практической достижимости критической массы техногенной нагрузки на природную среду обозначает проблематику горнопромышленного комплекса. Освоение новых месторождений и увеличение объемов добычи полезных ископаемых, безусловно, на протяжении ближайших лет способны нивелировать остроту проблемы. Однако, уже сегодня в сложившихся условиях добычи и переработки минерального сырья становится очевидной необходимость развития и внедрения новых способов получения высококачественных минеральных концентратов, прототипирования и создания образцов новой обогатительной техники, вовлечения в переработку труднообогатимого минерального сырья, вовлечения в переработку техногенных отходов горнопромышленной отрасли, являющихся одним из основных экологических рисков для огромных территорий, прилежащих к зонам промышленной активности горнорудных предприятий.

Развитие техники и технологии обогащения минерального сырья невозможно без получения и использования новых знаний о закономерностях движения и распределения компонентов ГСПФ, что требует принципиально новых подходов к исследованиям как на основе применения современного приборного обеспечения, так и на основе современных информационных технологий. Важную роль при этом играют исследования процессов обогащения минерального сырья, в основе которых лежат новые способы и методы, такие как рассматриваемая в данной работе флотация минеральных частиц в АВДВ.

В большинстве работ по теории флотации (Абрамов А.А., Богданов О.С., Кизельватер Б.В., Классен В.И., Мокроусов В.А.) газообразной дисперсной фазе отводится второстепенная роль транспортного агента, не оказывающего существенного влияния на показатели флотации. Однако, существуют и точки зрения,

рассматривающие пузырьки воздуха как активную фазу пульпы и акцентирующие роль пенного слоя, адсорбционно-сольватных оболочек на пузырьках, изменения концентрации реагентов на границе газ-жидкость, условий подачи собирателя, дисперсности пузырьковой фазы (Таггарт А.Ф., Алейников Н.А., Уорк У., Тихонов С.А., Тихомиров В.К., Эйгелес М.А., Соложенкин П.М., Кулкарни Р.Д., Дерягин Б.В., Адам Н.К. 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. Таким образом, особенностью флотации в АВДВ является взаимодействие частиц минералов с пузырьками воздуха – носителями активной поверхности, приводящее к образованию прочных флотационных комплексов.

Помимо использования в исследованиях традиционных подходов, в работе показана возможность применения вычислительного эксперимента, рассмотрены вопросы его подготовки и верификации, учитывающие положения теории и специфику практики обогащения минералов флотацией.

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.

Научная новизна.

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.

В работе использованы экспериментальные и аналитические исследования и методы, физическое и математическое моделирование:

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 активированной водной дисперсии 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 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 Горного

института 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.

От автора.

Выражаю благодарность и признательность за научное руководство работой в.н.с. ГоИ КНЦ РАН, д.т.н. Владимиру Федоровичу Скороходову, за интерес и внимание, проявленные к моей работе, конструктивную критику и замечания сотрудникам ГоИ КНЦ РАН: в.н.с., к.т.н. Валентине Алексеевне Ивановой; заместителю директора, к.т.н. Александру Сергеевичу Опалеву; в.н.с., к.т.н. Михаилу Степановичу Хохуле; зав. лабораторией флотационных реагентов и комплексного обогащения руд, к.т.н. Галине Викторовне Митрофановой; в.н.с., к.т.н. Татьяне Николаевне Мухиной; зав. лабораторией геоэкотехнологий Светлане Петровне Месяц; с.н.с., к.т.н. Сергею Павловичу Остапенко; в.н.с., к.т.н. Валентине Викторовне Марчевской; н.с. Валерию Валентиновичу Бирюкову; м.н.с. Анне Сергеевне Китаевой.

ГЛАВА 1**ОСНОВЫ ГИДРОДИНАМИКИ И МАТЕМАТИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕД В ПРОЦЕССАХ
ФЛОТАЦИОННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ МИНЕРАЛОВ****1.1. ВЛИЯНИЕ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ
НА РАЗДЕЛЕНИЕ МИНЕРАЛОВ ПРИ ФЛОТАЦИИ. АЭРАТОРЫ**

В большинстве исследований элементарных физико-химических процессов, происходящих на границе раздела жидкой и твердой фаз флотационной системы, газообразной дисперсной фазе отводится второстепенная роль транспортного агента, не оказывающего существенного влияния на динамику флотационной пульпы [21, 22, 23, 24].

В то же время, в теории флотации существуют точки зрения, акцентирующие особое значение пузырьков воздуха и рассматривающие их как активную фазу флотационной пульпы. Таггарт А.Ф. [25] высказал мнение о том, что разделение минералов происходит не столько в объеме пульпы, сколько в пенном слое. Н.А.Алейников [26] показал, что процесс минерализации пузырька нельзя рассматривать без учета адсорбционно-сольватных оболочек, образующихся вокруг его поверхности и флотируемых частиц. У.Уорк [27], исследуя элементарный акт флотации, сделал вывод о том, что время контакта определяется не только характером поверхности твердой фазы, но и свойствами поверхности раздела жидкой и газообразной фаз. В.И.Классен и В.А.Мокроусов [24] обращают внимание на значимость не только закрепления реагентов на поверхности минеральных частиц, но и изменения концентрации реагентов на границе раздела газ-жидкость. В.И.Классен и С.А.Тихонов [28], исследуя

зависимость прочности прилипания пузырька к бариту и флюориту от времени его нахождения в растворе собирателя (OINa), показывают, что для сохранения активности пузырька необходима дробная подача собирателя при его низкой концентрации и уменьшение времени пребывания пузырьков в пульпе.

В.К.Тихомиров [29] указывает на роль размера пузырьков воздуха во флотационной пульпе, где мелкие пузырьки, обеспечивая повышение аэрации, тем не менее, обладают сравнительно малой подъемной силой и значительным временем выноса в пенный слой. Большие пузырьки, снижая аэрацию, обладают значительной подъемной силой, но их динамические характеристики уменьшают вероятность элементарного акта флотации. Таким образом, основная полезная работа выполняется пузырьками, имеющими размеры от 0,6 до 1,2 мм. В результате, именно они ответственны за минерализацию флотационной пены, пропорциональную концентрации флотируемых частиц, и обратно пропорциональную размерам пузырьков. В то же время, показано, что на степень дисперсности пен значительно влияет концентрация ПАВ. Так, при концентрациях ПАВ, достигающих значения критической концентрации мицеллообразования, тем не менее происходит обеднение раствора молекулами этих ПАВ за счет их адсорбции на поверхности частиц твердой фазы.

М.А. Эйгелес [30], рассматривая механизм закрепления частиц на воздушных пузырьках, показал, что коллоидные мицеллы сорбируются на поверхности не только минеральных частиц, но и на поверхности пузырьков, а неорганические коллоидно-дисперсные частицы на границе раствор-воздух образуют пленки. М.А. Эйгелес показал, что между отдельными коллоидными частицами на поверхности пузырька и минеральной частицей, покрытой пленкой, действуют силы притяжения Лондона и силы Ван-дер-Ваальса, создающие дополнительные локальные центры притяжения и способствующие разрыву промежуточной водной прослойки.

Вопросам влияния возраста пузырька на закрепление и прочность прилипания частиц уделялось значительное внимание исследователями Таджикской АН под руководством П.М. Соложенкина [31]. Было показано, что

возраст пузырька воздуха влияет на прилипание к нему минеральных частиц и с помощью процессов, происходящих на разделе фаз газ-жидкость, без изменения состояния поверхности минералов, можно варьировать условия и интенсивность селективной флотации. Там же отмечено, что снижение времени индукции при старении пузырька связано не с изменениями поверхности минерала, а с физико-химическими процессами, протекающими на поверхности пузырька.

В.И. Тюрникова [32] с сотрудниками обосновали оптимальные условия образования комплексов пузырек - минеральная частица в камере вертикальной пневматической машины, создаваемых, когда образовавшийся пузырек сталкивается с минеральными частицами после того как процесс его самопроизвольной активности в результате реструктурирования поверхностных слоев в основном завершится.

Р.Д. Кулкарни и П. Сомасундаран [33], исследуя адсорбцию реагентов с аполярной группой на поверхности пузырька воздуха, отмечают более выраженную адсорбцию ионов собирателя на поверхности пузырька против адсорбции на границе раздела жидкость-твердое. Также установлено, что ионы собирателя способны мигрировать на границу раздела фаз газ-твердое после контакта с заряженной частицей минерала, удовлетворяя требованиям равновесия зарядов на границе раздела фаз и уменьшая время индукции до значений, достаточных для закрепления пузырька воздуха на частице минерала. С другой стороны, если поверхности минерала и пузырька имеют одинаковый заряд или поверхность минерала полностью покрыта собирателем, то адсорбция на поверхности пузырька может увеличить время индукции. Таким образом, при изучении механизма пенной флотации, в дополнение к адсорбции на границе раздела фаз жидкость-твердое, адсорбцию на границе раздела газ-жидкость невозможно не учитывать.

Факты, указывающие на особую роль газовых пузырьков, были обнаружены и экспериментально установлены при исследовании процессов флотоотсадки, использованной для флотационного разделения немагнитных продуктов железорудного производства [34] и фосфоритовых руд [35]. Было установлено,

что показатели флотации железа значительно повышаются, если в зону диспергирования воздуха с подрешетной водой подается некоторое количество собирателя. Результаты экспериментов подтвердили активную роль газовой фазы при флотации и показали, что в образующихся от смешения двух потоков неравновесных условиях возможна эффективная флотация кварца при расходах собирателя в пять раз меньших, чем это требуется при флотации предварительно гидрофобизованной пульпы. Процесс флотационного разделения рудных материалов, в котором минеральные зерна предварительно не подвергаются гидрофобизации, а извлечение рудных компонентов происходит в водных дисперсиях воздуха, пузырьки которых активизированы реагентами-собирателями, был назван процессом флотации минералов в неравновесных условиях. Исследования по определению влияния на результаты флотации активированных собирателем водных дисперсий воздуха были проведены при отработке режима флотации кингисеппских фосфоритов во флотоотсадочных машинах. Было показано, что дифференцированная подача собирателя в процесс (20% реагента с подрешетной водой поступало в область аэрации) позволила увеличить извлечение P_2O_5 в черновой концентрат более чем на 10%. Также было показано, что флотационным процессом в АВДВ можно управлять, применяя различные модификаторы. При этом, регулирующие добавки как по количеству, так и по составу, могут вводиться либо непосредственно в зону смешения, либо предварительно в один или одновременно в оба взаимодействующих потока разделительного процесса.

Процессы минерализации пузырьков воздуха протекают с высокой скоростью (10^{-2} - 10^{-3} с). Они должны совершаться в промежутки времени, в течение которых частица после столкновения с пузырьком находится в контакте с его поверхностью. По данным М.А. Эйгелеса [30] этот промежуток времени для пузырьков средних флотационных размеров колеблется в пределах 0,002-0,150 с. Образование прочных межфазных связей за столь короткие промежутки времени обосновано достижением некоторой предельной величины адсорбции, зависящей от концентрации ПАВ. При этом адсорбционные пленки могут покрывать

границу раздела фаз газ-жидкость либо сплошным мономолекулярным слоем, либо монослоем на отдельных участках поверхности.

По исследованиям С.С.Духина и Б.В.Дерягина [36], адсорбируемые молекулы смываются с фронтальных участков пузырька и группируются в виде пленок в его “кормовой” части. Таким образом, при контакте частицы с активированными пузырьками она всегда попадает в зону, где концентрация сорбированного вещества достигает исходных значений.

Скорость адсорбционных взаимодействий растет пропорционально увеличению концентрации адсорбата в растворе. Для анионных и катионных собирателей на активных в хемосорбционном отношении участках поверхности некоторых минералов, адсорбция протекает практически мгновенно [37].

Эффективность флотации руд в неравновесных условиях определяется природой реагентов-собирателей и их способностью адсорбироваться на границе раздела газ-жидкость, т.е. на поверхности воздушных пузырьков. Насыщение адсорбционного слоя на поверхности раздела газ-жидкость происходит по истечении промежутка времени, зависящего в каждом случае от многих факторов. Время, необходимое для достижения адсорбционного равновесия на межфазной границе, изменяется от долей секунды до нескольких часов. По оценкам Н.К. Адама [38], на поверхности раздела воздух-вода поверхностное натяжение имеет нормальное значение уже после 0,005 с процесса адсорбции.

Адсорбционное равновесие зависит от концентрации ПАВ, рН раствора, концентрации и валентности электролитов [39] и устанавливается задолго до критической концентрации мицеллообразования [40].

Дж.Фриш и Г.Смит [41], исследовавшие поверхностное натяжение водных растворов додециламина в зависимости от рН и концентрации методом максимального давления в пузырьке, показали, что время достижения равновесного значения поверхностного натяжения возрастает с увеличением рН и уменьшением концентрации раствора, что объясняется, по их мнению, образованием в щелочной среде ионно-молекулярных комплексов, адсорбция которых на поверхности газ-жидкость затруднена.

Поскольку аэрация и дисперсный состав пузырьков влияют на скорость и селективность флотации, эффективность работы пневматических флотомашин зависит от устройства и способа диспергирования воздуха. Пневматические флотационные машины можно подразделить на аппараты с совмещенной камерой аэрации и сепарации, и аппараты с отдельными камерами. С учетом различия гидродинамических условий в камерах последних к аэрационным установкам предъявляются разные требования. Аэраторы в камере минерализации должны обеспечивать максимальное газосодержание при оптимальной средней крупности пузырьков, зависящей от гранулометрического состава питания и интенсивности перемешивания, а также высокую вероятность столкновения частиц и пузырьков.

К наиболее распространенным аэрационным устройствам относятся устройства различной формы (трубки, пластины и т.д.), имеющие перфорированную поверхность, через которую под давлением подают воздух. В ряде пневматических флотационных машинах применяют тканевые аэраторы, к преимуществам которых относят низкую стоимость и регенерацию, а к недостаткам – неравномерность аэрации, появление крупных пузырьков и возможность попадания жидкости в воздушную магистраль.

В установленных на фабрике "Кипрус Сьеррита" (США) колонных флотационных машинах применено устройство, представляющее собой патрубок, герметично закрывающий диспергатор воздуха при выходе последнего из строя, что позволяет заменять отдельные трубки тканевого аэратора без остановки флотационного процесса.

Основным типом аэраторов в пневматических флотационных машинах остаются трубчатые устройства. Для улучшения аэрационных характеристик предложен аэратор, представляющий собой набор полых колец из пористого (войлок, или пористый полиэтилен) или эластичного материала, сжатых стяжными гайками, где дисперсный состав пузырьков регулируется изменением степени сжатия колец.

Разнообразие конструкций аэрирующих устройств расширяется с применением флотационных машин с отдельными камерами минерализации и сепарации [42].

К отдельному направлению конструирования относятся пульсационные (вибрационные) пневматические флотационные машины, принцип действия которых основан на диспергировании воздуха при пульсациях его давления в камере аэрации [43, 44, 45].

В ФРГ разработаны конструкции аэраторов с поверхностными струями [46]. Результаты, полученные при флотации в аппаратах с такими аэраторами, свидетельствуют о перспективности использования этого принципа аэрации. Для проведения глубокой аэрации жидкостную струю, инжектирующую окружающий воздух, помещают в воздушный колокол, опускаемый в придонную часть флотационной машины [47].

Работа струйного аэратора пневмогидравлического типа [48] основана на подаче в точку удара на дне камеры плоской наклонной затопленной струи пульпы и воздуха под давлением. Диспергирование воздуха происходит под действием турбулентных вихрей, возникающих вблизи зоны удара. Аэрация струями падающей жидкости используется во многих устройствах для флотации и водоочистки [49]. Применение струйных аэраторов - перспективное направление совершенствования конструкций флотомашин. В России и за рубежом разработано множество конструкций эжекторов и аэраторов типа сопло Вентури [50, 51]. В этих устройствах поступающая от насоса пульпа под давлением подается в суженное сечение (сопло) аэратора. Вследствие разряжения по другому трубопроводу инжектируется атмосферный воздух, который интенсивно диспергируется в диффузоре.

К недостаткам аэраторов с инъекцией воздуха из атмосферы относят малый срок службы вследствие быстрой забивки инжектора минеральными частицами при флотации плотных пульп. Этого недостатка лишены пневмогидравлические аэраторы, так как подача сжатого воздуха исключает необходимость установки сопла малого диаметра. Применяют также устройства, в которых сжатый воздух

или реагентно-воздушную смесь под давлением подают непосредственно в питающий флотационную машину патрубков или пульпопровод, а диспергацию осуществляют турбулентным потоком в трубе [52, 53, 54].

1.2. ЭЛЕМЕНТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА ИССЛЕДОВАНИЙ ГИДРОДИНАМИКИ ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕД

Современные подходы к исследованию гидродинамики гетерогенных сред реализуются в адекватных и гибких математических моделях и основываются на результатах физических экспериментов, с одной стороны, и вычислительной гидродинамике, с другой стороны [55, 56, 57]. Объединение этих прикладных и фундаментальных источников знания формируется в развитии вычислительных ресурсов, становящихся все более мощными, производительными и доступными.

Вычислительная гидродинамика, реализованная в численных алгоритмах высокопроизводительных программных средств, позволяет находить решения фундаментальных физических уравнений, описывающих гидродинамику гетерогенных сред. Общая и наиболее простая форма таких уравнений объединена в систему уравнений Навье-Стокса, которую можно представить в векторном виде как:

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \rho \mathbf{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v}, \quad (1)$$

где ρ – плотность среды, \mathbf{v} – вектор скорости, t – время, \mathbf{g} – вектор ускорения свободного падения, p – давление, ∇ – оператор Гамильтона.

Известно, что уравнения движения жидкости под действием определенных сил и при определенных граничных условиях можно представить в двух различных формах [58, 59].

Выбор формы уравнений движения жидкости зависит от цели исследований. Если целью является определение для любого момента времени скорости, давления и плотности во всех точках среды, то используемая форма уравнений соответствует, так называемому, эйлерову подходу. Если целью исследований является определение траектории (истории) каждой отдельной «жидкой» частицы, то форма уравнений соответствует лагранжеву подходу. В своей работе [59] Ламб, ссылаясь на труды Эйлера, предупреждает, что, фактически, обе формы уравнений принадлежат Эйлеру. Поэтому, особенно в современных интерпретациях вопросов гидродинамики, названные подходы именуется соответственно как Euler – Euler approach и Euler – Lagrange approach.

Уравнения движения жидкости Эйлера имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} &= X - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} &= Y - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} &= Z - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \end{aligned} \right\}. \quad (2)$$

Уравнения движения жидкости Лагранжа имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} - X \right) \frac{\partial x}{\partial a} + \left(\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - Y \right) \frac{\partial y}{\partial a} + \left(\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} - Z \right) \frac{\partial z}{\partial a} &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial a} \\ \left(\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} - X \right) \frac{\partial x}{\partial b} + \left(\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - Y \right) \frac{\partial y}{\partial b} + \left(\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} - Z \right) \frac{\partial z}{\partial b} &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial b} \\ \left(\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} - X \right) \frac{\partial x}{\partial c} + \left(\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - Y \right) \frac{\partial y}{\partial c} + \left(\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} - Z \right) \frac{\partial z}{\partial c} &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial c} \end{aligned} \right\}. \quad (3)$$

В приведенных уравнениях v_x, v_y, v_z – компоненты вектора скорости в точке (x, y, z) в момент времени t , ρ – плотность жидкости, p – давление, (X, Y, Z) – приведенные компоненты внешних сил, (a, b, c) – начальные координаты бесконечно малого объема жидкости ("жидкой частицы").

Представленные в природе и в различных технологических процессах потоки, к которым относится и процесс флотационного разделения минералов, представляют собой смесь фаз. Для многофазных систем понятие фазы более широко, чем отождествление ее с одним из агрегатных состояний вещества –

газообразным, жидким или твердым. В общем случае, количество фаз неограниченно. Каждая из них должна отвечать определенным отличительным признакам. Очевидно, что этими признаками должны являться свойства различной природы, которые ответственны за характер взаимодействия данной фазы с другими фазами, с потоком в целом и со сторонними воздействиями на поток [60].

В потоке флотационной пульпы можно выделить фазы, состоящие из твердых частиц, принадлежащих разным классам крупности; отличающиеся степенью раскрытия полезного минерала; проявляющие различные поверхностные свойства частиц и т.д. Рассматривая флотацию как многофазный поток, можно говорить, что в его состав входят фазы, состоящие из частиц, принадлежащих к различным узким сепарационным фракциям.

В случае флотации, мы имеем дело, в подавляющем большинстве способов ее реализации, с потоком веществ, представленных тремя агрегатными состояниями. Такой поток является комбинацией трех режимов взаимодействия веществ, находящихся в различных агрегатных состояниях в бинарных потоках: газ – жидкость или жидкость – жидкость, газ – частицы твердого вещества и жидкость – частицы твердого вещества. Имея математическую модель одного из названных режимов, можно описать различные физические процессы. Например, математическая модель режима взаимодействия веществ в потоке «жидкость – частицы твердого вещества» позволяет рассматривать такие процессы, как вязкий и невязкий гидротранспорт частиц, седиментация и оживленный слой.

Созданию математической модели предшествует формализация объекта моделирования и выработка ряда аксиоматичных допущений о его свойствах в целом или о свойствах его отдельных компонентов [61].

Таковыми исходными допущениями для гетерогенных сред являются [62]:

1. Размеры включений или неоднородностей в смеси (среде) во много раз больше молекулярно-кинетических (расстояний между молекулами, размеров кристаллической решетки, средних длин свободного пробега молекул).

2. Размеры указанных неоднородностей во много раз меньше расстояний, на которых осредненные или макроскопические параметры смеси (среды) или фаз меняются существенно.

В работе [63], посвященной многофазной гидродинамике, предложено описание гетерогенной среды как многофазного многоскоростного континуума (ММК).

ММК представляет собой совокупность N континуумов, каждый из которых относится к своей фазе и заполняет один и тот же объем, занятый средой. Для каждой из фаз континуумов в каждой точке обычным образом определяется приведенная плотность, скорость и другие параметры, относящиеся к своему континууму и своей фазе. Таким образом, в каждой точке среды можно определить N плотностей, N скоростей и т. д., а так же параметры, характеризующие среду в целом.

Поскольку параметры фаз и всей среды меняются в пространстве и во времени, при описании ММК вводят субстанциональные производные, связанные с движением i -ой фазы и с движением среды в целом:

$$\frac{d_i}{dt} \equiv \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{v}_i \nabla; \quad \frac{d}{dt} \equiv \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{v} \nabla.$$

С учетом этого, в теории ММК оперируют следующими балансовыми соотношениями массы, импульса и энергии для каждой из фаз [64]:

Уравнение сохранения массы для i -ой фазы:

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \rho_i \mathbf{v}_i \nabla = \sum_{j=1}^N J_{ji}, \quad (4)$$

где J_{ji} характеризует интенсивность переноса массы от j -ой к i -ой фазе.

Уравнение сохранения массы для всей среды:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \mathbf{v} \nabla = 0. \quad (5)$$

Уравнение сохранения импульса для i -ой фазы:

$$\rho_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = \nabla^k \sigma_i^k + \rho_i \mathbf{g}_i + \sum_{j=1}^N (P_{ji} - J_{ji} \mathbf{v}_i), \quad (6)$$

где P_{ji} – интенсивность обмена импульсом между j -ой и i -ой фазами, k – верхний индекс, указывающий на номер декартовой координаты, σ – тензор поверхностных сил, \mathbf{g} – вектор массовых сил, относящийся к среде в целом:

$$\sigma = \sum_{i=1}^N \sigma_i, \quad \rho \mathbf{g} = \sum_{i=1}^N \rho_i \mathbf{g}_i.$$

Уравнение сохранения импульса для всей среды:

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \nabla^k \sigma^k + \rho \mathbf{g} - \sum_{i=1}^N \nabla^k (\rho_i \omega_i^k \mathbf{w}), \quad (7)$$

где ω_i – радиальная скорость i -ой фазы на межфазной границе и \mathbf{w} – скорость относительного движения фаз.

Уравнение сохранения энергии для i -ой фазы:

$$\rho_i \frac{d}{dt} \left(u_i + \frac{v_i^2}{2} \right) = \nabla(\mathbf{c}_i - \mathbf{q}_i) + \rho_i \mathbf{g}_i \mathbf{v}_i + \sum_{j=1}^N \left[E_{ji} - J_{ji} \left(u_i + \frac{v_i^2}{2} \right) \right], \quad (8)$$

где u_i – внутренняя энергия i -ой фазы, $v_i^2/2$ – кинетическая энергия i -ой фазы, \mathbf{c}_i – работа внешних сил, \mathbf{q}_i – поток тепла, E_{ji} – интенсивность обмена энергией между j -ой и i -ой фазами.

Уравнение сохранения энергии для всей среды:

$$\rho \frac{dE}{dt} + \sum_{i=1}^N \nabla^k (\rho_i \omega_i^k E_i) = \nabla^k (c_i^k - q_i^k) + \rho \mathbf{g}^k v^k + \sum_{i=1}^N \rho_i \mathbf{g}_i^k \omega_i^k. \quad (9)$$

Исходя из форм уравнений движения (2) и (3) и с учетом приведенных балансовых соотношений (4-9), очевидно, что фундаментальные законы сохранения массы, импульса и энергии, выраженные аналитически в теории ММК, отвечают уравнениям движения эйлера подхода. При этом т.к. фазы гетерогенной среды, заполняя весь ее объем, неограниченно проникают друг в

друга и сохраняют свой мгновенный объем, необходимым уточнением и дополнением балансовых соотношений является введение объемной фракции фазы. Данная величина является функцией пространства и времени, алгебраическая сумма всех объемных фракций среды равна единице.

Современная интерпретация эйлера подхода включает три основных гидродинамических модели.

Первая из них – Volume of Fluid (VOF) Model Theory (модель теории объема жидкости). В литературе можно встретить случаи применения данной модели для описания явления на границе несмешивающихся жидкостей, получившего название Kelvin – Helmholtz instability (неустойчивость Кельвина – Гельмгольца) [65, 66]. Модель используется для случаев несмешивающихся жидкостей, движения больших пузырей газа, образования волновых эффектов на границах раздела фаз.

Вторая модель – Mixture Model Theory (модель теории смеси). Модель применима при моделировании многоскоростных многофазных потоков с вероятным образованием локальных равновесных областей и моноскоростных сцепленных потоков. В приложении к процессам обогащения, модель может использоваться при моделировании седиментации, процессов разделения в циклонах, процессов грохочения тонких фракций минеральных частиц, процессов аэрации с низким содержанием газовой фазы. С учетом сказанного, можно заключить, что Mixture Model Theory в большей степени адаптирована к физическим системам, где превалируют инертные свойства фаз, а роль межфазных пограничных взаимодействий нивелирована.

Третья модель – многофазная модель Эйлера (Eulerian Model Theory), предназначенная для моделирования гетерогенных сред, представленных несколькими взаимодействующими фазами, количество которых может быть ограничено только возможностями исполнительного устройства (компьютер) и требованиями к сходимости результатов расчета.

Для выбора модели, соответствующей исследуемой гетерогенной системе, должны быть установлены режим взаимодействия вещества в потоке, объем и

размеры включений (вторичных фаз), характер потока (турбулентный или ламинарный) и число Стокса.

Объем и размеры вторичных фаз характеризуют поток или как разбавленный, или как плотный. Численным критерием «плотности» потока является интегральная объемная фракция вторичных фаз:

$$\alpha_{\Sigma q} = \frac{V_{\Sigma q}}{V}, \quad (10)$$

где $V_{\Sigma q}$ – полный объем вторичных фаз, V – объем системы, q – индекс фазы. При этом если $\alpha_{\Sigma q} < 10\%$, то поток считают разбавленным и полагают, что среднее расстояние между частицами вторичных фаз составляет не менее их удвоенного размера и межчастичным взаимодействием можно пренебречь.

Несмотря на сложность явления турбулентности, многообразие и эмпирический характер подходов к ее описанию, в настоящее время при моделировании турбулентности в основном используются две однофазные модели, известные как k - ϵ стандартная модель и RSM (Reynolds Stress model – модель напряжений Рейнольдса). При этом и та, и другая модели напрямую учитывают диссипативные проявления в первичной (основной, несущей) фазе. Однако уравнения этих моделей содержат члены дополнительных условий, учитывающие влияние на турбулизацию потока свойств вторичных фаз. Применимость таких дополнительных условий обусловлена при выполнении следующих ограничений: 1) – рассматриваемый поток является разбавленным; 2) – отношение плотностей каждой пары фаз, входящих в гетерогенную систему соизмеримо с единицей.

Число Стокса, учитывающее соотношение временных и пространственных масштабов исследуемой системы и частиц, входящих в состав вторичных фаз, так же позволяет осуществить правильный выбор модели. Так, если $St < 1$, то полагают, что частицы тесно связаны с потоком, равновесны по отношению к нему; если $St > 1$, то полагают, что частицы будут двигаться независимо от поля скоростей потока.

Применительно к направленности данной работы, по мнению автора, далее следует сконцентрироваться на рассмотрении математического аппарата многофазной модели Эйлера. Это обосновано тем, что процесс флотации протекает в многофазном плотном потоке; отношение плотностей фаз отлично от единицы, а частицы, которые их составляют, проявляют и инертные, и поверхностные свойства, что в значительной мере определяет характер и интенсивность межфазного взаимодействия.

Многофазная модель Эйлера, как производная эйлера подхода к описанию движения жидкости и теории ММК, дополненная введением понятия объемной фракции вторичной фазы, представляет собой аналитический базис вычислительной гидродинамики для решения задач исследования гетерогенных сред, подобных среде процесса флотации, и включает следующую замкнутую систему дифференциальных уравнений.

Объемная фракция (доля) каждой фазы может быть вычислена из уравнения непрерывности, записанного в виде:

$$\frac{1}{\rho_{rq}} \left(\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \left[\frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3 \text{с}} \right] \right], \quad (11)$$

где ρ_{rq} – исходная (reference) или усредненная (averaged) по объему плотность q – фазы в расчетной области; α – объемная фракция фазы; ρ – физическая плотность фазы; \vec{v} – скорость фазы; \dot{m}_{pq} – характеристика переноса массы от q – фазы к p – фазе.

Уравнение сохранения импульса для режима взаимодействия веществ по типу газ – жидкость или жидкость – жидкость:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = & -\alpha_q \nabla p + \nabla \bar{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \vec{g} + \\ & + \sum_{p=1}^n (K_{pq} (\vec{v}_p - \vec{v}_q) + \dot{m}_{pq} \vec{v}_{pq} - \dot{m}_{qp} \vec{v}_{qp}) + \\ & + (\vec{F}_q + \vec{F}_{\text{lift},q} + \vec{F}_{\text{vm},q}) \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \text{с}^2} \equiv \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}} \cdot \frac{1}{\text{м}^3 \text{с}} \right], \quad (12) \end{aligned}$$

где $\bar{\tau}_q$ – тензор касательных напряжений, \vec{F}_q – внешняя массовая сила, $\vec{F}_{\text{lift},q}$ – подъемная сила, $\vec{F}_{\text{vm},q}$ – виртуальный массовый эффект, \vec{v}_{pq} – межфазная относительная скорость, определяемая из условий: если $\dot{m}_{pq} > 0$, то $\vec{v}_{pq} = \vec{v}_p$ и если $\dot{m}_{pq} < 0$, то $\vec{v}_{pq} = \vec{v}_q$. Выражение $K_{pq}(\vec{v}_p - \vec{v}_q)$ в (12) представляет силу межфазного взаимодействия, где K_{pq} – коэффициент обмена импульсом между фазами.

Уравнение сохранения импульса для режима взаимодействия веществ по типу газ (жидкость) – частицы твердого вещества использует многожидкостную гранулированную модель, описывающую эволюцию потока смеси жидкой и дисперсной твердой фаз [67, 68, 69]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) + \nabla (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = & -\alpha_s \nabla p - \nabla p_s + \nabla \bar{\tau}_s + \alpha_s \rho_s \vec{g} + \\ & + \sum_{l=1}^n (K_{ls} (\vec{v}_l - \vec{v}_s) + \dot{m}_{ls} \vec{v}_{ls} - \dot{m}_{sl} \vec{v}_{sl}) + \\ & + (\vec{F}_s + \vec{F}_{\text{lift},s} + \vec{F}_{\text{vm},s}) \quad \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \text{с}^2} \equiv \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}} \cdot \frac{1}{\text{м}^3 \text{с}} \right], \quad (13) \end{aligned}$$

где s – индекс твердой фазы, l – индекс газовой (жидкой) фазы, p_s – давление твердой фазы.

Уравнение сохранения энергии в системе расчетных уравнений так же должно быть записано отдельно для каждой из фаз:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q h_q) + \nabla (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q h_q) = & \alpha_q \frac{\partial p_q}{\partial t} + \bar{\tau}_q \nabla \vec{v}_q - \nabla \vec{q}_q + S_q + \\ & + \sum_{p=1}^n (Q_{pq} + \dot{m}_{pq} h_{pq} - \dot{m}_{qp} h_{qp}) \quad \left[\frac{\text{кг}}{\text{мс}^3} \equiv \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \text{с}} \right], \quad (14) \end{aligned}$$

газ h_q – удельная энтальпия фазы, \vec{q}_q – тепловой поток, S_q – внутренний источник тепловой энергии, Q_{pq} – интенсивность теплообмена между фазами.

$\vec{F}_{\text{lift},q}$ – подъемная сила при постановке задачи по умолчанию равна нулю, но ее влияние может быть учтено для вторичных фаз представленных каплями, пузырьками или твердыми частицами при выявлении значительных градиентов

скорости первичной фазы. Таким образом, влияние подъемной силы нивелируется для вторичных фаз, частицы которых существенно меньше межчастичных расстояний или, напротив, плотно упакованы. Кроме того, значение подъемной силы по порядку величины много меньше силы межфазного сопротивления. Однако, в случаях интенсивного пространственного разделения вторичных фаз в моделируемой области, учет подъемной силы может быть целесообразным, а ее оценка может быть осуществлена по формуле [70]:

$$\vec{F}_{\text{lift},q} = -0,5\rho_q\alpha_q(\vec{v}_q - \vec{v}_p) \times (\nabla \times \vec{v}_q). \quad (15)$$

$\vec{F}_{\text{vm},q}$ – виртуальный массовый эффект обусловлен ускорением вторичной фазы относительно первичной фазы. Он состоит в том, что ускоренные частицы вторичной фазы стимулируют проявление инерционных свойств первичной фазы. В отличие от сил вязкости, этот эффект следует учитывать, когда плотность вторичной фазы много меньше плотности первичной фазы. Очевидно, что виртуальный массовый эффект, в том числе, сопровождает такие процессы как естественный перенос пузырьковой фазы в столбах жидкости. Учет и оценка эффекта так же приведены в [70] в виде:

$$\vec{F}_{\text{vm},q} = 0,5\rho_q\alpha_q \left(\frac{d_q \vec{v}_q}{dt} - \frac{d_p \vec{v}_p}{dt} \right). \quad (16)$$

Особое значение при рассмотрении уравнений сохранения импульса математической модели гетерогенной системы отводится коэффициенту обмена импульсом между фазами. В рамках Eulerian Model Theory для решения задач исследования гетерогенных систем, подобных системе процесса флотации, в зависимости от характера бинарных взаимодействий, коэффициент обмена импульсом можно представить следующим образом.

Для режима взаимодействия пузырек газа – жидкость применима универсальная модель сопротивления [71] с коэффициентом обмена

$$K_{pq} = \frac{\alpha_q \alpha_p \rho_p f}{\tau_p},$$

где: q – индекс жидкой фазы, p – индекс газовой пузырьковой фазы; τ_p – время релаксации пузырька:

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu_e};$$

функция сопротивления:

$$f = \frac{C_D Re}{24}, \quad Re = \frac{\rho_q |\vec{v}_q - \vec{v}_p| d_p}{\mu_e};$$

коэффициент сопротивления:

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0,1 Re^{0,75});$$

эффективная вязкость жидкой фазы с учетом влияния компонентов ММК

$$\mu_e = \frac{\mu_q}{1 - \alpha_p}.$$

Для режима взаимодействия твердая частица – жидкость, – модель сопротивления Вена и Ю [72] с коэффициентом обмена

$$K_{sl} = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s \alpha_l \rho_l |\vec{v}_s - \vec{v}_l|}{d_s \alpha_l^{2,65}},$$

где:

$$C_D = \frac{24}{\alpha_l Re_s} [1 + 0,15 (\alpha_l Re_s)^{0,687}], \quad Re_s = \frac{\rho_l d_s |\vec{v}_s - \vec{v}_l|}{\mu_l}.$$

Для режима взаимодействия твердая частица – пузырек газа, – модель сопротивления Шиллера и Науманна [73], определяемая по аналогии с универсальной моделью сопротивления за исключением вычисления коэффициента сопротивления и числа Рейнольдса для пары вторичных фаз:

$$C_D = \begin{cases} 24(1 + 0,15 Re^{0,687}) / Re & Re \leq 1000 \\ 0,44 & Re > 1000 \end{cases}, \quad Re = \frac{\rho_{rp} |\vec{v}_r - \vec{v}_p|}{\alpha_p \mu_p + \alpha_r \mu_r} d_{rp}.$$

Для режима взаимодействия твердая частица – твердая частица, – симметричная модель сопротивления Сиамлала и О'Бриена [74] без учета взаимного трения для разбавленных фаз с коэффициентом обмена

$$K_{ts} = \frac{3\alpha_s \rho_s \alpha_l \rho_l (d_l + d_s)^2}{2(\rho_l d_l^3 + \rho_s d_s^3)} |\vec{v}_l - \vec{v}_s|.$$

Исследование гидродинамики гетерогенных сред, подобных среде процесса флотации, в полной мере базируется на положениях вычислительной гидродинамики. Применение ее вычислительного аппарата, благодаря использованию численных методов решения дифференциальных уравнений гидродинамики, реализованных в настоящее время в ряде решателей таких, например, программных кодов как ANSYS Fluent и Comsol Multiphysics, позволяет создавать математические модели, отображающие физические и физико-химические особенности процесса флотации. Полнота и степень проработки начальных и граничных условий (условий однозначности) математической модели, в свою очередь, определяют возможность валидации и верификации алгоритма и результатов вычислительного эксперимента, который способен отражать не только состояние среды в настоящий момент времени, но и ее прогнозные характеристики, в рассматриваемом случае выражаемые технологическими показателями флотации. Тем самым определяется, как минимум, три возможных составляющих применимости методов вычислительной гидродинамики в теории обогащения минерального сырья флотацией: 1 - Исследование процессов, реализованных в действующих машинах и аппаратах для переработки различных видов сырья; 2 - Отработка и совершенствование технологических параметров процесса флотации при внесении изменений в режим процесса; 3 - Прототипирование новых конструкций флотационного оборудования.

Таким образом, из приведенного обзора представлений о роли газовой фазы при флотации и применимости методов вычислительной гидродинамики в теории обогащения минерального сырья можно сделать вывод о необходимости исследований явлений, происходящих на границе раздела газ-жидкость, развития теории и практики получения дисперсных газовых сред и управления их физическими и физико-химическими свойствами, внедрения и более широкого использования аппарата вычислительной гидродинамики для изучения ГСПФ. В этой связи ставятся:

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.

ГЛАВА 2**МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ФИЗИЧЕСКИХ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ
СВОЙСТВ УЗКИХ СЕПАРАЦИОННЫХ ФРАКЦИЙ
ПИТАНИЯ ФЛОТАЦИИ****2.1. АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ЗАВИСИМОСТИ УДЕЛЬНОЙ ПЛОЩАДИ
И ТОЛЩИНЫ АДсорбЦИОННОГО СЛОЯ
НА ПОВЕРХНОСТИ РАЗДЕЛА ГАЗ-ЖИДКОСТЬ В АВДВ
ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ ГЕТЕРОПОЛЯРНОГО ПАВ**

Принципы, положенные в основу использования АВДВ при флотации минералов, предполагают формирование адсорбционных слоев гетерополярных ПАВ на поверхности диспергированных пузырьков воздуха. При пропускании воздуха через раствор ПАВ в процессе приготовления АВДВ, помимо образования пузырьковой фазы с диспергацией, зависящей от типа и концентрации гетерополярного ПАВ, должно наблюдаться изменение его концентрации. В растворе концентрация ПАВ должна уменьшаться, а на поверхности пузырьков воздуха – увеличиваться [29]. Тогда следует ожидать, что образующийся слой пены будет отличаться повышенным содержанием ПАВ, а последующий съём пены и ее разрушение позволят получить раствор с концентрацией выше по сравнению с исходной.

Для исследования зависимости удельной площади и толщины адсорбционного слоя на границе раздела газ-жидкость в АВДВ от концентрации флотационного реагента использовалась лабораторная установка (Рисунок 1), представляющая собой колонку прямоугольного сечения с размерами 50*50*1300

мм, выполненную из прозрачного оргстекла, и оснащенная цифровой фотокамерой [75, 76].

Первичными параметрами оценки являются концентрация гетерополярного ПАВ в исходном растворе C_1 [мг/л]; расход исходного раствора Q_{sol} [м³/с]; расход воздуха Q_{air} [м³/с].

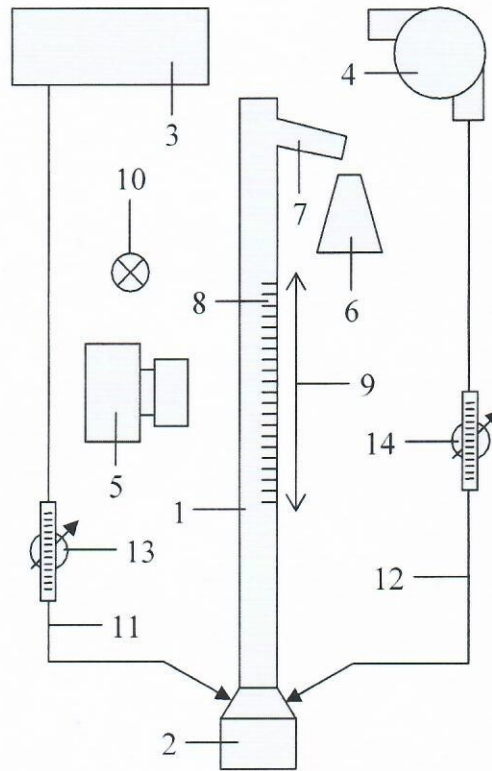


Рис. 1. – Схема лабораторной установки

1 – колонка из оргстекла; 2 – струйный диспергатор (Рисунок 2); 3 – емкость для исходного раствора реагента; 4 – воздуходувка; 5 – фотокамера; 6 – емкость для приема пены; 7 – желоб стока пены; 8 – шкала; 9 – черный экран; 10 – галогенная лампа подсветки; 11 – магистраль подачи исходного раствора; 12 – магистраль подачи воздуха; 13 – ротаметр для контроля над расходом исходного раствора; 14 – ротаметр для контроля над расходом воздуха.

Воздух и исходный раствор гетерополярного ПАВ через соответствующие регуляторы расхода и ротаметры поступают в струйный диспергатор установки, где создаются условия интенсивного образования дисперсии воздушных пузырьков. Регулировка струйного диспергатора осуществляется регуляторами расхода таким образом, чтобы предотвратить явление барботажа. Также посредством регулировки устанавливается расход исходного раствора,

обеспечивающий при стационарной работе установки формирование устойчивого пенного слоя в ее верхней части.

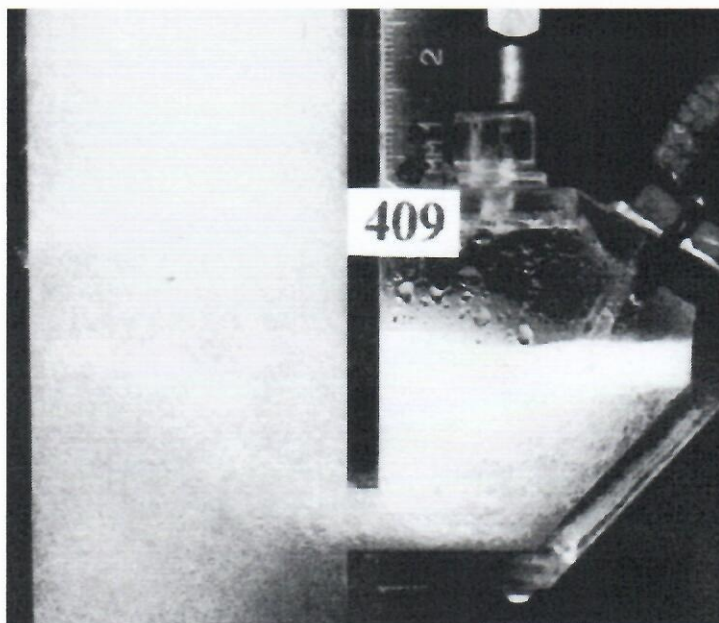


Рис. 2. – Струйный диспергатор

По истечении 2-3 минут стационарной работы установки приступают к отбору пены через слив пенного продукта. Одновременно осуществляют фотографирование зоны объема флотационной установки, расположенной на две трети высоты флотационной колонки. При этом следует обеспечить достаточно хороший уровень освещения колонки, закрепление фотоаппарата на штативе и наличие в зоне съемки миллиметровой шкалы. При использовании цифрового фотоаппарата с зеркальной оптической системой фокусировки оптимально использовать режим макросъемки.

Обработка полученных результатов состоит в проведении имидж-анализа полученных снимков с целью статистического расчета размеров пузырьков воздуха и аппаратного анализа (фотоколориметрия или другие инструментальные методы анализа) полученного после разрушения пены конечного раствора для определения концентрации в нем гетерополярного ПАВ C_2 [мг/л].

С учетом того, что форма пузырьков в подавляющем большинстве случаев представляет собой эллипсоид вращения, определяются вертикальные (b) и горизонтальные (a) полуоси пузырьков.

Для расчета площади поверхности пузырьков могут быть использованы известные формулы:

- для сплюснутых пузырьков, $a > b$:

$$S_{\text{спл.}} = 2\pi a \left(a + \frac{b^2}{\sqrt{a^2 - b^2}} \ln \frac{a + \sqrt{a^2 - b^2}}{b} \right); \quad (17)$$

- для вытянутых пузырьков, $a < b$:

$$S_{\text{выт.}} = 2\pi a \left(a + \frac{b^2}{\sqrt{b^2 - a^2}} \arcsin \frac{\sqrt{b^2 - a^2}}{b} \right); \quad (18)$$

- для пузырьков сферической формы:

$$S_{\text{сфр.}} = 4\pi r^2. \quad (19)$$

Однако в целях исследований, наиболее значимой величиной, против площади поверхности пузырьков воздуха, является величина удельной площади поверхности раздела газ-жидкость.

Расчет данной величины может быть произведен, исходя из предположения об абсолютной сферичности пузырьков (S'), или с учетом фактических соотношений величин их полуосей (S'').

В первом случае расчет производится по формуле:

$$S'_{a/l} = \frac{\frac{Q_{\text{air}}}{4} \cdot 4\pi r^2}{\frac{4}{3}\pi r^3} = \frac{3Q_{\text{air}}}{r(Q_{\text{sol}} + Q_{\text{air}})} \left[\frac{\text{м}^2}{\text{м}^3} \right], \quad (20)$$

где $S'_{a/l}$ – удельная площадь поверхности раздела газовой (air) и жидкой (liquid) фазы, r – радиус пузырька воздуха.

Для расчета во втором случае примем следующие обозначения и соотношения величин:

- a_1, b_1 – средние по выборке горизонтальные и вертикальные полуоси сплюснутых пузырьков;
- a_2, b_2 – средние по выборке горизонтальные и вертикальные полуоси вытянутых пузырьков;

- r – средний по выборке радиус сферических пузырьков;
- q – величина выборки при имидж-анализе;
- q_1, q_2, q_3 – количества сплюснутых, вытянутых и сферических пузырьков в выборке имидж-анализа;
- V_1, V_2, V_3 – объемы сплюснутого, вытянутого и сферического пузырьков:

$$V_1 = \frac{4}{3} \pi a_1^2 b_1, \quad V_2 = \frac{4}{3} \pi a_2^2 b_2, \quad V_3 = \frac{4}{3} \pi r^3;$$

- S_1, S_2, S_3 – площади поверхности сплюснутого, вытянутого и сферического пузырьков (согласно формулам 17, 18, 19).

Тогда:

- $q_1 V_1 = V_{1\Sigma}, q_2 V_2 = V_{2\Sigma}, q_3 V_3 = V_{3\Sigma}$ – объемы сплюснутых, вытянутых и сферических пузырьков в объеме выборки и
- $V_{1\Sigma} + V_{2\Sigma} + V_{3\Sigma} = V_\Sigma$ – объем пузырьков в выборке;
- $\Delta V_1, \Delta V_2, \Delta V_3$ – доли объемов пузырьков в выборке, где

$$\Delta V_1 = \frac{V_{1\Sigma}}{V_\Sigma}, \Delta V_2 = \frac{V_{2\Sigma}}{V_\Sigma}, \Delta V_3 = \frac{V_{3\Sigma}}{V_\Sigma};$$

- $\Delta V_{1q}, \Delta V_{2q}, \Delta V_{3q}$ – удельные по времени объемные доли пузырьков в объеме флотационной колонки, где

$$\Delta V_{1q} = Q_{air} \Delta V_1, \quad \Delta V_{2q} = Q_{air} \Delta V_2, \quad \Delta V_{3q} = Q_{air} \Delta V_3;$$

- n_1, n_2, n_3 – удельные по времени количества пузырьков во флотационной колонке, где

$$n_1 = \frac{\Delta V_{1q}}{V_1}, \quad n_2 = \frac{\Delta V_{2q}}{V_2}, \quad n_3 = \frac{\Delta V_{3q}}{V_3}.$$

Тогда:

$$S''_{a/l} = \frac{S_1 n_1 + S_2 n_2 + S_3 n_3}{Q_{sol} + Q_{air}} = \frac{S_1 \frac{\Delta V_{1q}}{V_1} + S_2 \frac{\Delta V_{2q}}{V_2} + S_3 \frac{\Delta V_{3q}}{V_3}}{Q_{sol} + Q_{air}} =$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{S_1 \frac{Q_{air} \Delta V_1}{V_1} + S_2 \frac{Q_{air} \Delta V_2}{V_2} + S_3 \frac{Q_{air} \Delta V_3}{V_3}}{Q_{sol} + Q_{air}} = \\
&= \frac{Q_{air}}{Q_{sol} + Q_{air}} \cdot \left(S_1 \frac{\Delta V_1}{V_1} + S_2 \frac{\Delta V_2}{V_2} + S_3 \frac{\Delta V_3}{V_3} \right) = \\
&= \frac{Q_{air}}{(Q_{sol} + Q_{air})(q_1 V_1 + q_2 V_2 + q_3 V_3)} \cdot \left(S_1 \frac{q_1 V_1}{V_1} + S_2 \frac{q_2 V_2}{V_2} + S_3 \frac{q_3 V_3}{V_3} \right).
\end{aligned}$$

И окончательно:

$$S''_{a/l} = \frac{Q_{air}(q_1 S_1 + q_2 S_2 + q_3 S_3)}{(Q_{sol} + Q_{air})(q_1 V_1 + q_2 V_2 + q_3 V_3)} \left[\frac{\text{м}^2}{\text{м}^3} \right], \quad (21)$$

Результаты расчетов по полученной формуле (21) и их графическое представление позволяют получить зависимости удельной площади поверхности раздела газ-жидкость от концентрации реагента.

Апробация приведенного подхода к оценке удельной площади поверхности раздела газ-жидкость показала, что для различных концентраций различных реагентов учет несферичности пузырьков позволяет уточнить результат расчета, проведенного из предположения об абсолютной сферичности пузырьков, более чем на десять процентов.

Определим увеличение концентрации в конечном растворе:

$$\Delta C = (C_2 - C_1) \cdot 10^{-6} \left[\frac{\text{м}^3}{\text{м}^3} \right]. \quad (22)$$

Тогда

$$V_k \Delta C = V_{rg}, \quad (23)$$

где V_k – объем конечного раствора, V_{rg} – объем гетерополярного ПАВ в конечном растворе.

Очевидно, что количество воздуха, затраченное на формирование собранной пены можно определить как

$$Q_{a/f} = \frac{V_k Q_{air}}{Q_{sol}}. \quad (24)$$

Тогда

- N_1, N_2, N_3 – количества пузырьков, приведенные к количеству воздуха, затраченного на формирование собранной пены, где

$$N_1 = \frac{n_1 Q_{a/f}}{Q_{air}} = \frac{\Delta V_{1q}}{V_1} \cdot \frac{1}{Q_{air}} \cdot \frac{V_k Q_{air}}{Q_{sol}} = \frac{Q_{air} \Delta V_1}{V_1} \cdot \frac{V_k}{Q_{sol}} = \frac{Q_{air}}{V_1} \cdot \frac{V_{1\Sigma}}{V_\Sigma} \cdot \frac{V_k}{Q_{sol}} =$$

$$= \frac{Q_{air}}{V_1} \cdot \frac{q_1 V_1}{(q_1 V_1 + q_2 V_2 + q_3 V_3)} \cdot \frac{V_k}{Q_{sol}} = \frac{q_1 Q_{air} V_k}{Q_{sol} (q_1 V_1 + q_2 V_2 + q_3 V_3)}$$

и аналогично:

$$N_2 = \frac{q_2 Q_{air} V_k}{Q_{sol} (q_1 V_1 + q_2 V_2 + q_3 V_3)}, \quad N_3 = \frac{q_3 Q_{air} V_k}{Q_{sol} (q_1 V_1 + q_2 V_2 + q_3 V_3)}. \quad (25)$$

Обозначим искомую толщину адсорбционного слоя – l .

Тогда для пузырьков с адсорбированным на поверхности гетерополярным ПАВ имеем:

$$a'_1 = a_1 + l; \quad b'_1 = b_1 + l; \quad a'_2 = a_2 + l; \quad b'_2 = b_2 + l; \quad r' = r + l,$$

$$V'_1 = \frac{4}{3} \pi (a_1 + l)^2 (b_1 + l), \quad V'_2 = \frac{4}{3} \pi (a_2 + l)^2 (b_2 + l), \quad V'_3 = \frac{4}{3} \pi (r + l)^3.$$

И очевидно, что

$$N_1 (V'_1 - V_1) + N_2 (V'_2 - V_2) + N_3 (V'_3 - V_3) = V_{rg},$$

где

$$V'_1 - V_1 = \frac{4}{3} \pi (a_1 + l)^2 (b_1 + l) - \frac{4}{3} \pi a_1^2 b_1 =$$

$$= \frac{4}{3} \pi (l^3 + l^2 (2a_1 + b_1) + l (2a_1 b_1 + a_1^2))$$

и аналогично:

$$V'_2 - V_2 = \frac{4}{3} \pi (l^3 + l^2 (2a_2 + b_2) + l (2a_2 b_2 + a_2^2)),$$

$$V'_3 - V_3 = \frac{4}{3} \pi (l^3 + 3rl^2 + 3r^2 l).$$

Тогда

$$\begin{aligned}
& q_1(l^3 + l^2(2a_1 + b_1) + l(2a_1b_1 + a_1^2)) + \\
& + q_2(l^3 + l^2(2a_2 + b_2) + l(2a_2b_2 + a_2^2)) + \\
& + q_3(l^3 + 3rl^2 + 3r^2l) = \frac{3V_{rg}Q_{sol}(q_1V_1 + q_2V_2 + q_3V_3)}{4\pi Q_{air}V_k}.
\end{aligned}$$

Раскроем скобки, сгруппируем подобные по l и введем обозначения:

$$A = q_1 + q_2 + q_3; \quad B = (2a_1 + b_1)q_1 + (2a_2 + b_2)q_2 + 3rq_3;$$

$$C = (2a_1b_1 + a_1^2)q_1 + (2a_2b_2 + a_2^2)q_2 + 3r^2q_3;$$

$$D = \frac{3\Delta C Q_{sol}(q_1V_1 + q_2V_2 + q_3V_3)}{4\pi Q_{air}}.$$

Таким образом получим кубическое уравнение вида

$$Al^3 + Bl^2 + Cl - D = 0,$$

для решения которого далее применим метод Кардано.

Именно, введем коэффициенты соответствующего канонического уравнения:

$$p = \frac{3AC - B^2}{3A^2}; \quad q = \frac{2B^3 - 9ABC + 27A^2D}{27A^3},$$

определим дискриминант:

$$Q = \left(\frac{p}{3}\right)^3 + \left(\frac{q}{2}\right)^2,$$

который, в случае явно вещественных коэффициентов исходного уравнения, вещественен и предполагает в решении единственный вещественный корень, и рассчитаем параметры решения

$$\alpha = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} \quad \text{и} \quad \beta = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}}.$$

Корень соответствующего канонического уравнения

$$y = \alpha + \beta,$$

а искомая величина – толщина адсорбционного слоя находится из соотношения

$$l = y - \frac{B}{3A}. \quad (26)$$

2.2. ИНИЦИАЛИЗАЦИЯ УЗКИХ СЕПАРАЦИОННЫХ ФРАКЦИЙ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА НАД МОДЕЛЬЮ ГЕТЕРОГЕННОЙ СРЕДЫ ПРОЦЕССА ФЛОТАЦИИ

Одним из направлений исследований ГСПФ является использование методов CFD моделирования процесса флотации [77, 78, 79, 80, 81].

Твердая фаза питания флотации представлена совокупностью мономинеральных и полиминеральных частиц, обладающих различными физическими и физико-химическими свойствами, значения величин которых имеют непрерывное распределение [82]. Проведение вычислительного эксперимента над моделью ГСПФ требует определения конечного числа твердых дисперсных (вторичных) фаз с конечными значениями величин свойств частиц их составляющих. Возможности постановки вычислительного эксперимента ограничены возможностями исполнительного устройства – компьютера, а точность расчета, определяющая успешную верификацию его результатов, зависит, в том числе, от количества вторичных фаз таким образом, что она повышается с увеличением их числа. Рост числа вторичных фаз приводит к резкому увеличению объема машинного кода задачи, объема баз данных вычислительного эксперимента и времени расчета.

Вне зависимости от того, является ли моделируемый процесс процессом, где вещество переходит из одной фазы в другую или нет, вычислительный эксперимент основывается на однозначном определении начальных и граничных условий. И, если граничные условия любого сепарационного процесса – это геометрия и механика сепарационной машины, внешние энергетические воздействия (например, – электромагнитное поле, теплопередача и т.д.), массовый баланс, то начальные условия это, в первую очередь, физические и физико-химические свойства УСФ, участвующих в процессе.

Для решения этой проблемы разработан метод инициализации УСФ при проведении вычислительного эксперимента над моделью ГСПФ, позволяющий определять интегральные значения свойств компонентов твердой фазы питания флотации, интерпретируемые как условия однозначности математической модели процесса флотации [83, 84].

Метод основывается на результатах гранулометрического и минералогического анализов, а также анализа сростковых фаз (форм) питания моделируемого процесса (фазовый анализ) [85, 86].

В методе учтены распределение минеральных частиц по крупности, минеральный состав, степень раскрытия сростков полезного минерала, содержание полезного компонента, оценка поверхностной энергии мономинеральных и полиминеральных частиц. Валидация метода осуществляется на основе оценок интегральных и пофракционных значений плотности твердой фазы и содержания полезного компонента.

Метод обеспечивает получение результатов математического моделирования процесса флотации в значениях содержания и извлечения полезного компонента и верификацию математической модели и технологической схемы реального производства или лабораторного эксперимента.

Особенностью метода является использование возможности определения поверхностной энергии частиц УСФ из количественной оценки поверхностной энергии минеральных зерен по установленной связи между ее величиной и значениями энергии ионного взаимодействия в кристаллической решетке минерала. Такой подход основывается на геоэнергетической теории А.Е.Ферсмана [4] и работах В.В.Зуева и др. [3], посвященных кристаллоэнергетике и оценке свойств твердых материалов.

Геоэнергетическая теория А.Е.Ферсмана рассматривает энергию ионного взаимодействия в кристаллической решетке минерала, исходя из представлений о полном потенциале ионизации (энергетической константе, эк), присущем каждому входящему в решетку аниону или катиону.

Формула, предложенная А.Е.Ферсманом, имеет вид:

$$U_v = 1071,5 \cdot \frac{\rho}{\mu} \sum_{i=1}^n \varepsilon_k j_i \text{ [кДж/см}^3\text{]}, \quad (27)$$

где: U_v – объемная энергия ионного взаимодействия в кристаллической решетке минерала; 1071,5 – поправка на вклад ионов в энергию решетки минерала; ρ – плотность минерала, г/см³; μ – молярная масса минерала, г/моль; n – количество сортов ионов, входящих в решетку; ε_k – энергетическая константа иона i -го сорта; j_i – количество ионов i -го сорта.

В свою очередь исследования, проведенные в работах В.В.Зуева и др., показывают, что большинство физико-химических свойств минералов может быть количественно описано с позиций удельных значений энергии ионного взаимодействия в кристаллической решетке, и позволяют проводить расчеты, в частности, поверхностной энергии минералов по линейной эмпирической зависимости

$$E_s = 0,0025 \cdot U_v + 0,3052 \text{ [Дж/м}^2\text{]}. \quad (28)$$

Фазовый состав пробы предполагает, что все частицы пробы, в той или иной мере содержат включения полезного минерала. Таким образом, удобно рассматривать все частицы пробы, как частицы, состоящие из полезного минерала, но с различными по величине весового содержания включениями прочих минералов, входящих в пробу, – сростки (сростковые формы) полезного минерала. Ряд сростковых форм ограничен сверху формой с максимальным по целям проводимого исследования содержанием полезного минерала (чистый минерал), а снизу – формой с его минимальным содержанием (следами).

При проведении предварительных вычислительному эксперименту лабораторных исследований пробы целесообразно заранее определить размер матрицы УСФ в координатах [классы крупности * сростковые формы полезного минерала], который должен удовлетворять целям эксперимента, вычислительным и временным ресурсам.

В случае, когда результаты лабораторных исследований пробы заранее не были связаны с проведением вычислительного эксперимента и размеры матрицы

не отвечают, например, его ресурсному обеспечению, приведение их к необходимому виду осуществляется путем использования известных балансовых соотношений.

Для дальнейшего изложения введем следующие обозначения:

- m_j – обозначение j -го минерала;
- m_1 – обозначение полезного минерала;
- M – количество минералов, выделенных в пробе;
- j – индекс минерала, $1 \leq j \leq M$;
- ρ_j – плотность j -го минерала;
- x_k – обозначение k -ой сростковой формы полезного минерала;
- x_1 – обозначение сростковой формы с максимальным содержанием полезного минерала;
- X – количество сростковых форм полезного минерала, выделенных в пробе;
- k – индекс сростковой формы полезного минерала, $1 \leq k \leq X$;
- β_k^p – весовое содержание k -ой сростковой формы полезного минерала в пробе;
- β_k^v – объемное содержание k -ой сростковой формы полезного минерала в пробе;
- g_i – обозначение i -го класса крупности частиц;
- G – количество классов крупности, выделенных в пробе;
- i – индекс класса крупности, $1 \leq i \leq M$;
- γ_{ik}^p – весовой выход ik -го класса крупности частиц в k -ой сростковой форме полезного минерала;
- γ_{ik}^v – объемный выход ik -го класса крупности частиц в k -ой сростковой форме полезного минерала;
- $-d_i$ – обозначение размера ячейки верхнего сита i -го класса крупности частиц;
- $+d_{i+1}$ – обозначение размера ячейки нижнего сита $i + 1$ -го класса

- крупности частиц;
- β_{jik}^p – весовое содержание jik -го минерала в i -м классе крупности частиц в k -ой сродковой форме полезного минерала;
- β_{jik}^v – объемное содержание jik -го минерала в i -м классе крупности частиц в k -ой сродковой форме полезного минерала;
- p_{ik} – обозначение ik -ой узкой сепарационной фракции;
- d_{eik} – эффективный диаметр частиц p_{ik} ;
- ρ_{ik} – плотность p_{ik} ;
- S_{jik} – доля поверхности частиц p_{ik} , приходящаяся на jik -ый минерал;
- α_{ik} – объемная доля p_{ik} в пробе;
- Ω_ξ – обозначение ξ -го оксида;
- Ω_1 – обозначение полезного компонента (оксида);
- E – полное количество различных оксидов, входящих в различных минералах в пробу;
- ξ – индекс оксида, $1 \leq \xi \leq E$;
- μ_ξ – молярная масса ξ -го оксида;
- M_j – молярная масса j -го минерала;
- a_j – первый коэффициент, используемый в разложении химической формулы j -го минерала на формулы оксидов, учитывающий кратность формулы;
- $b_{j\xi}$ – вторые коэффициенты разложения, показывающие сколько «молекул» того или иного оксида участвует в разложении химической формулы j -го минерала;
- $\beta_{j\xi}^p$ – весовое содержание ξ -го оксида в j -м минерале;
- β_ξ^p – весовое содержание ξ -го оксида в пробе;
- $\beta_{ik\xi}^p$ – весовое содержание ξ -го оксида в p_{ik} ;
- E_{sik} – поверхностная энергия частиц i -ой узкой сепарационной фракции.

Матрица УСФ может быть представлена в виде таблицы 1:

Таблица 1. Массовое содержание минералов пробы, входящих в сrostковые формы полезного минерала, по классам крупности

		g_1	g_i	g_G
		$-d_1 + d_2$	$-d_i + d_{i+1}$	$-d_G$
x_1	β_1^p	$\gamma_{11}^p[p_{11}]$	$\gamma_{i1}^p[p_{i1}]$	$\gamma_{G1}^p[p_{G1}]$
m_1	ρ_1	β_{111}^p	β_{i11}^p	β_{1G1}^p
m_j	ρ_j	β_{j11}^p	β_{ji1}^p	β_{jG1}^p
m_M	ρ_M	β_{M11}^p	β_{Mi1}^p	β_{MG1}^p
x_k	β_k^p	$\gamma_{1k}^p[p_{1k}]$	$\gamma_{ik}^p[p_{ik}]$	$\gamma_{Gk}^p[p_{Gk}]$
m_1	ρ_1	β_{11k}^p	β_{1ik}^p	β_{1Gk}^p
m_j	ρ_j	β_{j1k}^p	β_{jik}^p	β_{jGk}^p
m_M	ρ_M	β_{M1k}^p	β_{Mik}^p	β_{MGk}^p
x_X	β_X^p	$\gamma_{1X}^p[p_{1X}]$	$\gamma_{iX}^p[p_{iX}]$	$\gamma_{GX}^p[p_{GX}]$
m_1	ρ_1	β_{11X}^p	β_{1iX}^p	β_{1GX}^p
m_j	ρ_j	β_{j1X}^p	β_{jiX}^p	β_{jGX}^p
m_M	ρ_M	β_{M1X}^p	β_{MiX}^p	β_{MGX}^p

Валидация по таблице 1:

$$\sum_{k=1}^X \beta_k^p = 1. \quad \sum_{i=1}^G \gamma_{ik}^p = 1. \quad \sum_{j=1}^M \beta_{jik}^p = 1. \quad \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^G \beta_{jik}^p \gamma_{ik}^p = 1.$$

Поскольку при постановке вычислительного эксперимента нам потребуются объемные значения выходов классов крупности и содержаний минералов, произведем следующие преобразования и приведем их к виду таблицы 2.

Расчет объемного содержания j -го минерала в i -м классе крупности частиц в k -ой сrostковой форме полезного минерала:

$$\beta_{jik}^v = \frac{\beta_{jik}^p \gamma_{ik}^p}{\rho_j} \left(\sum_{j=1}^M \frac{\beta_{jik}^p \gamma_{ik}^p}{\rho_j} \right)^{-1}. \quad (29)$$

Расчет объемного выхода i -го класса крупности частиц в k -ой сродковой форме полезного минерала:

$$\gamma_{ik}^v = \sum_{j=1}^M \frac{\beta_{jik}^p \gamma_{ik}^p}{\rho_j} \left(\sum_{i=1}^G \sum_{j=1}^M \frac{\beta_{jik}^p \gamma_{ik}^p}{\rho_j} \right)^{-1}. \quad (30)$$

Расчет объемного содержания k -ой сродковой формы полезного минерала в пробе:

$$\beta_k^v = \left(\beta_k^p \sum_{i=1}^G \sum_{j=1}^M \frac{\beta_{jik}^p \gamma_{ik}^p}{\rho_j} \right) \left(\sum_{k=1}^X \left(\beta_k^p \sum_{i=1}^G \sum_{j=1}^M \frac{\beta_{jik}^p \gamma_{ik}^p}{\rho_j} \right) \right)^{-1}. \quad (31)$$

Таблица 2. Объемное содержание минералов пробы, входящих в сродковые формы полезного минерала, по классам крупности

		g_1	g_i	g_G
		$-d_1 + d_2$	$-d_i + d_{i+1}$	$-d_G$
x_1	β_1^v	$\gamma_{11}^v [p_{11}]$	$\gamma_{i1}^v [p_{i1}]$	$\gamma_{G1}^v [p_{G1}]$
m_1	ρ_1	β_{111}^v	β_{i11}^v	β_{1G1}^v
m_j	ρ_j	β_{j11}^v	β_{ji1}^v	β_{jG1}^v
m_M	ρ_M	β_{M11}^v	β_{Mi1}^v	β_{MG1}^v
x_k	β_k^v	$\gamma_{1k}^v [p_{1k}]$	$\gamma_{ik}^v [p_{ik}]$	$\gamma_{Gk}^v [p_{Gk}]$
m_1	ρ_1	β_{11k}^v	β_{i1k}^v	β_{1Gk}^v
m_j	ρ_j	β_{j1k}^v	β_{jik}^v	β_{jGk}^v
m_M	ρ_M	β_{M1k}^v	β_{Mik}^v	β_{MGk}^v
x_X	β_X^v	$\gamma_{1X}^v [p_{1X}]$	$\gamma_{iX}^v [p_{iX}]$	$\gamma_{GX}^v [p_{GX}]$
m_1	ρ_1	β_{11X}^v	β_{i1X}^v	β_{1GX}^v
m_j	ρ_j	β_{j1X}^v	β_{jiX}^v	β_{jGX}^v
m_M	ρ_M	β_{M1X}^v	β_{MiX}^v	β_{MGX}^v

Валидация по таблице 2:

$$\sum_{k=1}^X \beta_k^v = 1. \quad \sum_{i=1}^G \gamma_{ik}^v = 1. \quad \sum_{j=1}^M \beta_{jik}^v = 1. \quad \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^G \beta_{jik}^v \gamma_{ik}^v = 1.$$

Далее определим конечные значения величин свойств частиц, составляющих узкие сепарационные фракции.

В качестве конечного значения размера частиц (эффективный диаметр частиц ik -ой узкой сепарационной фракции), входящих в УСФ, примем математическое ожидание данной величины в соответствующем интервале крупности. Для получения функции распределения расположим объемные выходы классов и соответствующие им границы классов в порядке обратном тому, который определен в таблицах 1 и 2, с последующей нормировкой распределения. Результаты такого преобразования можно свести к табличному виду (Таблица 3) и представить графически в координатах [выход * границы классов]. (Графическое представление на конкретном примере рассмотрено в Главе 3.)

Таблица 3. Распределение размера частиц пробы в классах крупности

γ	0	γ_{Gk}^v	γ_{ik}^v	γ_{1k}^v
d	0	d_G	d_i	d_1
$\gamma_{\text{норм.}}$	1	$1 - \gamma_{Gk}^v$	$1 - \sum_i^G \gamma_{ik}^v$	0

В работе было установлено, что одним из наиболее соответствующих данному является распределение Валодди Вейбула

$$F(x) = 1 - \exp(-(x/\lambda)^k),$$

одна из форм которого – формула Розина-Раммлера используется в теории обогащения полезных ископаемых [87] и имеет вид:

$$F(d) = \exp(-bd^a), \quad (32)$$

где b и a – постоянные распределения, определяемые из дискретного распределения (Таблица 3).

Дифференцируя (32) по d , получим соответствующую функцию плотности распределения

$$f(d) = -bad^{a-1} \exp(-bd^a) \quad (33)$$

и перейдем к расчету математического ожидания:

$$M(d) = -ba \int_{d_{i+1}}^{d_i} d \cdot d^{a-1} \exp(-bd^a) dd \quad (34)$$

В (34) индексация пределов интегрирования приведена в том же порядке как и в таблицах 1 и 2. Преобразуем (34) к виду

$$M(d) = -ba \int_{d_{i+1}}^{d_i} d^a \exp(-bd^a) dd \quad \equiv \quad (35)$$

и введем подстановку:

$$t = bd^a. \quad dt = bad^{a-1} dd. \quad dd = \frac{dt}{bad^{a-1}}. \quad d = \frac{t^{\frac{1}{a}}}{b^{\frac{1}{a}}}.$$

$$\equiv -\frac{1}{\sqrt[a]{b}} \int_{bd_{i+1}^a}^{bd_i^a} t^{\left(\frac{1+a}{a}-1\right)} \exp(-t) dt.$$

Таким образом, получен интеграл Эйлера II рода, нахождение которого сводится к определению разности табулированных значений неполной нижней Гамма-функции [88, 89] по параметру

$$z = \frac{1+a}{a}.$$

Окончательно:

$$d_{eik} = -\frac{1}{\sqrt[a]{b}} \left(\int_0^{bd_i^a} t^{z-1} \exp(-t) dt - \int_0^{bd_{i+1}^a} t^{z-1} \exp(-t) dt \right). \quad (36)$$

Расчет плотности УСФ выполним по формуле

$$\rho_{ik} = \gamma_{ik}^p \left(\sum_{j=1}^M \frac{\beta_{jik}^p \gamma_{ik}^p}{\rho_j} \right)^{-1}. \quad (37)$$

Оценка доли поверхности частиц УСФ, приходящейся на каждый минерал, входящий в пробу, осуществляется исходя из соображений о кратности объемных и поверхностных единиц линейным размерам. Тогда для такой оценки используем соотношение

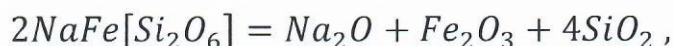
$$s_{jik} = \sqrt[3]{\beta_{jik}^v} \left(\sum_{j=1}^M \sqrt[3]{\beta_{jik}^v} \right)^{-1}. \quad \sum_{j=1}^M s_{jik} = 1. \quad (38)$$

Объемные доли УСФ в пробе определяются как

$$\alpha_{ik} = \beta_k^v \gamma_{ik}^v. \quad \sum_{k=1}^X \sum_{i=1}^G \alpha_{ik} = 1. \quad (39)$$

Процесс флотации направлен на повышение содержания того или иного минерала, содержащего полезный компонент, в концентрате. Полезным компонентом, таким образом, является не сам минерал, извлекаемый в концентрат, а один из составляющих его компонентов, как правило, – оксид [90].

Расчет содержания полезного компонента в отдельных минералах, в питании флотации в целом и в УСФ основан на том, что каждый минерал можно представить как набор оксидов. Например, для эгирина такой набор имеет вид:



для сфена:



для лампрофиллита:



и т.д., где для эгирина:

$$a_{\text{эгирина}} = 2; \quad b_1 = b_2 = 1; \quad b_3 = 4,$$

для сфена:

$$a_{\text{сфен}} = 1; \quad b_1 = b_2 = b_3 = 1,$$

для лампрофиллита:

$$a_{\text{лампрофиллит}} = 2; \quad b_1 = 4; \quad b_2 = 3; \quad b_3 = 6; \quad b_4 = 8; \quad b_5 = 1.$$

Прежде рассмотрим оксидный состав минералов и представим его в виде таблицы 4.

Таблица 4. Оксидный состав минералов по вторым коэффициентам разложения

		Ω_1	Ω_ξ	Ω_ε		
		μ_1	μ_ξ	μ_ε		
m_1	a_1	b_{11}	$b_{1\xi}$	$b_{1\varepsilon}$	M_1	
m_j	a_j	b_{j1}	$b_{j\xi}$	$b_{j\varepsilon}$	M_j	
m_M	a_M	b_{M1}	$b_{M\xi}$	$b_{M\varepsilon}$	M_M	

Очевидно, что

$$M_j = \frac{1}{a_j} \sum_{\xi=1}^{\varepsilon} b_{j\xi} \mu_\xi. \quad (40)$$

Тогда весовое содержание ξ -го оксида в j -ом минерале можно рассчитать по формуле

$$\beta_{j\xi}^p = \frac{b_{j\xi} \mu_\xi}{a_j M_j}, \quad (41)$$

а результаты расчетов свести к табличному виду (Таблица 5).

Таблица 5. Массовое содержание оксидов в минералах пробы

		Ω_1	Ω_ξ	Ω_ε
m_1		β_{11}^p	$\beta_{1\xi}^p$	$\beta_{1\varepsilon}^p$
m_j		β_{j1}^p	$\beta_{j\xi}^p$	$\beta_{j\varepsilon}^p$
m_M		β_{M1}^p	$\beta_{M\xi}^p$	$\beta_{M\varepsilon}^p$

Валидация по таблице 5:

$$\sum_{\xi=1}^{\varepsilon} \beta_{j\xi}^p = 1.$$

Весовое содержание ξ -го оксида в пробе рассчитаем по формуле

$$\beta_{\xi}^p = \sum_{j=1}^M \left(\beta_{j\xi}^p \sum_{k=1}^X \left(\beta_k^p \sum_{i=1}^G \beta_{jik}^p \gamma_{ik}^p \right) \right) \quad (42)$$

С одной стороны, полученное значение потребуется для дальнейших расчетов, с другой стороны, данная величина является показателем технологической схемы производственного цикла обогащения, т.е. представляет интерес и с точки зрения проводимых исследований, и с точки зрения верификации результатов вычислительного эксперимента.

Весовое содержание ξ -го оксида в p_{ik} рассчитаем по формуле

$$\beta_{ik\xi}^p = \sum_{j=1}^M \beta_{jik}^p \beta_{j\xi}^p. \quad (43)$$

Далее, используя (41), (42) и (52), произведем оценку поверхностной энергии частиц УСФ. Согласно работе П.В. Грушевицкого [91], для сложных по составу кристаллов, при определении их объемной энергии, ее можно оценить, разбивая формулу вещества на нейтральные группы (оксиды, атомы элементов), оценивая энергию каждой отдельно. Для таких расчетов потребуются значения соответствующих энергетических констант, которые являются табулированными и могут быть получены расчетным путем [92, 93].

$$E_{sik} = \sum_{j=1}^M \left(s_{jik} \left(\frac{2,67875 \rho_j}{\alpha_j M_j} \sum_{\xi=1}^{\varepsilon} \varepsilon_{k\xi} b_{j\xi} + 0,3052 \right) \right) \left[\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2} \right], \quad (44)$$

Таким образом для каждой УСФ (p_{ik}) могут быть получены следующие конечные значения величин свойств частиц их составляющих, которые, в свою очередь, могут быть интерпретируемы как условия однозначности математической модели процесса флотации: d_{eik} – эффективный диаметр; ρ_{ik} – плотность; α_{ik} – объемная доля p_{ik} в пробе; β_{ik1}^p – весовое содержание полезного компонента; E_{sik} – поверхностная энергия.

2.3. ВЫЯВЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФЛОТАЦИИ ОТ ПАРАМЕТРОВ АКТИВИРОВАННОЙ ВОДНОЙ ДИСПЕРСИИ ВОЗДУХА

Особенностями процесса флотации в активированной водной дисперсии воздуха является взаимодействие частиц минералов с пузырьками, полученными в результате их специальной подготовки. Процесс отличается возможностью подбора и регулировки свойств потоков питания и АДВ с обеспечением при каждой последующей флотации улучшения или стабилизации показателей разделения минералов.

Воздушная фаза в виде АДВ характеризуется диспергацией, наличием активированной поверхности, расходом и проявляет различные свойства, зависящие от природы и концентрации флотореагентов, рН среды, температуры, присутствия электролитов.

Твердая дисперсная фаза процесса флотации характеризуется крупностью, плотностью и растворимостью минералов, зарядом и гидратированностью поверхности их частиц, присутствием шламовых частиц, другими факторами. Интегральные свойства твердой фазы или ее отдельных компонентов могут меняться под воздействием различных физико-химических факторов. К ним относятся – тепловые, электрические, магнитные, акустические воздействия, изменение рН среды, добавки модификаторов и собирателей.

Выявление зависимости показателей флотации от параметров газожидкостной смеси необходимо для поддержания или регулировки условий подготовки и дозирования АДВ и управления потоком твердой дисперсной фазы. Рассматриваемый подход позволяет изучать изменение показателей флотации с изменением параметров газожидкостной смеси, включая величину адсорбции реагентов-собирателей на поверхности пузырьков воздуха, и параметров суспензии твердой дисперсной фазы.

Для исследований был использован флотационный аппарат, схема которого приведена на рисунке 3.

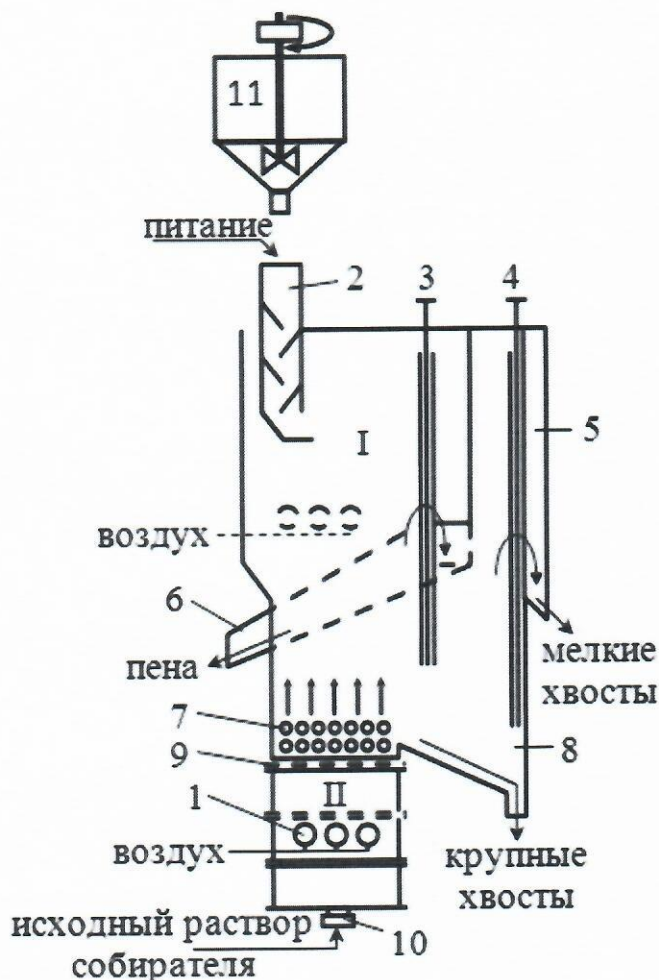


Рис. 3. Схема флотационного аппарата

I – рабочее отделение; II – подготовительное отделение:

- 1 – диспергатор воздуха; 2 – питатель; 3 – регулятор толщины пенного слоя; 4 – регулятор глубины камеры; 5, 6, 8 – разгрузочные устройства продуктов разделения; 7 – зернистый материал; 9 – перфорированная перегородка; 10 – штуцер; 11 – механический перемешиватель.

Флотационный аппарат состоит из двух отделений. Рабочее отделение служит для осуществления процесса флотации. Оно представляет собой камеру квадратного сечения с размерами 50*50*180 мм. Отделение оснащено приспособлениями для регулировки глубины камеры, толщины слоя пены и разгрузки продуктов разделения (пенного продукта, мелких и крупных частиц

хвостов). Глубина камеры может меняться от 50 до 120 мм. Регулятор (4) обеспечивает минимальное время контакта минеральных зерен с жидкой фазой активированной дисперсии, что обеспечивает оценку зависимости флотуируемости минералов от характеристик адсорбционных пленок пузырьков. Дно камеры выполнено в виде перфорированной перегородки, которая при необходимости может засыпаться неактивным зернистым материалом. Ячеистость перегородки подбирается так, что поток газожидкостной смеси пропускается вверх, а частицы твердого материала, оседающие на нее, сквозь перегородки не проходят. Приспособление (8) расположено так, что на уровне перегородки накопления твердого материала не происходит, и он отводится из рабочего объема камеры.

Второе отделение – подготовительное. Отделение состоит из разделяемых секций и может достигать высоты более полутора метров. Нижняя секция оснащена штуцером подачи исходного раствора собирателя. В отделении установлен диспергатор воздуха. Меняя положение секций, относительную высоту штуцера можно регулировать. Диспергатор представляет собой набор пористых трубок, соединенных между собой общим коллектором для приема и распределения поступающего в него газового потока.

Для загрузки питания в камеру аппарата служит питатель (2). Уровень питателя может меняться, что позволяет осуществлять подачу питания на пенный слой или непосредственно в объем пульпы.

Измельченная навеска при соотношении твердого и жидкости $1 \div 1 - 1 \div 1,5$ загружается в перемешиватель, где контактирует с регуляторами среды и модификаторами в течение 2 – 3 минут. Предварительно путем подбора диаметра выпускного отверстия задается время истечения обводненной навески (пульпы) из перемешивателя, которое поддерживается в диапазоне 1,5 – 3,0 минут.

В емкости исходного раствора готовится раствор собирателя с добавками регуляторов среды, концентрация которых задает необходимое значение рН.

Приготовленным раствором заполняют отделения аппарата и устанавливают постоянный расход раствора в диапазоне 100 – 300 мл/мин. Через ротаметр к диспергатору подают воздух в количестве 0,1 – 0,2 л/мин. После

установления динамического равновесия, определяемого по состоянию пенного слоя, разгрузочное отверстие перемешивателя открывают и пульпа через питатель поступает в камеру аппарата, где смешивается с водной дисперсией воздуха.

При контакте минеральных частиц с активированными пузырьками образуются селективные флотокомплексы, интенсивно всплывающие на поверхность пульпы и выводимые из процесса через устройство разгрузки пены. Несфлотированный материал выводится через устройства разгрузки мелких и крупных хвостов. Полученные продукты собираются и далее в осушенном и расклассифицированном виде могут быть подвергнуты необходимым анализам.

Такие опыты повторяются последовательно с изменением уровня диспергатора в подготовительном отделении. Изменение уровня диспергирования воздуха позволяет варьировать время нахождения пузырьков в растворе до поступления в камеру аппарата, что дает возможность изменять величину адсорбции флотореагентов на поверхности пузырьков.

Определив в каждом опыте выхода продуктов, содержания и извлечения разделяемых компонентов, можно судить о флотируемости минералов при различных режимах использования АВДВ.

Универсальность методики состоит в том, что она может быть использована для получения оценок флотируемости минералов и по принципу пенной сепарации и в комбинированном процессе, когда одновременно с пенной сепарацией происходит разделение минералов из объема пульпы. Для этого в камере аппарата с помощью регулятора толщины пенного слоя и регулятора глубины камеры фиксируют необходимый объем раствора и задают тем самым толщину пенного слоя. Диспергатор при этом монтируется непосредственно в камере аппарата. Размещение диспергатора в зоне перфорированной перегородки с сохранением объема пенного слоя и условий загрузки питания, позволяет применять методику для изучения флотируемости минералов в комбинированном процессе.

При заданной концентрации собирателя в исходном растворе, величина его адсорбции на границе раздела газ-жидкость зависит от времени пребывания

газовых пузырьков в объеме раствора. Данные об этой величине могут быть получены методом пенного фракционирования [94]. С этой целью флотационный аппарат заполняется раствором собирателя, диспергатор устанавливается в одном из крайних положений и в режиме, принятом в опытах при изучении флотуемости минералов (включая расход пульпы), через него в течение 7 – 10 минут пропускается воздух. Образующаяся пена удаляется через регулятор 3, а остаточный раствор – через регулятор 4. За последние 5 минут опыта пена отбирается в емкость для приема пены и сохраняется для анализа. Отдельно отбирается проба остаточного раствора. Не останавливая работы установки, опыты с пятиминутным отбором пены и пробы раствора повторяют при разных уровнях расположения диспергатора. Аналогичные эксперименты выполняются на растворах с различной концентрацией собирателя.

После разрушения отобранных пен их жидкая фаза с помощью фотоколориметра или других инструментальных методов анализируется на содержание собирателя. Для составления баланса количество собирателя определяется и в пробах остаточного раствора.

По результатам технологических опытов и опытов по фракционированию строятся кривые обогатимости и по ним судят о флотуемости минералов в ее зависимости от концентрации собирателя.

Важно, что получаемые значения концентраций собирателя в жидкой фазе пен не соответствуют количеству реагента, адсорбированного только на границе раздела газ-жидкость, а представляют величину, в которую входит количество собирателя, привлеченное в пену с жидкой фазой по каналам Плато и механическим путем. Поэтому подобная оценка носит ориентировочный характер и не отражает истинный характер зависимости флотуемости минеральных частиц от физико-химического состояния адсорбционных оболочек газовых пузырьков.

Величину поверхностной адсорбции собирателя (Γ [моль/см²]) на поверхности пузырьков можно определить из уравнения

$$CV = C_1V_1 + \frac{6V_2}{d_n} \cdot \Gamma \left[\frac{\text{моль}}{c} \right], \quad (45)$$

где $(d_n, \text{см})$ – средний диаметр пузырьков, зависящий от объемной скорости газового потока $(V_2, \text{см}^3/\text{с})$, типа диспергатора и концентрации исходного раствора $(C, \text{моль}/\text{см}^3)$; $(V, \text{см}^3/\text{с})$ – объемная скорость исходного раствора; C_1 и V_1 – соответствующие характеристики остаточного раствора.

Средний диаметр пузырька для каждого конкретного случая может быть получен фотографированием аэрированного раствора с последующей статистической обработкой данных. Исходя из [95, 96, 97], скорость подъема и время нахождения пузырьков в объеме раствора при различных уровнях расположения диспергатора в аппарате рассчитываются по формулам:

$$v = \frac{r^2 \Delta \rho g}{9\eta} \left[\frac{\text{см}}{c} \right], \quad (46)$$

$$\tau = \frac{h}{v} [c], \quad (47)$$

где $r, \text{см}$ – радиус пузырька; $\Delta \rho, \text{г}/\text{см}^3$ – разность плотностей жидкости и воздуха; $g, \text{см}/\text{с}^2$ – ускорение силы тяжести; $\eta, \text{г}/(\text{см} \cdot \text{с}) \equiv \text{пуаз}$ – вязкость жидкости; $h, \text{см}$ – уровень расположения диспергатора.

Поверхностная адсорбция Γ_t определяется за время нахождения пузырьков в подготовительном отделении аппарата, равном времени их прохождения через объем раствора от диспергатора до перфорированной перегородки, из уравнения кинетики адсорбции:

$$\frac{d\Gamma_t}{dt} = \beta C \left(1 - \frac{\Gamma_t}{\Gamma_{max}} \right) - \alpha \Gamma_t \left[\frac{\text{моль}}{\text{см}^2 \text{с}} \right], \quad (48)$$

где Γ_t – адсорбция в момент времени t ; Γ_{max} – предельная адсорбция; C – концентрация ПАВ в растворе; $\beta, \text{см}/\text{с}$ и $\alpha, \text{с}^{-1}$ – коэффициенты адсорбции и десорбции. Учитывая начальные условия $\Gamma_{t=0} = 0$, решение (48) имеет вид:

$$\frac{d\Gamma_t}{dt} = \frac{\beta C \Gamma_{max} - \beta C \Gamma_t - \alpha \Gamma_{max} \Gamma_t}{\Gamma_{max}}$$

$$\frac{d\Gamma_t}{\beta C \Gamma_{max} - (\beta C + \alpha \Gamma_{max}) \Gamma_t} = \frac{dt}{\Gamma_{max}}.$$

$$\frac{1}{\beta C + \alpha \Gamma_{max}} \int \frac{d\Gamma_t}{\frac{\beta C \Gamma_{max}}{\beta C + \alpha \Gamma_{max}} - \Gamma_t} = \frac{t}{\Gamma_{max}}.$$

$$\int \frac{d\Gamma_t}{\frac{\beta C \Gamma_{max}}{\beta C + \alpha \Gamma_{max}} - \Gamma_t} = \frac{t(\beta C + \alpha \Gamma_{max})}{\Gamma_{max}} = t \left(\frac{\beta C}{\Gamma_{max}} + \alpha \right).$$

$$\ln \left(A \left(\frac{\beta C}{\alpha + \frac{\beta C}{\Gamma_{max}}} - \Gamma_t \right) \right) = -t \left(\alpha + \frac{\beta C}{\Gamma_{max}} \right),$$

где A – постоянная интегрирования.

$$A \left(\frac{\beta C}{\alpha + \frac{\beta C}{\Gamma_{max}}} - \Gamma_t \right) = \exp \left(-t \left(\alpha + \frac{\beta C}{\Gamma_{max}} \right) \right);$$

$$A \Gamma_t = \frac{A \beta C}{\alpha + \frac{\beta C}{\Gamma_{max}}} - \exp \left(-t \left(\alpha + \frac{\beta C}{\Gamma_{max}} \right) \right).$$

Применив далее начальные условия, получим:

$$A = \frac{\alpha + \frac{\beta C}{\Gamma_{max}}}{\beta C}.$$

Тогда решением (48) является выражение

$$\Gamma_t = \frac{\beta C \left(1 - \exp \left(-t \left(\alpha + \frac{\beta C}{\Gamma_{max}} \right) \right) \right)}{\alpha + \frac{\beta C}{\Gamma_{max}}}.$$

Введя коэффициент изотермы Ленгмюра

$$b = \frac{\beta}{\alpha \Gamma_{max}},$$

окончательно получим

$$\Gamma_t = \frac{\Gamma_{max} b C (1 - \exp(-\alpha t (1 + b C)))}{1 + b C}. \quad (49)$$

В случае адсорбции ПАВ на движущемся пузырьке, Γ_{max} , α и b могут быть определены, руководствуясь работой [98], предложенной для расчета динамического поверхностного натяжения $\sigma_t, H/m$ растворов ПАВ. Согласно этой работе,

$$\sigma_t = \sigma_0 - A \ln \frac{1 + b C}{1 + b C \exp(-\alpha t (1 + C))}, \quad (50)$$

где $A = \Gamma_{max} RT$; σ_0 – поверхностное натяжение чистой воды.

Нахождение Γ_{max} , α и b может быть осуществлено эмпирически. Для двух различных концентраций ПАВ одним из доступных методов определяют равновесные значения σ_t и используют систему уравнений Шишковского относительно A и b :

$$\begin{cases} \sigma_{t1} = \sigma_0 - A \ln(1 + b C_1) \\ \sigma_{t2} = \sigma_0 - A \ln(1 + b C_2) \end{cases}. \quad (51)$$

Аналитическое решение данной системы уравнений позволяет определять значения переменных с заданной точностью и может быть найдено путем стандартного разложения логарифмической функции:

$$\ln(1 + x) = x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} - \dots + (-1)^{n-1} \frac{x^n}{n} + \dots$$

Следует обратить внимание, что данный способ решения требует выполнения условия:

$$-1 < b C_i \leq 1.$$

Найденные таким образом значения A и b , и соответствующие значения концентрации и времени могут быть подставлены в уравнение (50), откуда находится последняя неизвестная величина α .

Полученная зависимость $\Gamma_t(t)$ позволяет определять величины адсорбции ПАВ на поверхности газовых пузырьков, а по их численным значениям оценивать истинную зависимость флотуемости минералов от состояния адсорбционных оболочек газовых пузырьков, т.е. от физико-химической активности их поверхностного слоя.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

Предложен алгоритм оценки зависимости удельной площади и толщины адсорбционного слоя на границе раздела газ-жидкость в АВДВ, от концентрации гетерополярного ПАВ, позволяющий учитывать статистические величины размеров и форму пузырьков и определять значения констант условий однозначности взаимодействия фаз при моделировании флотации в вычислительном эксперименте. Алгоритм может быть применен в исследовательских и технологических целях для получения информации о распределении газовой фазы и степени готовности АВДВ в объеме ее приготовления и численных оценок адсорбции реагента на поверхности раздела газ-жидкость.

Разработан метод инициализации узких сепарационных фракций питания флотации для проведения вычислительного эксперимента над моделью гетерогенной среды процесса флотации. Метод предназначен для формулировки условий однозначности математической модели ГСПФ. Метод включает алгоритм обработки информации о составе пробы питания флотации, позволяющий конкретизировать условия решаемой в ходе вычислительного эксперимента задачи и представить его результаты в виде технологических показателей – выходов продуктов, содержания и извлечения как полезного компонента, так и

компонентов и минералов, составляющих пробу, что обеспечивает верификацию результатов эксперимента и его прогностическую функцию.

Рассмотрена методика, позволяющая выявлять зависимость показателей флотации от параметров газожидкостной смеси. Методика основана на применении флотационного аппарата, позволяющего варьировать как условия процесса флотации, так и условия приготовления и подачи АВДВ в объем пульпы. При рассмотрении методики акцентируется ее универсальность с точки зрения возможности проведения флотации в различных режимах пенной сепарацией с подачей пульпы на пенный слой, комбинированной флотацией с разделением минералов как в объеме пульпы, так и пенной сепарацией, флотацией в АВДВ. При рассмотрении методики уделено внимание аналитическому решению уравнения кинетики адсорбции.

**ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АКТИВИРОВАННОЙ ВОДНОЙ
ДИСПЕРСИИ ВОЗДУХА. ИНИЦИАЛИЗАЦИЯ УЗКИХ
СЕПАРАЦИОННЫХ ФРАКЦИЙ ПИТАНИЯ ФЛОТАЦИИ
И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ НАД МОДЕЛЬЮ
ГЕТЕРОГЕННОЙ СРЕДЫ ПРОЦЕССА ФЛОТАЦИИ**

**3.1. ОЦЕНКА ЗАВИСИМОСТИ УДЕЛЬНОЙ ПЛОЩАДИ
И ТОЛЩИНЫ АДсорбЦИОННОГО СЛОЯ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА
ГАЗ-ЖИДКОСТЬ В АКТИВИРОВАННОЙ ВОДНОЙ ДИСПЕРСИИ
ВОЗДУХА ОТ ВИДА И КОНЦЕНТРАЦИИ ГЕТЕРОПОЛЯРНОГО ПАВ**

Исследования зависимостей удельной площади поверхности раздела газовой и жидкой фаз и толщины адсорбционного слоя на поверхности пузырьков от вида и концентрации флотационного реагента в АВДВ проводились с использованием МДТМ (мыло дистиллированного таллового масла), ЖКТМ (жирные кислоты таллового масла), аэрофлота (соли дитиофосфорной кислоты) и олеиновой кислоты. Исходные растворы каждого реагента были приготовлены на дистиллированной воде с концентрациями 10, 15, 20 и 25 мг/л. Для исследований использовалась лабораторная установка, схема которой приведена в Главе 2 на рисунке 1.

При проведении опытов емкость (3) заполнялась исходным раствором реагента в количестве необходимом для того, чтобы заполнить колонку до верхнего уровня желоба стока пены (7) и обеспечить поступление исходного раствора в колонку в ходе опыта. Все опыты проводились при постоянных расходах исходного раствора реагента $Q_{\text{рст.}} = 1,50 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ и воздуха $Q_{\text{взд.}} =$

$5,56 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$. Расходы исходного раствора и воздуха контролировались ротаметрами 13 и 14. После установления стационарного распределения газовой фазы в растворе через желоб (7) в емкость (6) осуществлялся отбор пены и осуществлялось фотографирование зоны колонки с миллиметровой шкалой (8). Использование шкалы обеспечило обработку фотоснимков с учетом масштабирования изображения. Серия снимков каждого опыта (реагент/концентрация – итого 16 опытов) состояла из 10-15 снимков, из которых отбирались 5 наиболее информативных и контрастных (итого 80 снимков). На рисунке 4 приведены фрагменты образцов снимков диспергированной газовой фазы.

В ходе имидж-анализа линейные размеры пузырьков масштабировались в соответствии с делениями шкалы и отображаемыми размерами проекции снимка на дисплее компьютера. Полученные значения размеров полуосей фиксировались, а после обработки всего изображения рассчитывалось их среднее по выборке. Таким образом, для растворов каждого реагента с различными концентрациями были получены экспериментальные данные, включающие:

- q_1, q_2, q_3 – количества сплюснутых, вытянутых и сферических пузырьков в выборке имидж-анализа;
- a_1, b_1 – средние по выборке горизонтальные и вертикальные полуоси сплюснутых пузырьков;
- a_2, b_2 – средние по выборке горизонтальные и вертикальные полуоси вытянутых пузырьков;
- r – средний по выборке радиус сферических пузырьков;

На основе полученных результатов и алгоритма оценки зависимости удельной площади и толщины адсорбционного слоя на границе раздела газ-жидкость в АВДВ от концентрации гетерополярного ПАВ (Глава 2, 2.1), были получены аналитические зависимости удельной площади поверхности раздела газовой и жидкой фаз и толщины адсорбционного слоя на поверхности пузырьков от концентрации флотационных реагентов. Результаты опытов и расчетные данные представлены в таблице 6 и на рисунках 5 и 6.

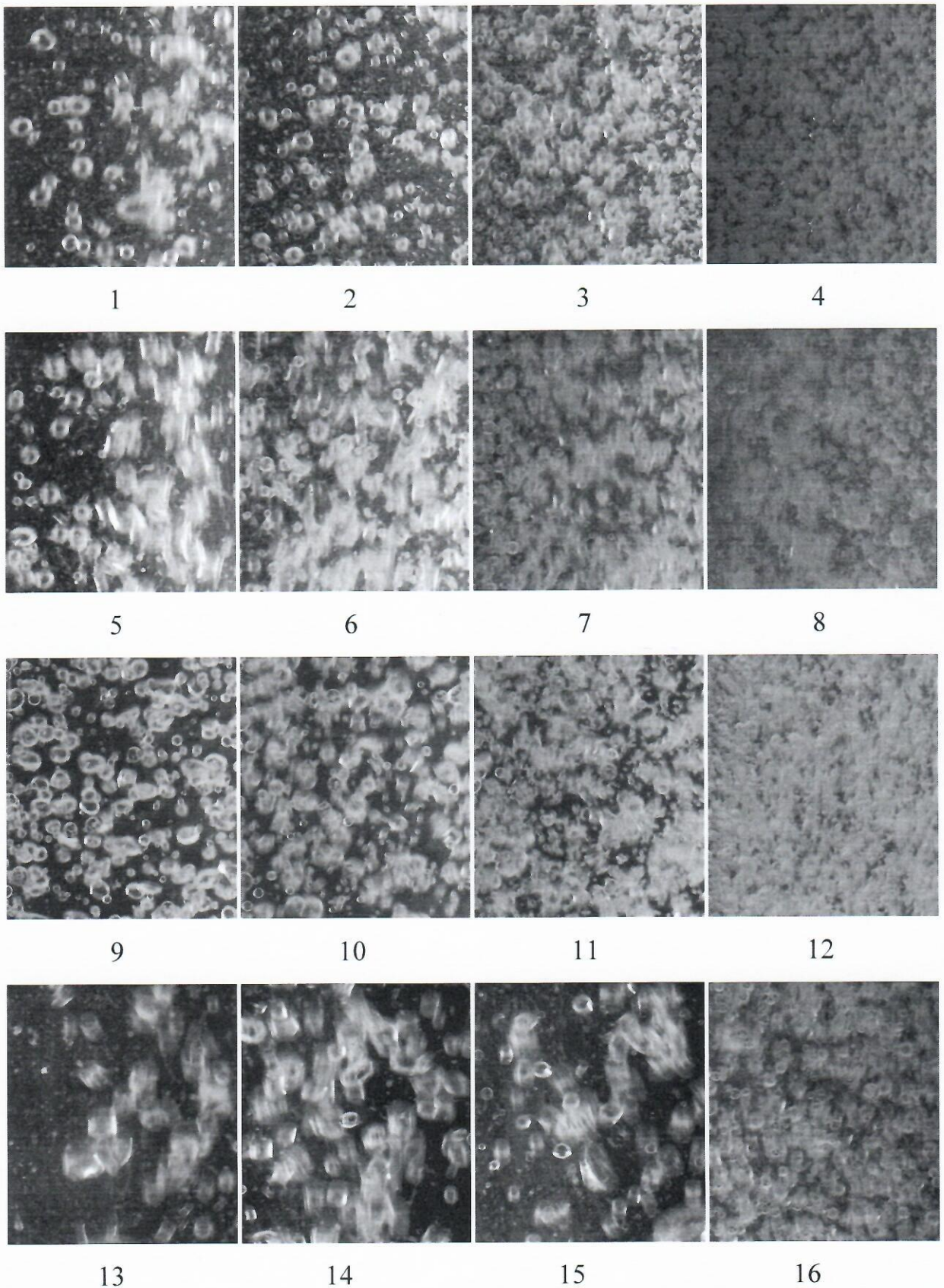


Рис. 4. – Фрагменты образцов снимков диспергированной газовой фазы
 1,2,3,4 – МДТМ; 5,6,7,8 – ЖКТМ; 9,10,11,12 – Аэрофлот; 13,14,15,16 – Олеиновая
 кислота при концентрациях соответственно 10,15,20,25 мг/л

Таблица 6. Результаты опытов по определению удельной площади поверхности раздела газовой и жидкой фаз и толщины адсорбционного слоя на поверхности пузырьков

№	Реагент	C_1 , мг/л	q_1	a_1 , м	b_1 , м	q_2	a_2 , м	b_2 , м	q_3	r , м	C_2 , мг/л	S'' , м ² /м ³	l , Å
1	МДТМ	10	35	0,0022	0,0014	53	0,0013	0,0025	12	0,0018	13	1411	4,6
2	МДТМ	15	41	0,0017	0,0011	48	0,0010	0,0018	11	0,0015	19	1783	4,8
3	МДТМ	20	42	0,0014	0,0010	48	0,0008	0,0016	10	0,0012	25	2129	5,1
4	МДТМ	25	44	0,0011	0,0008	49	0,0006	0,0012	7	0,0010	32	2705	5,6
5	ЖКТМ	10	40	0,0014	0,0012	52	0,0013	0,0016	8	0,0017	14	1688	5,1
6	ЖКТМ	15	37	0,0012	0,0009	47	0,0008	0,0013	16	0,0015	20	2074	5,2
7	ЖКТМ	20	40	0,0011	0,0007	51	0,0007	0,0012	9	0,0013	27	2539	5,9
8	ЖКТМ	25	36	0,0008	0,0006	46	0,0005	0,0009	18	0,0009	35	3285	6,5
9	Аэрофл.	10	43	0,0017	0,0013	48	0,0012	0,0018	9	0,0018	15	1588	6,7
10	Аэрофл.	15	43	0,0014	0,0011	54	0,0010	0,0015	3	0,0016	22	1942	7,7
11	Аэрофл.	20	39	0,0010	0,0008	51	0,0009	0,0012	10	0,0010	29	2464	7,8
12	Аэрофл.	25	44	0,0009	0,0007	50	0,0006	0,0010	6	0,0009	37	3082	8,4
13	Ол.кисл.	10	35	0,0017	0,0013	52	0,0016	0,0018	13	0,0016	14	1466	5,8
14	Ол.кисл.	15	44	0,0014	0,0011	49	0,0012	0,0016	7	0,0014	20	1817	5,9
15	Ол.кисл.	20	35	0,0012	0,0009	50	0,0008	0,0013	15	0,0012	27	2298	6,5
16	Ол.кисл.	25	40	0,0011	0,0007	47	0,0006	0,0010	13	0,0009	34	2843	6,8

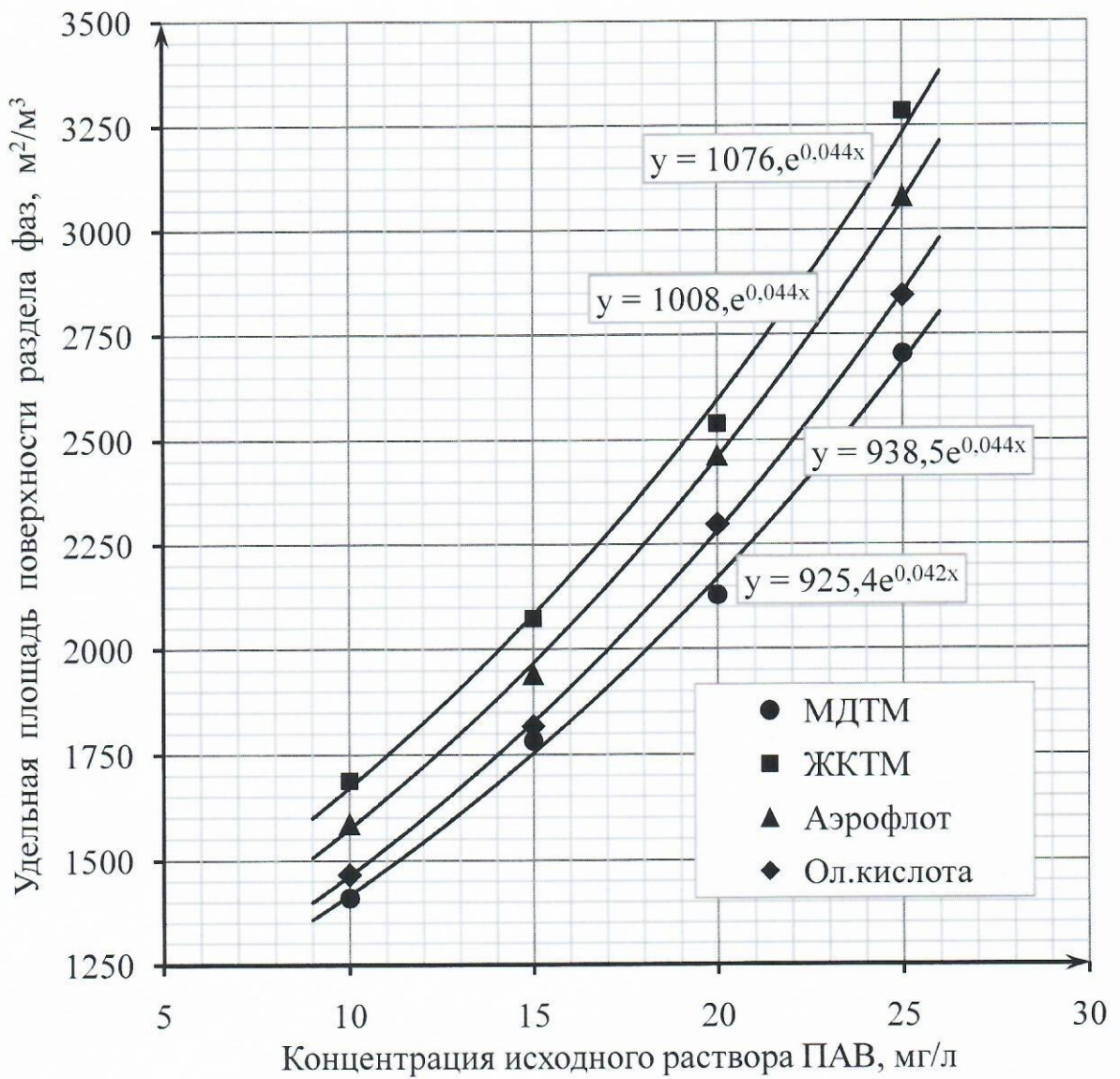


Рис. 5. – Зависимость удельной площади поверхности раздела газ-жидкость в АВДВ от концентрации ПАВ

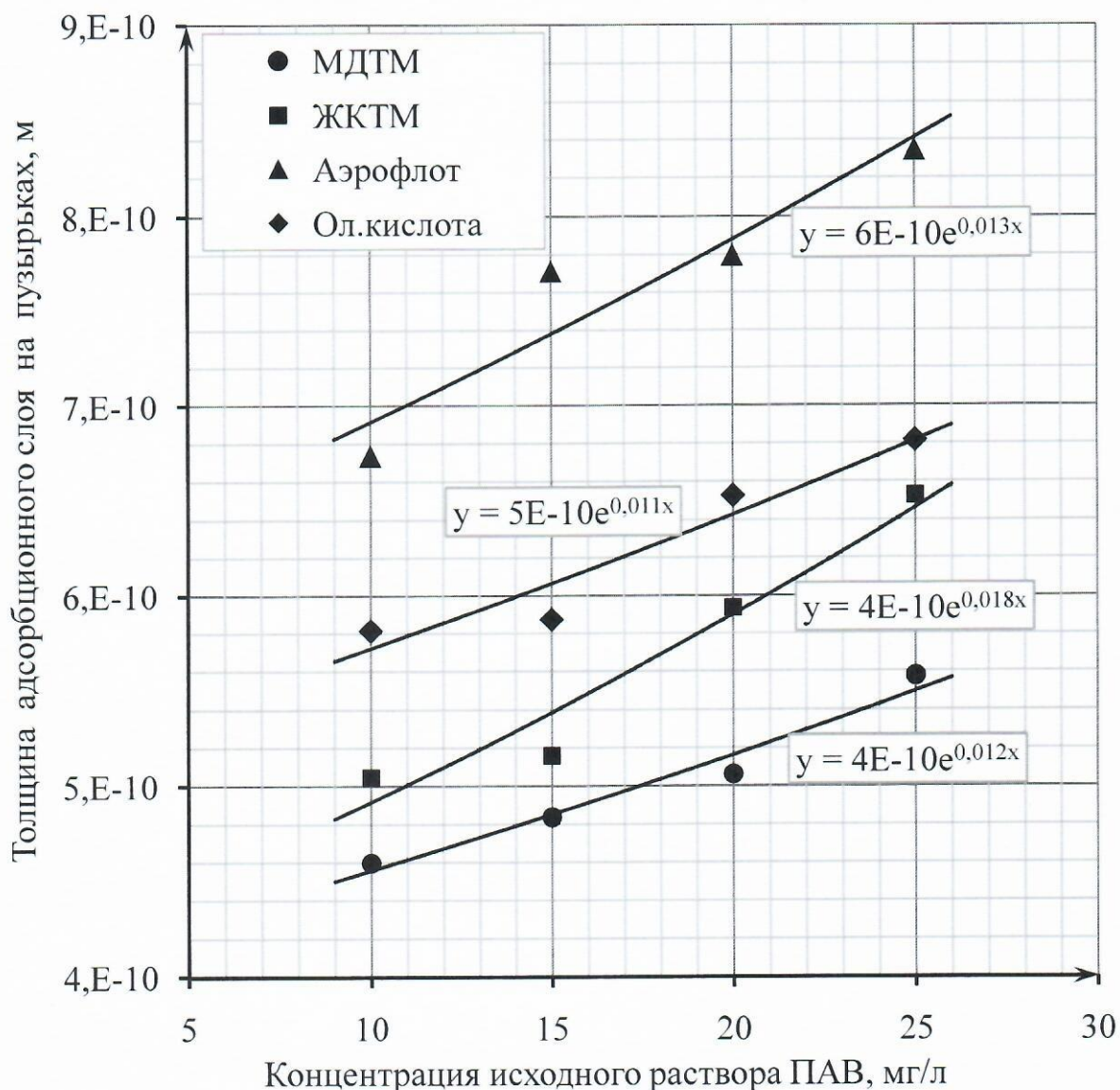


Рис. 6. – Зависимость толщины адсорбционного слоя на поверхности пузырьков в АВДВ от концентрации ПАВ

Установлено, что для всех используемых при проведении опытов реагентов данные зависимости носят экспоненциальный возрастающий характер. При этом ни в одном из опытов, о чем свидетельствует монотонность графиков, не были достигнуты значения критической концентрации мицеллообразования для используемых реагентов и значения предельной адсорбции реагентов на поверхности пузырьков. Полученные значения толщины адсорбционной пленки порядка 10^{-10} м свидетельствуют об образовании, по меньшей мере, мономолекулярного слоя реагента на поверхности пузырьков в АВДВ.

3.2. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ НАД МОДЕЛЬЮ ГЕТЕРОГЕННОЙ СРЕДЫ ПРОЦЕССА ФЛОТАЦИИ НА ОСНОВЕ ИНИЦИАЛИЗАЦИИ УЗКИХ СЕПАРАЦИОННЫХ ФРАКЦИЙ

(на примере модели ГСПФ хвостов апатитового производства при получении нефелинового концентрата)

3.2.1. Цель и задачи вычислительного эксперимента

В настоящее время одним из основных направлений исследования процессов разделения минералов, способствующих разработке нового сепарационного оборудования, является компьютерное моделирование, основанное на многоитерационных численных методах решения уравнений вычислительной гидродинамики. В частности, это направление широко представлено в работах сотрудников Горного института КНЦ РАН [99, 100, 101, 102 и др.].

Технологии компьютерного моделирования, позволяющие сократить издержки комплекса проектно-технологических работ и повысить степень верификации принимаемых конструкторских и инженерных решений, интегрированные в современные CAD/CAM/CAE системы, бурно развиваются. Темпы их развития отвечают темпам развития вычислительной техники.

Повышение уровня исследований процессов разделения минералов на основе применения методов вычислительной гидродинамики позволяет получить информацию, которая может быть использована для выработки качественно новых подходов к усовершенствованию и разработке обогатительного оборудования. Прежде всего, это закономерности движения выделенных УСФ и распределения их объемных концентраций, эффекты влияния сторонних силовых воздействий различной физической природы и интенсивности, а также переходных режимов работы обогатительного оборудования на потоки

дисперсных минеральных частиц, находящихся в исследуемой области сепарационного процесса.

Известные аналитические модели массопереноса в системах субстанциональных уравнений не учитывают особенности гидродинамики многофазных потоков в зонах сложной геометрии. Решение данной проблемы, и, в частности, для сепарационных процессов, происходящих в определенных пространственных и физических условиях, возможно с применением численных методов (например, метод конечных элементов) и развитой с середины прошлого столетия теории многофазного многоскоростного континуума (ММК).

Эффективным инструментом для моделирования гетерогенных сред с применением методов вычислительной гидродинамики является широко распространенный программный комплекс ANSYS Fluent. Это мощный решатель задач для объектов, представляющих собой области, в которых протекают гидродинамические и обменные процессы [103, 104].

Если разработчик модели воспринимает объект исследования как физическую среду с присущими ей свойствами и находящуюся в определенной связи с окружающей средой, то Fluent работает с геометрическим образом этой среды, разбитым на ограниченное множество элементарных объемов, объединенных в расчетную сетку модели. Точность и информативность вычислительного эксперимента во многом определяется дискретностью, качеством и структурой расчетной сетки. Таким образом, представление области пространства, где протекает сепарационный процесс, в виде системы с ограниченным числом степеней свободы, позволяет в ходе вычислительного эксперимента неограниченно приблизиться к характеристикам подобного натурального эксперимента. С другой стороны, задаваемая во Fluent формулировка условий однозначности модели и возможность экстраполировать текущие результаты расчета в значения технологических параметров обогащения, позволяют осуществлять, во-первых, верификацию модели и, во-вторых, прогнозирование развития моделируемого процесса.

Представляемый в работе вычислительный эксперимент над моделью ГСПФ хвостов апатитового производства при получении нефелинового концентрата имел целью демонстрацию возможности компьютерного моделирования процесса флотации в программном комплексе ANSYS Fluent на основе разработанного в рамках данной работы метода инициализации узких сепарационных фракций [105, 106, 107].

Вычислительный эксперимент был проведен на ПК с модификацией Intel(R) Core, 2.93 GHz, 8.00 ГБ, 64-ОС // Windows 7(max). Распараллеливание задачи – 8 ядер. Интервал итераций $5e-5 \text{ с}^{-1}$. Время процесса 600 секунд. Время расчета 2673 часа.

При подготовке и проведении эксперимента были поставлены и решались следующие задачи:

1. Построение геометрического образа рабочего объема камеры флотационной пневмомеханической машины ОК-38 в сеточном генераторе Gambit с последующим созданием расчетной сетки модели на основе технической документации компании Outokumpu (Финляндия). Дополнительным условием создания расчетной сетки явилось использование технологии сопряжено движущихся подобластей Dynamic Mesh.
2. Отбор пробы и инициализация узких сепарационных фракций питания основной нефелиновой флотации на основе результатов гранулометрического и минералогического анализов, а также анализа сростковых фаз питания моделируемого процесса.
3. Изучение баланса потоков основной нефелиновой флотации и расчет базовых параметров качественно-количественных показателей CFD модели ГСПФ в первой камере технологической схемы процесса с учетом результатов анализа пробы.
4. Постановка и проведение вычислительного эксперимента.
5. Обработка полученной в ходе эксперимента числовой и графической информации.

3.2.2. Геометрический образ рабочего объема камеры флотационной машины ОК-38 и расчетная сетка модели

В основной нефелиновой флотации полезный компонент извлекается в камерный продукт, а в пенный продукт извлекаются апатит и темноцветные минералы. Эта операция в АО «Апатит» осуществляется в двухкамерных флотационных машинах ОК-38 производства компании Outokumpu (Финляндия), соединенных по три в две параллельные технологические линии, расположенные на спадающих по ходу пульпы уровнях.

Конструктивные элементы камеры флотационной машины ОК-38 показаны на рисунке 7.

Геометрический образ модели камеры флотационной машины ОК-38 создан с использованием сеточного генератора Gambit и включает в себя область пульпы до нижнего уровня захвата пеноъемных механизмов, области пульпы в зонах люка загрузки пульпы и люка выгрузки камерного продукта, область импеллера и область статора. Основой создания геометрического образа камеры флотационной машины явилась конструкторская документация, разработанная компанией Outokumpu.

ОК-38 относится к флотационным машинам с U - образной компоновкой камеры, имеющей рабочий объем $38,1 \text{ м}^3$. Соотношение размеров высоты, длины и ширины камеры соответственно 3,6 / 3,6 / 3,2 м. Диаметр несущего диска импеллера 0,9 м. Скорость вращения импеллера 150 об/мин. Давление воздушной магистрали машины 4,8 бар. Соотношение размеров внешнего диаметра, внутреннего диаметра и высоты статора соответственно 1,51 / 1,05 / 0,84 м при числе ребер равном 24.

Емкость расчетной сетки конечных элементов модели соответственно для подвижной области импеллера 99109 ячеек, а для неподвижной области статора и камеры 397166 ячеек. В обоих случаях ячейки имеют тетрагональную форму. Подвижная и неподвижная области расчетной сетки имеют общую внутреннюю «стенку», состоящую из мнимых граничных поверхностей, не препятствующих движению потоков массы и распределению количества движения и энергии. Это

позволяет эмулировать вращение области импеллера, которая воспринимается ANSYS Fluent как замкнутая область ячеек сетки, избегая пространственного перекрытия и деформации расчетной сетки. Изображение осевой проекции элементов расчетной сетки модели показано в виде скриншота интерфейса сеточного генератора Gambit на рисунке 8.

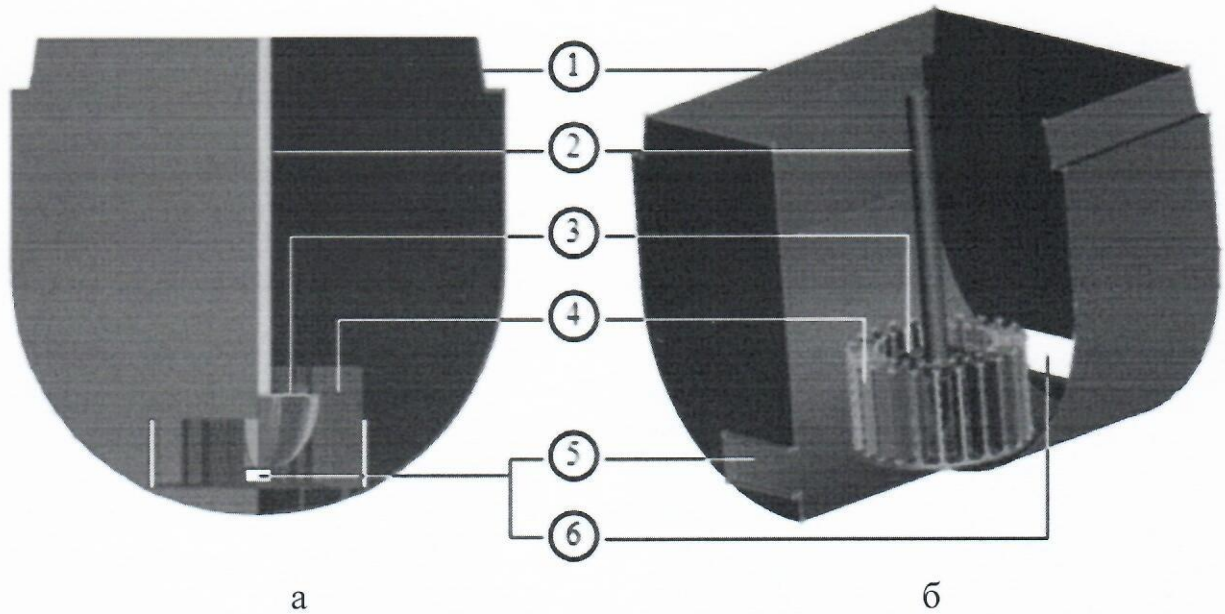


Рис.7. – Конструктивные элементы камеры флотационной машины ОК-38
 а) фронтальная и б) изометрическая проекция. 1 - камера; 2 - вал импеллера; 3 - импеллер; 4 - статор; 5 - люк пульпы; 6 - люк камерного продукта

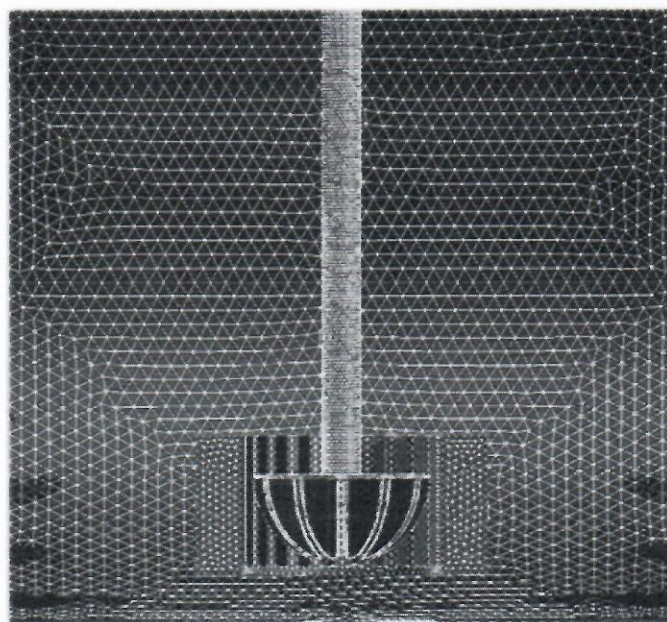


Рис.8. – Осевая проекция элементов расчетной сетки модели

3.2.3. Проба питания и инициализация узких сепарационных фракций питания основной нефелиновой флотации на основе результатов гранулометрического и минералогического анализов, а также анализа сростковых фаз питания моделируемого процесса

Точкой отбора пробы явился операционный перелив коллектора магнитной сепарации хвостов апатитовой флотации в АО "Апатит", прошедших двухстадиальную классификацию.

На рисунках 9 и 10 показаны общий вид пробы питания нефелиновой флотации, отобранной в условиях производства нефелинового концентрата в АО "Апатит", до разделения на классы крупности и виды двух из пяти выделенных классов крупности, а также сростковые формы нефелина в классификации по содержанию других минеральных фаз.

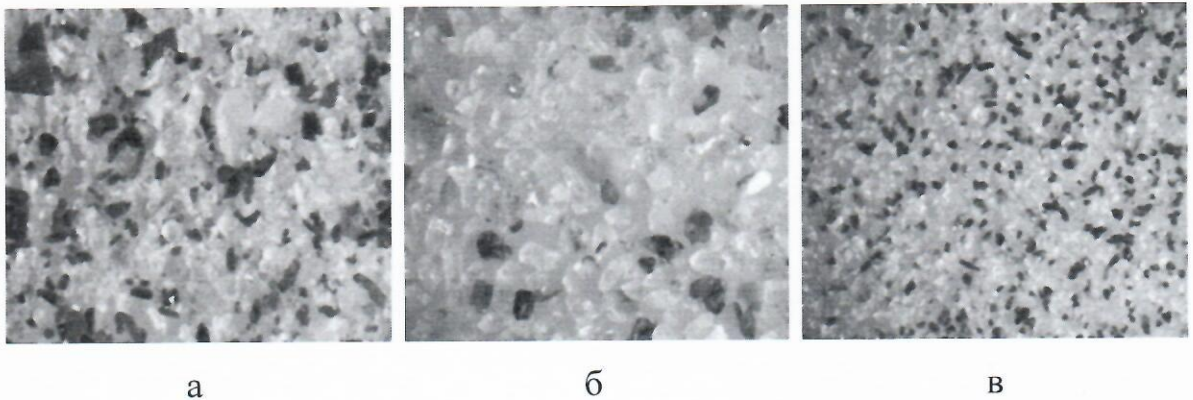


Рис. 9. а) – Общий вид пробы до разделения на классы крупности; б) – Зерно пробы класса $-0,315+0,2$ мм; в) – Зерно пробы класса $-0,1+0,071$ мм

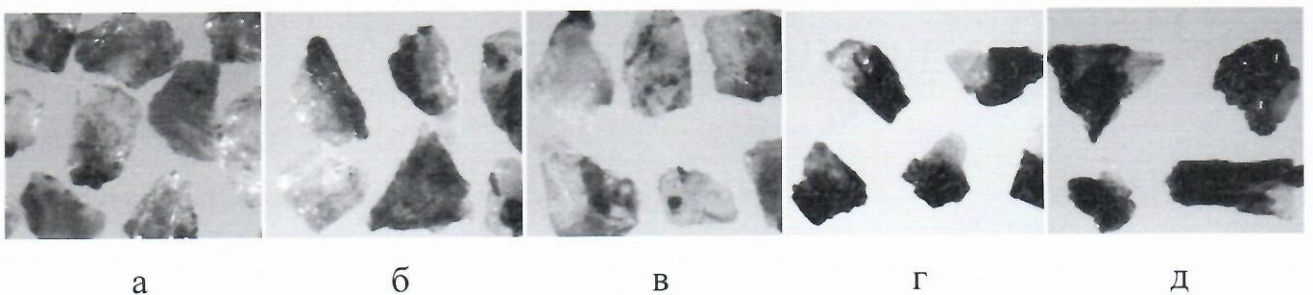


Рис. 10. Сростковые формы нефелина в классификации по содержанию x других минеральных фаз
 а) Раскрытые зерна $0 < x < 5\%$; б) Бедные зерна $5 < x < 25\%$;
 в) Средние зерна $25 < x < 55\%$; г) Богатые зерна $55 < x < 75\%$;
 д) Очень богатые зерна $75 < x < 95\%$

В таблице 7 приведен массовый гранулометрический и минеральный состав пробы питания основной нефелиновой флотации. В таблице 8 приведен массовый минерально-фазовый состав нефелина в этой же пробе [85].

Таблица 7. Гранулометрический и минеральный состав пробы питания основной нефелиновой флотации (массовый)

Минерал пробы	Класс (мм) / Выход (мас.доля)					Итого:
	-0,315+0,2	-0,2+0,16	-0,16+0,1	-0,1+0,071	-0,071	
	0,0998	0,1193	0,3072	0,1758	0,2979	
Нефелин	0,730	0,730	0,665	0,590	0,520	0,6229
Эгирин	0,050	0,080	0,164	0,212	0,267	0,1817
П/шпат	0,160	0,131	0,094	0,090	0,065	0,0957
Сфен	0,002	0,006	0,025	0,028	0,035	0,0239
Апатит	0,024	0,020	0,011	0,009	0,011	0,0130
Слюды	0,010	0,008	0,013	0,020	0,025	0,0169
Гидрослюды	0,007	0,010	0,009	0,011	0,013	0,0105
Ильменит	0,000	0,002	0,005	0,015	0,020	0,0104
Лампрофиллит	0,004	0,002	0,003	0,012	0,017	0,0087
Цеолиты	0,008	0,005	0,005	0,004	0,010	0,0066
Титаномагнетит	0,000	0,000	0,001	0,003	0,011	0,0041
Гидроокислы железа	0,005	0,006	0,004	0,003	0,003	0,0039
Энигматит	0,000	0,000	0,001	0,003	0,003	0,0017
Итого:	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,0000

Таблица 8. Минерально-фазовый состав нефелина в пробе питания основной нефелиновой флотации (массовый)

Сростковые формы нефелина в классификации по содержанию x других минеральных фаз	Класс (мм) / Выход (мас.доля)					Итого:
	-0,315+0,2	-0,2+0,16	-0,16+0,1	-0,1+0,071	-0,071	
	0,0998	0,1193	0,3072	0,1758	0,2979	
$0 < x < 5\%$	0,577	0,606	0,612	0,555	0,515	0,5689
$5 < x < 25\%$	0,101	0,076	0,030	0,022	0,003	0,0331
$25 < x < 55\%$	0,038	0,039	0,017	0,013	0,002	0,0165
$55 < x < 75\%$	0,007	0,006	0,003	0,000	0,000	0,0023
$75 < x < 100\%$	0,007	0,003	0,003	0,000	0,000	0,0020
Итого:	0,730	0,730	0,665	0,590	0,520	0,6229

Для численной характеристики раскрытия минеральных фаз использовались следующие понятия и градации:

- *свободные, или раскрытые зерна или фазы* – частицы, которые визуально определяются как нефелин, не содержат включений других минеральных фаз, либо доля (x) таких фаз занимает не более 5 % объема зерна ($0 < x < 5 \%$);
- *бедные сростки* – частицы нефелина, в которых доля другого минерала составляет от 5 до 25 % объема зерна ($5 < x < 25 \%$);
- *средние сростки* – частицы нефелина, в которых доля другого минерала составляет от 25 до 55 % объема зерна ($25 < x < 55 \%$);
- *богатые сростки* – частицы нефелина, в которых доля другого минерала составляет от 55 до 75 % объема зерна ($55 < x < 75 \%$);
- *очень богатые сростки* – частицы нефелина, в которых доля другого минерала составляет более 75 %.

В сростках выделяются:

- *бинарные сростки*, состоящие из двух (или преимущественно из двух) минералов, где наиболее часто встречаются такие как нефелин и эгирин, нефелин и полевой шпат, нефелин и слюды;
- *полиминеральные сростки* – трехкомпонентные сростки, состоящие из трех минералов – обычно это нефелин-эгириновые сростки с примесью полевого шпата.

Доля бинарных сростков в пробе составляет – 85 %, полиминеральных – 15 %. Среди бинарных сростков: 65 % – нефелин-эгириновые, 15 % – нефелин-полевошпатовые, 5 % – нефелин-слюдяные.

Таким образом, анализ пробы показал присутствие в ней тринадцати минералов, распределенных в пяти классах крупности. При этом удалось выделить пять сростковых форм полезного минерала - нефелина, в классификации по содержанию других минеральных фаз.

В целях эксперимента, используя формулы 29 и 30, данные из таблиц 7 и 8 были приведены к "объемному" виду (Таблица 9, Таблица 10).

Таблица 9. Гранулометрический и минеральный состав пробы питания основной нефелиновой флотации (объемный)

Минерал пробы	Класс (мм) / Выход (об.доля)					Итого:
	-0,315+0,2	-0,2+0,16	-0,16+0,1	-0,1+0,071	-0,071	
	0,1045	0,1239	0,3105	0,1738	0,2873	
Нефелин	0,746	0,752	0,704	0,639	0,577	0,6664
Эгирин	0,038	0,062	0,130	0,172	0,222	0,1458
П/шпат	0,162	0,134	0,099	0,097	0,072	0,1016
Сфен	0,002	0,005	0,020	0,023	0,029	0,0192
Апатит	0,020	0,016	0,009	0,008	0,010	0,0111
Слюды	0,009	0,007	0,012	0,019	0,025	0,0162
Гидрослюды	0,008	0,011	0,010	0,013	0,016	0,0121
Ильменит	0,000	0,001	0,003	0,009	0,012	0,0061
Лампрофиллит	0,003	0,002	0,002	0,010	0,014	0,0071
Цеолиты	0,010	0,006	0,006	0,005	0,013	0,0082
Титаномагнетит	0,000	0,000	0,001	0,002	0,006	0,0023
Гидроокислы железа	0,003	0,004	0,003	0,002	0,002	0,0025
Энигматит	0,000	0,000	0,001	0,002	0,002	0,0013
Итого:	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,0000

При расчете здесь и далее использованы следующие значения плотностей минералов (г/см^3): Нефелин - 2,625; Эгирин - 3,500; Полевой шпат - 2,645; Сфен - 3,500; Апатит - 3,300; Слюды - 2,930; Гидрослюды - 2,427; Ильменит - 4,750; Лампрофиллит - 3,470; Цеолиты - 2,255; Титаномагнетит - 5,050; Гидроокислы железа - 4,260; Энигматит - 3,790.

Таблица 10. Минерально-фазовый состав нефелина в пробе питания основной нефелиновой флотации (объемный)

Сростковые формы нефелина в классификации по содержанию x других минеральных фаз	Класс (мм) / Выход (об.доля)					Итого:
	-0,315+0,2	-0,2+0,16	-0,16+0,1	-0,1+0,071	-0,071	
	0,1045	0,1239	0,3105	0,1738	0,2873	
$0 < x < 5\%$	0,589	0,624	0,648	0,601	0,571	0,6087
$5 < x < 25\%$	0,103	0,078	0,032	0,024	0,003	0,0354
$25 < x < 55\%$	0,039	0,040	0,018	0,014	0,002	0,0177
$55 < x < 75\%$	0,007	0,006	0,003	0,000	0,000	0,0025
$75 < x < 100\%$	0,007	0,003	0,003	0,000	0,000	0,0021
Итого:	0,746	0,752	0,704	0,639	0,577	0,6664

В дополнение к этому произведен расчет конечных значений размера частиц узких сепарационных фракций. Для этого объемные выходы классов крупности и границы классов были расположены в порядке обратном тому, который определен в таблицах 7, 8, 9 и 10, проведена нормировка дискретного распределения и подобраны параметры непрерывного распределения, точечные оценки которого также приведены в таблице 11.

Таблица 11. Распределение размера частиц пробы в классах крупности

γ (об.доля)	0,0000	0,2873	0,1738	0,3105	0,1239	0,1045
d (мм)	0	0,071	0,100	0,160	0,200	0,315
$\gamma_{\text{норм.}}$	1,0000	0,7127	0,5389	0,2284	0,1045	0,0000
<p>Функция распределения имеет вид:</p> $F(d) = e^{-bd^a}.$ <p>В нашем случае подобраны параметры распределения:</p> $b = 50, \quad a = 1,92.$						
Точечные оценки $F(d)$	1,0000	0,7324	0,5482	0,2272	0,1028	0,0043
Отклонения точечных оценок	0,00%	2,69%	1,69%	0,55%	1,66%	100,00%

Плотность распределения:

$$f(d) = \frac{dF(d)}{dd} = e^{-bd^a}(-bad^{a-1}) = -bae^{-bd^a}d^{a-1}.$$

Математическое ожидание с учетом нормировки исходного дискретного распределения:

$$M(d) = d_{\max} - \int_0^{\infty} df(d)dd = d_{\max} - ba \int_0^{\infty} e^{-bd^a} d^a dd,$$

где $d_{\max} = 0,315$.

Введена подстановка:

$$t = bd^a; \quad dt = bad^{a-1}dd; \quad d = \left(\frac{t}{b}\right)^{\frac{1}{a}}; \quad dd = \frac{dt}{ba \left(\frac{t}{b}\right)^{\frac{a-1}{a}}}.$$

Тогда

$$M(d) = d_{max} - ba \int_0^{\infty} e^{-t} \frac{t}{b} \cdot \frac{dt}{ba \left(\frac{t}{b}\right)^{\frac{a-1}{a}}} = d_{max} - \int_0^{\infty} e^{-t} \left(\frac{t}{b}\right)^{1-\frac{a-1}{a}} dt =$$

$$= d_{max} - \frac{1}{\sqrt[a]{b}} \int_0^{\infty} e^{-t} t^{\frac{1}{a}} dt.$$

Введен новый параметр

$$\alpha = \frac{1}{a} + 1 = \frac{a+1}{a}.$$

Тогда

$$\frac{1}{a} = \alpha - 1; \quad \alpha = \frac{1,92 + 1}{1,92} \approx 1,520833.$$

С учетом введенного параметра

$$M(d) = d_{max} - \frac{1}{\sqrt[a]{b}} \int_0^{\infty} e^{-t} t^{\alpha-1} dt = \frac{\Gamma(\alpha)}{\sqrt[a]{b}}.$$

$$\Gamma(1,520833) = 0,887080.$$

$$M(d)|_0^{\infty} = 0,315 - \frac{0,887080}{\sqrt[1,92]{50}} = 0,199.$$

Таким образом, математическое ожидание величины эффективного размера минеральных зерен на всем диапазоне крупности пробы равно 0,199 мм.

Для нахождения математического ожидания на интервалах, заданных границами классов крупности

$$M(d)|_0^{d_i} = d_i - \frac{\gamma(\alpha, d_i)}{\sqrt[a]{b}},$$

найдем нижнюю неполную Гамма - функцию по параметрам:

$$\alpha = 1,520833;$$

$$d_1 = 0,071, \quad d_2 = 0,1, \quad d_3 = 0,16, \quad d_4 = 0,2, \quad d_5 = 0,315.$$

Для этого воспользуемся простейшим разложением в ряд:

$$\gamma(\alpha, d) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n d^{n+\alpha}}{(\alpha+n)n!}$$

Вычисление такого ряда, при заданных d_i , требует не более шести итераций и легко реализуется, например, в редакторе MS Excel.

В итоге получены следующие значения математического ожидания величин эффективного размера минеральных зерен на всем диапазоне крупности пробы

$$M(d)|_0^{0,017} = 0,071 - \frac{0,0112809}{1,92\sqrt{50}} = 0,070 ;$$

$$M(d)|_0^{0,100} = 0,100 - \frac{0,0186652}{1,92\sqrt{50}} = 0,098 ;$$

$$M(d)|_0^{0,160} = 0,160 - \frac{0,0368108}{1,92\sqrt{50}} = 0,155 ;$$

$$M(d)|_0^{0,200} = 0,200 - \frac{0,0504769}{1,92\sqrt{50}} = 0,193 ;$$

$$M(d)|_0^{0,315} = 0,315 - \frac{0,0941621}{1,92\sqrt{50}} = 0,303 .$$

Графическая интерпретация результата приведенного расчета представлена на рисунке 11.

Аналогично, расчет конечных значений величины содержания x других минеральных фаз, входящих в сростковые формы нефелина был произведен после следующих преобразований данных из таблиц 9 и 10.

Исходя из имеющихся вычислительных и временных ресурсов планируемого эксперимента, размер матрицы УСФ был определен как 3*3. Поэтому данные, приведенные в таблицах 9 и 10, путем использования известных балансовых соотношений были следующим образом преобразованы:

- Объединены классы крупности $-0,315+0,2$ и $-0,2+0,16$, а также классы $-0,1+0,071$ и $-0,071$. Критерием объединения послужило то, что по сравнению с классом $-0,16+0,1$, их общий выход составляет порядка 2/3 от массы пробы (Таблица 12). При этом конечное значение размера частиц (эффективный размер частиц -ой узкой сепарационной фракции) было

определено как средневзвешенное из значений соответствующих математических ожиданий размера частиц пробы в классах крупности:

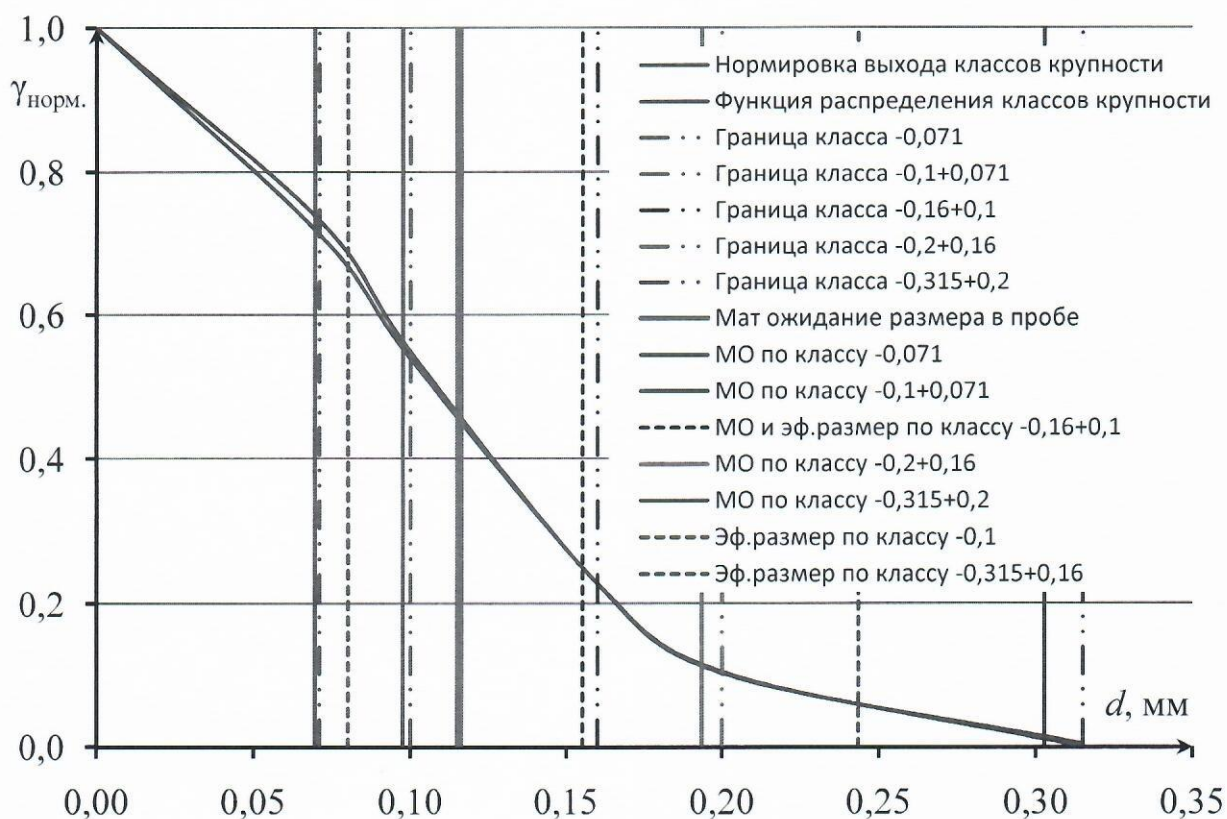


Рис. 11. Графическая интерпретация результата расчета математического ожидания размера частиц пробы в классах крупности

$$d_{e1} = \frac{\gamma_1^v M(d)|_0^{0,315} + \gamma_2^v M(d)|_0^{0,200}}{\gamma_1^v + \gamma_2^v} = 0,243 .$$

$$d_{e2} = M(d)|_0^{0,160} = 0,155 .$$

$$d_{e3} = \frac{\gamma_4^v M(d)|_0^{0,100} + \gamma_5^v M(d)|_0^{0,071}}{\gamma_4^v + \gamma_5^v} = 0,080 .$$

- Произведен расчет конечных значений величины содержания x других минеральных фаз, входящих в сростковые формы нефелина. Расчет производился, исходя из проведенного объединения классов крупности, для каждого из трех определенных размеров частиц. При этом было

установлено, что в каждом случае функция распределения имеет один и тот же простейший вид

$$F(x) = x^c,$$

где c - параметр распределения, равный, соответственно для классов с размерами частиц 0,243 мм; 0,155 мм; 0,080 мм, – 0,065; 0,029; 0,011.

Таблица 12. Гранулометрический и минеральный состав пробы питания основной нефелиновой флотации (объемный, преобразованный вид)

Минерал пробы	Размер частиц (мм) / Выход (об.доля)			Итого: (контроль)
	0,243	0,155	0,080	
	0,2284	0,3105	0,4611	
Нефелин	0,749	0,704	0,600	0,6664
Эгирин	0,051	0,130	0,203	0,1458
П/шпат	0,147	0,099	0,081	0,1016
Сфен	0,003	0,020	0,027	0,0192
Апатит	0,018	0,009	0,009	0,0111
Слюды	0,008	0,012	0,023	0,0162
Гидрослюды	0,010	0,010	0,015	0,0121
Ильменит	0,001	0,003	0,011	0,0061
Лампрофиллит	0,002	0,002	0,013	0,0071
Цеолиты	0,008	0,006	0,010	0,0082
Титаномагнетит	0,000	0,001	0,005	0,0023
Гидроокислы железа	0,004	0,003	0,002	0,0025
Энигматит	0,000	0,001	0,002	0,0013
Итого:	1,000	1,000	1,000	1,0000

Для примера графическая интерпретация дискретного и непрерывного распределения содержания x других минеральных фаз, входящих в сростковые формы нефелина по его содержанию в классе с размерами частиц 0,155 мм представлена на рисунке 12.

- Объединены сростковые формы нефелина в классификации по содержанию x других минеральных фаз $5 < x < 25\%$ и $25 < x < 55\%$, а также формы $55 < x < 75\%$ и $75 < x < 100$. Критерием объединения послужило то, что их парные выходы на порядок и на два порядка соответственно меньше выхода формы ($0 < x < 5\%$) (Таблица 13).

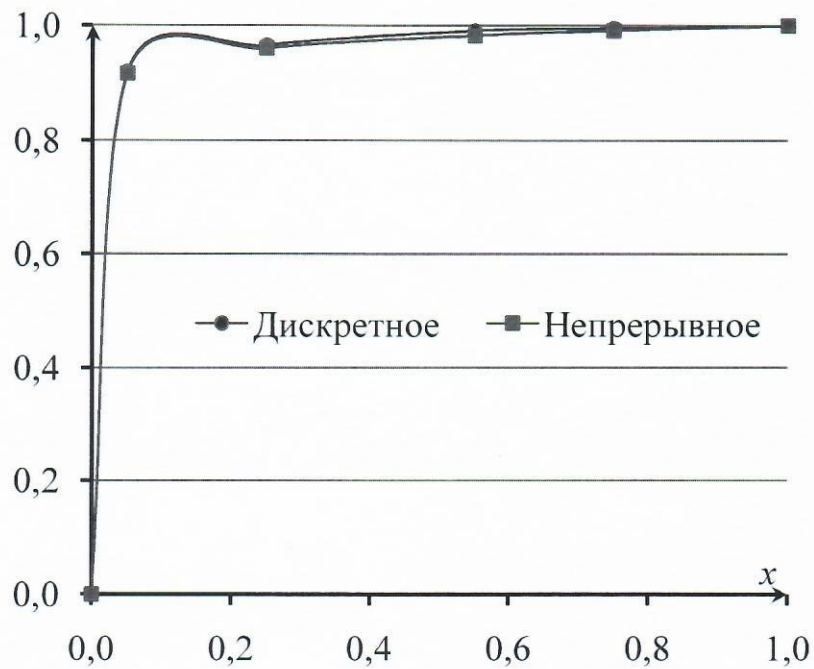


Рис. 12. Графическая интерпретация дискретного и непрерывного распределения содержания x других минеральных фаз, входящих в сростковые формы нефелина по их выходу в классе с размерами частиц 0,155 мм

Таблица 13. Минерально-фазовый состав нефелина в пробе питания основной нефелиновой флотации (объемный, преобразованный вид)

$\beta_{1ik}^v / x_{ki} \Big _{i=1;2;3}$	Размер частиц (мм) / Выход (об.доля)			Итого: (контроль)
	0,243	0,155	0,080	
	0,2284	0,3105	0,4611	
β_{1i1}^v / x_{1i}	0,608 0,0475	0,648 0,0487	0,582 0,0495	0,6087
β_{1i2}^v / x_{2i}	0,129 0,3223	0,050 0,3487	0,018 0,3592	0,0531
β_{1i3}^v / x_{3i}	0,012 0,8051	0,006 0,8504	0,000 1,000	0,0046
Итого:	0,749	0,704	0,600	0,6664

Далее по преобразовании результатов гранулометрического, минерального и минерально-фазового анализов и описания пробы получено распределение объемного содержания минералов в УСФ (Таблица 14).

Таблица 14. Объемное содержание минералов в узких сепарационных фракциях

УСФ	p_{11}	p_{12}	p_{13}
Нефелин	0,9525	0,9513	0,9505
Эгирин	0,0212	0,0199	0,0191
П/шпат	0,0185	0,0156	0,0149
Сфен	0,0008	0,0037	0,0124
Апатит	0,0034	0,0071	0,0021
Слюды	0,0014	0,0014	0,0007
Гидрослюды	0,0008	0,0005	0,0003
Ильменит	0,0007	0,0005	0,0000
Лампрофиллит	0,0007	0,0000	0,0000
Цеолиты	0,0000	0,0000	0,0000
Титаномагнетит	0,0000	0,0000	0,0000
Гидроокислы железа	0,0000	0,0000	0,0000
Энигматит	0,0000	0,0000	0,0000
УСФ	p_{21}	p_{22}	p_{23}
Нефелин	0,6777	0,6513	0,6408
Эгирин	0,1080	0,1558	0,2897
П/шпат	0,1470	0,1179	0,0389
Сфен	0,0070	0,0377	0,0154
Апатит	0,0254	0,0251	0,0076
Слюды	0,0139	0,0082	0,0076
Гидрослюды	0,0116	0,0040	0,0000
Ильменит	0,0000	0,0000	0,0000
Лампрофиллит	0,0047	0,0000	0,0000
Цеолиты	0,0047	0,0000	0,0000
Титаномагнетит	0,0000	0,0000	0,0000
Гидроокислы железа	0,0000	0,0000	0,0000
Энигматит	0,0000	0,0000	0,0000
УСФ	p_{31}	p_{32}	p_{33}
Нефелин	0,1949	0,1496	0,0000
Эгирин	0,1109	0,3338	0,4543
П/шпат	0,6123	0,4248	0,2675
Сфен	0,0076	0,0153	0,0518
Апатит	0,0297	0,0229	0,0236
Слюды	0,0223	0,0153	0,0557
Гидрослюды	0,0223	0,0153	0,0423
Ильменит	0,0000	0,0077	0,0230
Лампрофиллит	0,0000	0,0077	0,0263
Цеолиты	0,0000	0,0000	0,0317
Титаномагнетит	0,0000	0,0000	0,0090
Гидроокислы железа	0,0000	0,0076	0,0097
Энигматит	0,0000	0,0000	0,0051

В последующих таблицах (15-21) представлены результаты последовательных шагов подготовки вычислительного эксперимента выполненных в соответствии с алгоритмом метода инициализации узких сепарационных фракций, рассмотренным в Главе 2, 2.2 и связанных с необходимостью учета оксидного состава минералов, входящих в пробу питания основной нефелиновой флотации, для определения содержания основного компонента в каждой инициализированной узкой сепарационной фракции; расчета поверхностной энергии частиц каждой узкой сепарационной фракции; получения возможности верификации результатов вычислительного эксперимента.

Таблица 15. Оксидный состав минералов, входящих в пробу питания основной нефелиновой флотации по вторым коэффициентам разложения

Минерал	a_j	Оксид													Молярная масса минерала
		Na ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	CaF ₂	MgO	H ₂ O	FeO	SrO	
		Молярная масса оксида (кг/кмоль)													
		62	100	60	94	160	56	80	142	78	40	18	72	104	
Нефелин	2	3	4	8	1										580
Эгирин	2	1		4		1									231
П/шпат	2		1	6	1										277
Сфен	1			1			1	1							196
Апатит	2						9		3	1					504
Слюды	2		1	6	1						6	2			415
Гидрослюды	2		1	6		1					2	10	2		512
Ильменит	1							1					1		152
Лампрофил.	2	3		8				6				1		4	790
Цеолиты	1	1	1	3								1			360
Титаномагн.	1					1		1					3		456
Гидроок. Fe	8					4						4			89
Энигматит	1	1		6				1					5		862

Таблица 16. Массовая доля оксидов в минералах, входящих в пробу питания основной нефелиновой флотации

Минерал	Оксид													Итого:
	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	CaF ₂	MgO	H ₂ O	FeO	SrO	
Нефелин	0,1603	0,3448	0,4138	0,0810										1,0000
Эгирин	0,1342		0,5195		0,3463									1,0000
П/шпат		0,1805	0,6498	0,1697										1,0000
Сфен			0,3061			0,2857	0,4082							1,0000
Апатит						0,5000		0,4226	0,0774					1,0000
Слюды		0,1205	0,4337	0,1133						0,2892	0,0434			1,0000
Гидрослюды		0,0977	0,3516		0,1563					0,0781	0,1758	0,1406		1,0000
Ильменит							0,5263					0,4737		1,0000
Лампрофиллит	0,1177		0,3038				0,3038				0,0114		0,2633	1,0000
Цеолиты	0,1722	0,2778	0,5000								0,0500			1,0000
Титаномагнетит					0,3509		0,1754					0,4737		1,0000
Гидроокислы Fe					0,8989						0,1011			1,0000
Энигматит	0,0719		0,4176				0,0928					0,4176		1,0000

Таблица 17. Массовая доля оксидов в пробе питания основной нефелиновой флотации

Минерал	Оксид													Итого:
	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	CaF ₂	MgO	H ₂ O	FeO	SrO	
	Плотность оксида (г/см ³)													
	2,37	3,76	2,65	2,32	5,24	3,37	4,13	2,28	3,18	3,58	1,00	5,70	4,70	
Нефелин	0,0999	0,2148	0,2577	0,0505										0,6229
Эгирин	0,0244		0,0944		0,0629									0,1817
П/шпат		0,0173	0,0622	0,0162										0,0957
Сфен			0,0073			0,0068	0,0098							0,0239
Апатит						0,0065		0,0055	0,0010					0,0130
Слюды		0,0020	0,0073	0,0019						0,0049	0,0007			0,0169
Гидрослюды		0,0010	0,0037		0,0016					0,0008	0,0018	0,0015		0,0105
Ильменит							0,0055					0,0049		0,0104
Лампрофиллит	0,0010		0,0027				0,0027				0,0001		0,0023	0,0087
Цеолиты	0,0011	0,0018	0,0033								0,0003			0,0066
Титаномагнетит					0,0014		0,0007					0,0019		0,0041
Гидроокислы Fe					0,0035						0,0004			0,0039
Энигматит	0,0001		0,0007				0,0002					0,0007		0,0017
Итого:	0,1266	0,2369	0,4393	0,0686	0,0695	0,0134	0,0188	0,0055	0,0010	0,0057	0,0034	0,0091	0,0023	1,0000

Таблица 18. Объемная доля оксидов в пробе питания основной нефелиновой флотации

Минерал	Оксид													Итого:
	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	CaF ₂	MgO	H ₂ O	FeO	SrO	
Нефелин	0,1287	0,1744	0,2969	0,0664										0,6664
Эгирин	0,0259		0,0897		0,0302									0,1458
П/шпат		0,0133	0,0680	0,0203										0,1016
Сфен			0,0074			0,0054	0,0063							0,0192
Апатит						0,0046		0,0057	0,0008					0,0111
Слюды		0,0014	0,0072	0,0021						0,0036	0,0019			0,0162
Гидрослюды		0,0008	0,0039		0,0009					0,0006	0,0052	0,0007		0,0121
Ильменит							0,0037					0,0024		0,0061
Лампрофиллит	0,0012		0,0027				0,0017				0,0003		0,0013	0,0071
Цеолиты	0,0016	0,0016	0,0040								0,0011			0,0082
Титаномагнетит					0,0008		0,0005					0,0010		0,0023
Гидроокислы Fe					0,0016						0,0009			0,0025
Энигматит	0,0001		0,0007				0,0001					0,0003		0,0013
Итого:	0,1574	0,1915	0,4805	0,0888	0,0335	0,0100	0,0124	0,0057	0,0008	0,0042	0,0094	0,0045	0,0013	1,0000

Таблица 19. Объемная доля оксидов в минералах, входящих в пробу питания основной нефелиновой флотации

Минерал	Оксид													Итого:
	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	CaF ₂	MgO	H ₂ O	FeO	SrO	
Нефелин	0,1931	0,2617	0,4456	0,0997										1,0000
Эгирин	0,1776		0,6150		0,2073									1,0000
П/шпат		0,1310	0,6693	0,1996										1,0000
Сфен			0,3862			0,2834	0,3304							1,0000
Апатит						0,4144		0,5177	0,0680					1,0000
Слюды		0,0869	0,4438	0,1324						0,2190	0,1179			1,0000
Гидрослюды		0,0632	0,3227		0,0725					0,0531	0,4285	0,0600		1,0000
Ильменит							0,6053					0,3947		1,0000
Лампрофиллит	0,1627		0,3755				0,2409				0,0374		0,1835	1,0000
Цеолиты	0,1886	0,1917	0,4897								0,1300			1,0000
Титаномагнетит					0,3478		0,2206					0,4316		1,0000
Гидроокислы Fe					0,6287						0,3713			1,0000
Энигматит	0,1070		0,5555				0,0792					0,2583		1,0000

06

Таблица 20. Энергетические константы ионов, входящих в структуры кристаллических решеток минералов, содержащихся в пробе

<i>H</i>	<i>O</i>	<i>F</i>	<i>Na</i>	<i>Mg</i>	<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>P</i>	<i>K</i>	<i>Ca</i>	<i>Ti</i>	<i>Fe²⁺</i>	<i>Fe³⁺</i>	<i>Sr</i>
0,32	1,55	0,37	0,45	2,15	4,95	8,60	14,40	0,36	1,75	8,40	2,12	5,15	1,58

Таблица 21. Поверхностная энергия минералов (Дж/м²), входящих в пробу питания основной нефелиновой флотации (по (27) и (28))

Минерал	Химическая формула	E_s
Нефелин	$2KNa_3[AlSiO_4]_4 = 3Na_2O + 4Al_2O_3 + 8SiO_2 + K_2O$	1,284
Эгирин	$2NaFe[Si_2O_6] = Na_2O + Fe_2O_3 + 4SiO_2$	1,608
Полевой шпат	$2K[AlSi_3O_8] = K_2O + Al_2O_3 + 6SiO_2$	1,418
Сфен	$CaTi[SiO_4]O = CaO + TiO_2 + SiO_2$	1,573
Апатит	$2Ca_5[PO_4]_3F = 9CaO + 3P_2O_5 + CaF_2$	1,549
Слюда (по флогопиту)	$2KMg_3[Si_3AlO_{10}] \cdot (OH)_2 = K_2O + 6MgO + Al_2O_3 + 6SiO_2 + 2H_2O$	1,379
Гидрослюда (по вермикулиту)	$2(Fe^{2+}Fe^{3+}Mg[Si_3AlO_{10}] \cdot (OH)_2 \cdot 4H_2O) =$ $= 2MgO + 2Fe^{2+}O + Fe_2^{3+}O_3 + Al_2O_3 + 6SiO_2 + 10H_2O$	1,171
Ильменит	$FeTiO_3 = FeO + TiO_2$	1,575
Лампрофиллит	$2(Sr_2Na_3Ti_3[Si_2O_7]_2O_3(OH)) = 4SrO + 3Na_2O + 6TiO_2 + 8SiO_2 + H_2O$	1,392
Цеолиты (по натролату)	$Na_2[Al_2Si_3O_{10}] \cdot H_2O = Na_2O + Al_2O_3 + 3SiO_2 + 2H_2O$	1,216
Титаномагнетит	$Fe^{2+}Fe_2^{3+}O_4 = FeO + Fe_2O_3$; $Fe^{2+}TiO_4 = 2FeO + TiO_2$	1,416
Гидроокислы Fe (по гётиту)	$8(Fe^{3+}O(OH)) = 4Fe_2O_3 + 4H_2O$	1,404
Энигматит	$Na_2Fe_5^{2+}Ti[Si_6O_{18}]O_2 = Na_2O + 5FeO + TiO_2 + 6SiO_2$	1,512

Таким образом, были получены необходимые данные для инициализации девяти узких сепарационных фракций, обладающих конечными значениями свойств (Таблица 22).

Таблица 22. Размер частиц, плотность, объемная доля, массовое содержание полезного компонента и поверхностная энергия частиц узких сепарационных фракций пробы питания основной нефелиновой флотации

УСФ	p_{11}	p_{12}	p_{13}	p_{21}	p_{22}	p_{23}	p_{31}	p_{32}	p_{33}
d_e , мм	0,243	0,155	0,080	0,243	0,155	0,080	0,243	0,155	0,115
ρ , кг/м ³	2649	2652	2654	2750	2815	2900	2763	2991	3201
α , м ⁻³	0,1459	0,2115	0,2825	0,0436	0,0237	0,0128	0,0136	0,0132	0,2533
$\beta_{Al_2O_3}^p$	0,3290	0,3277	0,3269	0,2525	0,2308	0,2073	0,1744	0,1161	0,0554
E_s , Дж/м ²	1,3229	1,3270	1,3275	1,3767	1,4019	1,4157	1,4147	1,4535	1,4717

3.2.4. Технологическая схема получения нефелинового концентрата в АО "Апатит" и расчет базовых параметров качественно-количественных показателей CFD модели ГСПФ в первой камере технологической схемы

Основой расчета объемных характеристик модели явилась технологическая схема получения нефелинового концентрата в АО «Апатит». Фрагмент схемы в пересчете на операцию основной нефелиновой флотации приведен на рисунке 13.

ММС в слабом поле				Условные обозначения			
100	0,65	215,3	333,7	$\gamma\%$	$\beta P_2O_5\%$	Q т/ч	W м ³ /ч
23,07	-----			$\beta Al_2O_3\%$	-----		
100	100	39,22	431,6	$\varepsilon Al_2O_3\%$	$\varepsilon P_2O_5\%$	% тв.	V м ³ /ч
↓ Немагнитный продукт							
Основная нефелиновая флотация							
52,00	0,38	112,0	92,7	48,00	0,94	103,3	241,0
28,38	-----			17,31	-----		
64,00	30,61	54,71	153,7	36,00	69,39	30,00	277,9
↓ Камерный продукт				↓ Пенный продукт			

Рис. 13. Качественно-количественные показатели операции основной нефелиновой флотации в АО «Апатит»

При построении CFD модели ГСПФ, работающей в стационарном режиме, важным является максимально возможное соблюдение условий реального производства. К таким условиям, в частности, относится соотношение полных объемных выходов (камерный и пенный продукты) в том смысле, что если за единицу времени в камеру флотационной машины поступает постоянный совокупный объем веществ и процесс происходит изобарно, то такой же по величине объем должен выходить из камеры за тот же интервал времени [108, 109]. Также учтено, что если питание основной нефелиновой флотации поступает на операцию через загрузочное устройство подачи питания первой камеры флотационной машины, то питанием второй камеры является камерный продукт первой камеры и т.д. Исходя из количества (двухкамерных) флотационных машин ОК-38 в технологической цепочке основной нефелиновой флотации на АНОФ-2 и предположения о равной интенсивности процесса флотации в каждой камере, количество которых (z) равно шести, рассчитано соотношение полных объемных выходов для каждой камеры. При этом принято, что весь объем воздушной фазы, поступающий в любую из шести камер через каналы валов импеллеров, содержится в пенном продукте. Коэффициенты учета интенсивности флотации рассчитаны для жидкой и твердой фаз по формулам:

$$k_{water} = 1 - \frac{z \sqrt{W_{кам}}}{\sqrt{W_{пит}}} = 1 - \sqrt[6]{\frac{92,7}{333,7}} = 0,192231 ;$$

$$k_{solid} = 1 - \frac{z \sqrt{V_{кам} - W_{кам}}}{\sqrt{V_{пит} - W_{пит}}} = 1 - \sqrt[6]{\frac{61}{97,9}} = 0,075817 .$$

Коэффициенты учета интенсивности потоков жидкой и твердой фазы определяют покамерную развертку баланса их объемных расходов, учитывающую последовательный отвод хвостов в переделе с пенным продуктом. Так для первой камеры соответственно получим:

$$W_{пен.} = k_{water} \cdot W_{пит.} = 0,192231 \cdot 333,7 = \mathbf{64,147 \text{ м}^3/\text{ч}} .$$

$$W_{кам.} = W_{пит.} - W_{пен.} = 333,7 - 64,147 = \mathbf{269,6 \text{ м}^3/\text{ч}} .$$

Рассчитанные значения расходов жидкой и твердой фаз в каждой из шести камер приведены в таблице 23.

И, наконец, для создания модели процесса флотации в первой камере определены условия однозначности по соотношению полных объемных выходов (Таблица 24).

В результате приведенных расчетов получены базовые параметры процесса флотации в первой камере флотационной машины, необходимые для контроля данных, получаемых в ходе вычислительного эксперимента (рисунок 14).

Таблица 23. Выхода жидкой и твердой фаз в пенный продукт каждой из шести камер

№ камеры	Жидкая фаза		Твердая фаза	
	Вход, м ³ /ч	Выход в пенный продукт, м ³ /ч	Вход, м ³ /ч	Выход в пенный продукт, м ³ /ч
1	333,7	64,147	97,9	7,423
2	269,6	51,816	90,5	6,860
3	217,7	41,856	83,6	6,340
4	175,9	33,810	77,3	5,859
5	142,1	27,310	71,4	5,415
6	114,8	22,061	66,0	5,004
Итого	333,7	241,0	97,9	36,9

Таблица 24. Баланс объемных выходов в первой камере основной нефелиновой флотации

Поток	$W, \text{м}^3/\text{ч}$	$V_s, \text{м}^3/\text{ч}$	$V_a, \text{м}^3/\text{ч}$	$\Sigma, \text{м}^3/\text{ч}$	Итого
Питание	333,7	97,9	900	1331,6	1
Пенный продукт	64,147	7,423	900	971,570	0,730
Камерный продукт	269,553	90,477	0	360,030	0,270

Согласно конструкторской документации на флотационную машину ОК-38, площадь сечения загрузочного устройства подачи питания $S_p = 0,4 * 1,4 = 0,56 \text{ м}^2$. Таким образом расход питания в вычислительном эксперименте составил $V_p = 431,6/3600 = 0,120 \text{ м}^3/\text{с}$ при скорости его подачи $v_p = V_p/S_p = 0,214 \text{ м}/\text{с}$.

Скорость подачи воздуха через канал вала импеллера флотационной машины также определен исходя из штатных режимов работы ОК-38. При диаметре сечения канала вала импеллера $d_i = 0,16 \text{ м}$ и расходе воздуха $V_a =$

0,25 м³/с, скорость подачи воздуха в вычислительном эксперименте $v_a = 4V_a/\pi d_i^2 = 12,434$ м/с.

Поток питания CFD модели ГСПФ				Условные обозначения			
100	0,55	215,3	333,7	$\gamma\%$	β P ₂ O ₅ %	Q т/ч	W м ³ /ч
23,69	-----			β Al ₂ O ₃ %	-----		
100	100	39,22	431,6	ϵ Al ₂ O ₃ %	ϵ P ₂ O ₅ %	% тв.	V м ³ /ч
↓							
CFD модель ГСПФ в первой рабочей камере ОК-38							
89,61	0,52	192,9	269,6	10,39	0,83	22,4	64,1
24,44	-----			17,29	-----		
92,42	84,31	41,72	360,0	7,58	15,69	25,86	71,6
↓ Поток камерного продукта CFD модели				↓ Поток пенного продукта CFD модели			

Рис. 14. Базовые параметры качественно-количественных показателей CFD модели ГСПФ в первой камере технологической схемы основной нефелиновой флотации

3.2.5. Постановка и проведение вычислительного эксперимента. Обработка полученной в ходе эксперимента числовой и графической информации

Инициализация УСФ и определение граничных условий ГСПФ обусловили выбор ключевых настроек решателя программы ANSYS Fluent.

За основу был принят переходной (Transient) субстанциональный режим решателя, алгоритмы которого учитывают в уравнениях математической модели присутствие производной параметров по времени, и задана система уравнений многофазной модели Эйлера (Рисунок 15), которая предполагает возможность сделать ряд следующих допущений:

- Система изобарна, т.е. первичная и любая из вторичных фаз испытывают постоянное равномерно распределенное давление.
- В силу ничтожности энергии локальных колебаний твердых частиц около их центров тяжести по сравнению с кинетической энергией ГСПФ, полной энергией таких колебаний можно пренебречь.

- Совокупности твердых частиц, представляющих любую одну из вторичных фаз, движутся в элементарных объемах (конечных элементах) модели ГСПФ подобно потоку псевдо жидкой фазы. Тем самым в модели ГСПФ в любой момент времени можно выделить поток отдельной твердой фазы, который подобно реальной жидкости характеризуется свойством вязкости.

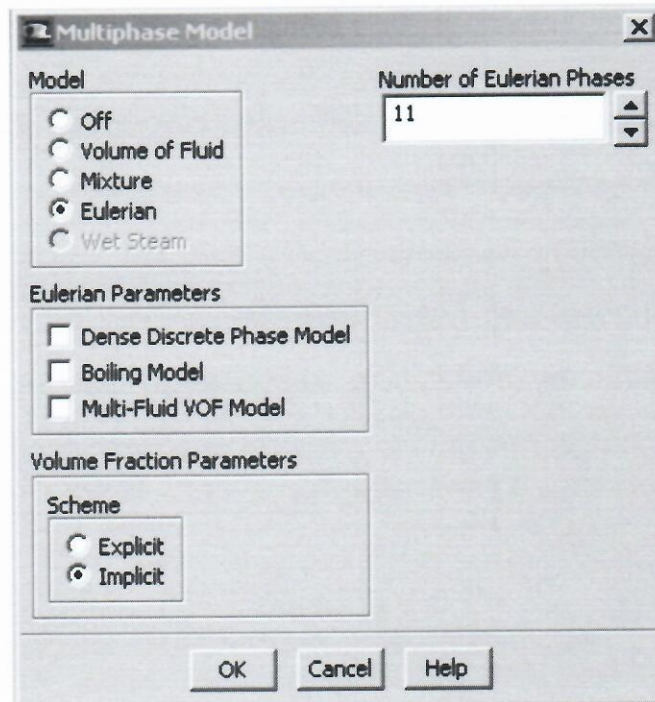


Рис. 15. Блок интерфейса ANSYS Fluent «Multiphase Model»

- Явления вязкого трения и разница инерционных свойств различных фаз обуславливают даже при незначительных значениях скоростного режима формирование зон турбулентной активности. Турбулентность негативно влияет на процесс флотации в силу проявления значительных разностей центробежных составляющих скоростей дисперсной газовой и различных твердых фаз, что вызывает резкое снижение количества элементарных актов флотации.
- Мгновенный объем ГСПФ большей частью содержит первичную фазу и в меньшей степени распределенные в нем вторичные фазы, которые движутся взаимопроникая друг в друга, образуя в совокупности ММК флотации.
- Каждая из вторичных фаз движется в модели ГСПФ одновременно со всеми остальными фазами. В каждом элементарном объеме модели ГСПФ в любой момент времени могут быть обнаружены частицы, представляющие с

различной вероятностью, весь набор фаз. В зависимости от принадлежности к той или иной вторичной фазе, разные частицы испытывают неодинаковое воздействие со стороны ГСПФ и, в свою очередь, влияют на движение и первичной и вторичных фаз. Eulerian Model Theory учитывает этот эффект взаимного влияния движения фаз посредством введения различных математических моделей фактора сопротивления.

Для учета диссипации потока пульпы была использована двухпараметрическая k - ϵ модель, в которой для описания турбулентных величин используется система двух нелинейных диффузионных уравнений [110, 111] – для массовой плотности турбулентной энергии k и скорости диссипации турбулентной энергии ϵ , с константами (Рисунок 16)

$$\sigma_k = 1, \quad \sigma_\epsilon = 1,3, \quad C_{\epsilon 1} = 1,44, \quad C_{\epsilon 2} = 1,92, \quad C_\mu = 0,09$$

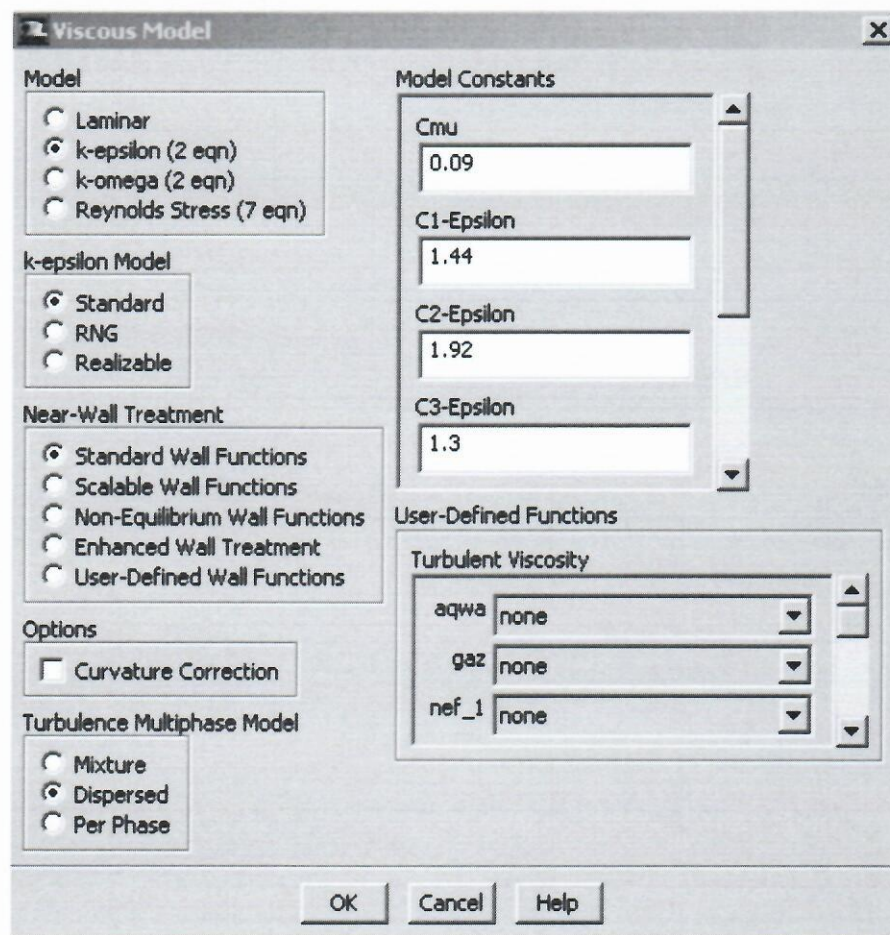


Рис. 16. Блок интерфейса ANSYS Fluent «Viscous Model»

В настройки решателя также были включены свойства инициализированных УСФ (Таблица 22), базовые параметры качественно-количественных показателей

CFD модели ГСПФ в первой камере технологической цепочки нефелиновой флотации (Рисунок 14) и условия взаимодействия фаз системы (Рисунок 17).

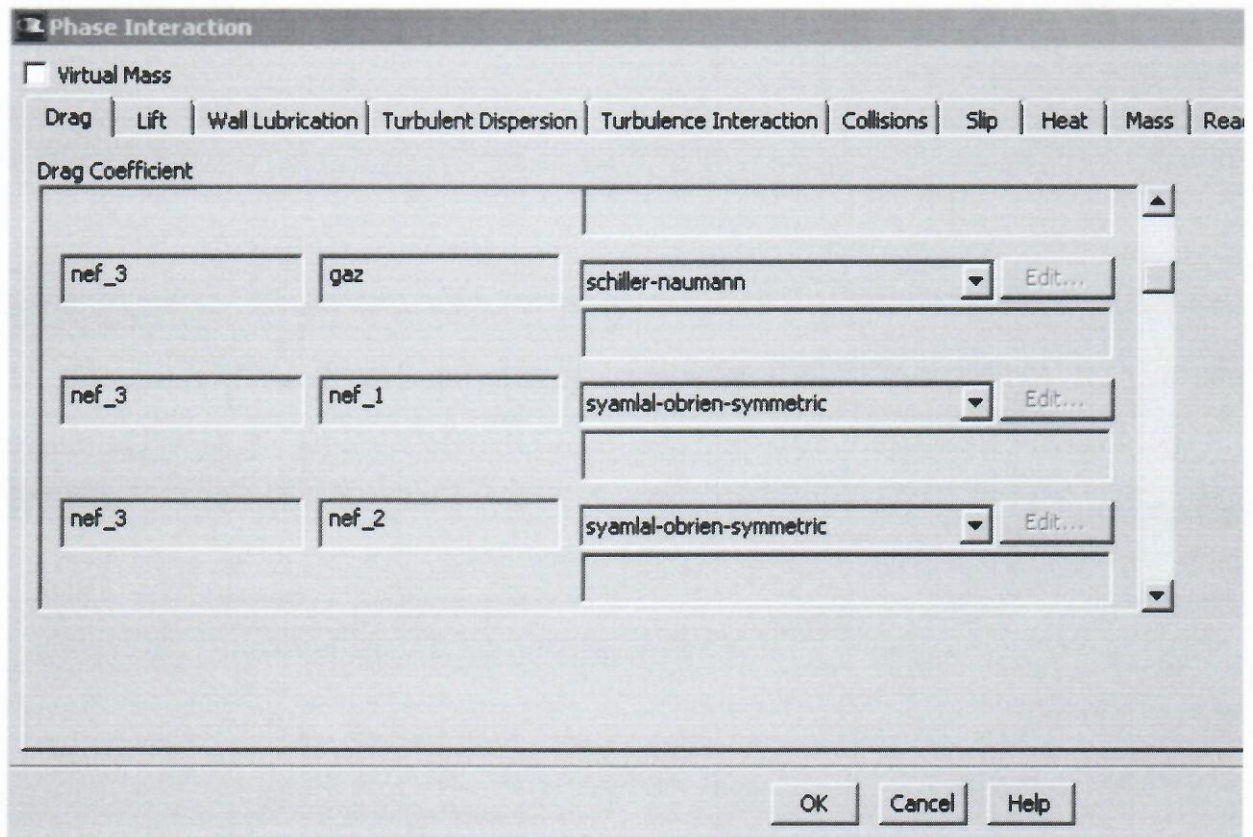


Рис. 17. Блок интерфейса ANSYS Fluent «Phase Interaction»

В эксперименте определялись потоки масс УСФ через поверхности ввода питания и выходов камерного и пенного продуктов, а так же объемное распределение УСФ в расчетной области (Рисунок 18).

Для численных оценок этих параметров были приняты следующие обозначения:

- mf_{ζ} – массовый поток ζ -ой УСФ через поверхность ввода питания ($кг/с$);
- ec_{ζ} – массовый поток ζ -ой УСФ через поверхность выхода камерного продукта ($кг/с$);
- ef_{ζ} – массовый поток ζ -ой УСФ через поверхность выхода пенного продукта ($кг/с$);
- v_{ζ} – объемный интеграл ζ -ой УСФ модели ($м^3$);
- ρ_{ζ} – плотность ζ -ой УСФ ($кг/м^3$).

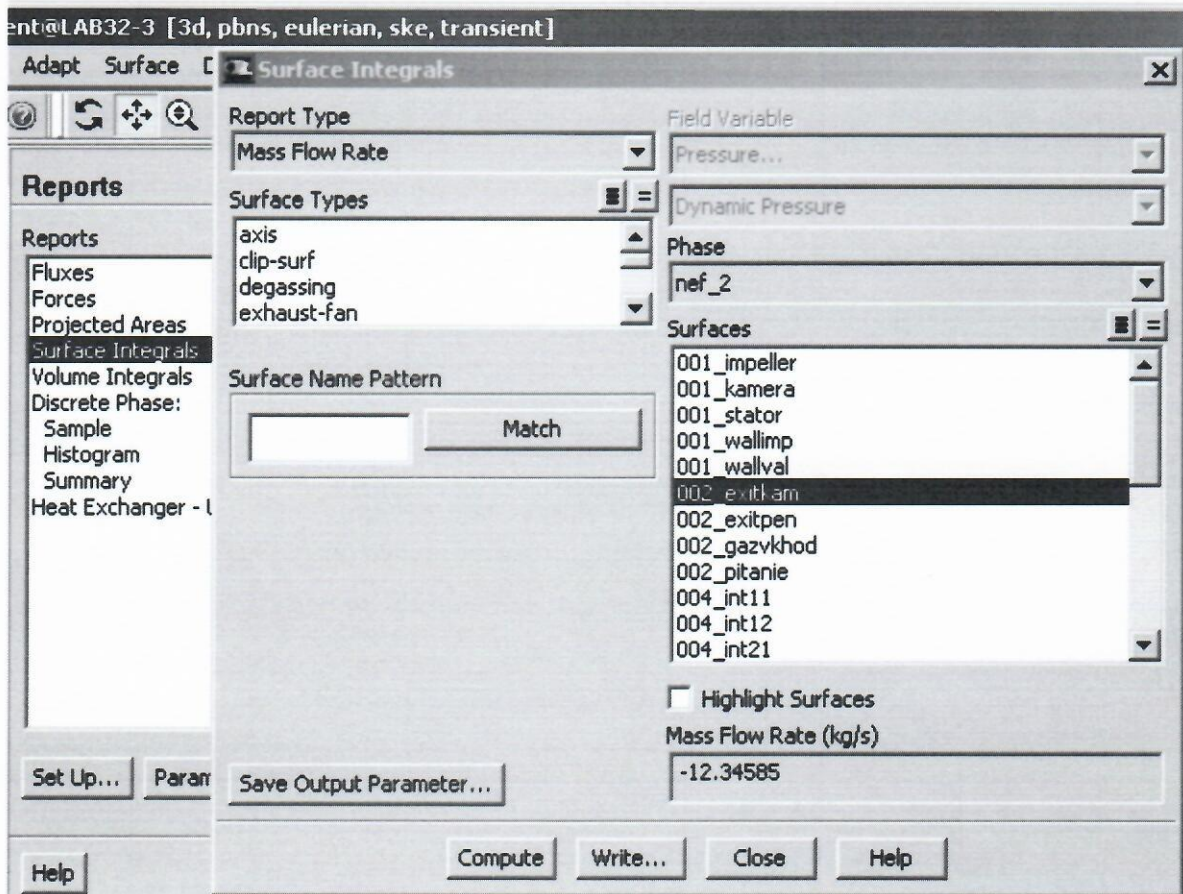


Рис.18. Блок интерфейса ANSYS Fluent «Reports»

Тогда в принятых обозначениях:

- Массовый баланс G УСФ модели:

$$G = 1 - \sum_{\zeta=1}^9 (ec_{\zeta} + ef_{\zeta}) / \sum_{\zeta=1}^9 \rho_{\zeta}.$$

- Текущее содержание Al_2O_3 и P_2O_5 в питании ГСПФ:

$$\beta_p^{Al_2O_3} = \sum_{\zeta=1}^9 \left(\beta_{\zeta}^{Al_2O_3} (ec_{\zeta} + ef_{\zeta}) \right) / \sum_{\zeta=1}^9 (ec_{\zeta} + ef_{\zeta});$$

$$\beta_p^{P_2O_5} = \sum_{\zeta=1}^9 \left(\beta_{\zeta}^{P_2O_5} (ec_{\zeta} + ef_{\zeta}) \right) / \sum_{\zeta=1}^9 (ec_{\zeta} + ef_{\zeta}).$$

- Выхода камерного и пенного продуктов, получаемые в эксперименте:

$$\gamma_c = \sum_{\zeta=1}^9 ec_{\zeta} / \sum_{\zeta=1}^9 (ec_{\zeta} + ef_{\zeta}) ; \quad \gamma_f = \sum_{\zeta=1}^9 ef_{\zeta} / \sum_{\zeta=1}^9 (ec_{\zeta} + ef_{\zeta}) .$$

– Содержания Al_2O_3 и P_2O_5 в продуктах, получаемые в эксперименте:

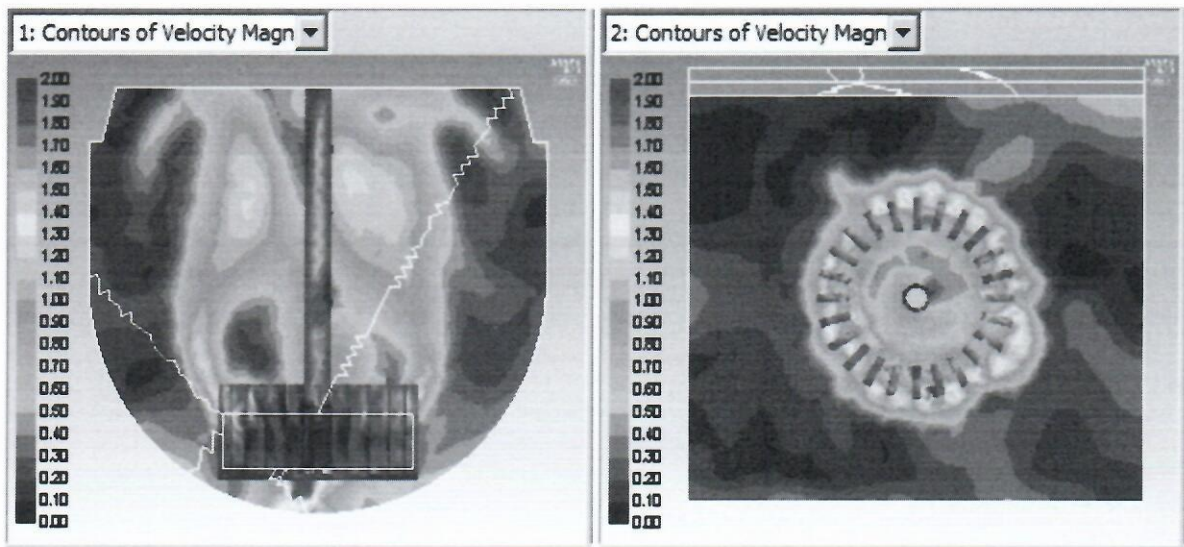
$$\beta_c^{Al_2O_3} = \sum_{\zeta=1}^9 (\beta_{\zeta}^{Al_2O_3} ec_{\zeta}) / \sum_{\zeta=1}^9 ec_{\zeta} ; \quad \beta_f^{Al_2O_3} = \sum_{\zeta=1}^9 (\beta_{\zeta}^{Al_2O_3} ef_{\zeta}) / \sum_{\zeta=1}^9 ef_{\zeta} ;$$

$$\beta_c^{P_2O_5} = \sum_{\zeta=1}^9 (\beta_{\zeta}^{P_2O_5} ec_{\zeta}) / \sum_{\zeta=1}^9 ec_{\zeta} ; \quad \beta_f^{P_2O_5} = \sum_{\zeta=1}^9 (\beta_{\zeta}^{P_2O_5} ef_{\zeta}) / \sum_{\zeta=1}^9 ef_{\zeta} .$$

– Извлечения Al_2O_3 и P_2O_5 в продукты, получаемые в эксперименте:

$$\varepsilon_c^{Al_2O_3} = \frac{\gamma_c \beta_c^{Al_2O_3}}{\beta_{mf}^{Al_2O_3}} ; \quad \varepsilon_c^{P_2O_5} = \frac{\gamma_c \beta_c^{P_2O_5}}{\beta_{mf}^{P_2O_5}} ; \quad \varepsilon_f^{Al_2O_3} = \frac{\gamma_f \beta_f^{Al_2O_3}}{\beta_{mf}^{Al_2O_3}} ; \quad \varepsilon_f^{P_2O_5} = \frac{\gamma_f \beta_f^{P_2O_5}}{\beta_{mf}^{P_2O_5}} .$$

В результате вычислительного эксперимента [112, 113] получено распределение скоростей ГСПФ (Рисунок 19).



а

б

Рис. 19. Распределение скоростей ГСПФ

а) - вертикальная осевая проекция;

б) - горизонтальная проекция в плоскости диска импеллера

Это позволило выявить в объеме модели зоны гидродинамической активности, характеризующиеся образованием локальных турбулентных потоков, снижающих вероятность элементарного акта флотации, а также зоны, где гидродинамическая активность низка, что способствует образованию застойных

областей с пониженной концентрацией газовой фазы. Тем самым получено представление о расположении зон, где установившиеся гидродинамические режимы в различной степени способствуют процессу флотации.

Получены индикаторные распределения (Рисунок 20) концентрации УСФ, в которых индикатором распределения является их объемная доля в потоке питания. Данное распределение позволяет оценить характер положения фракции в объеме камеры по сравнению с распределением в питании моделируемого процесса, что выявляет тенденцию заполнения фракцией рабочего объема камеры.

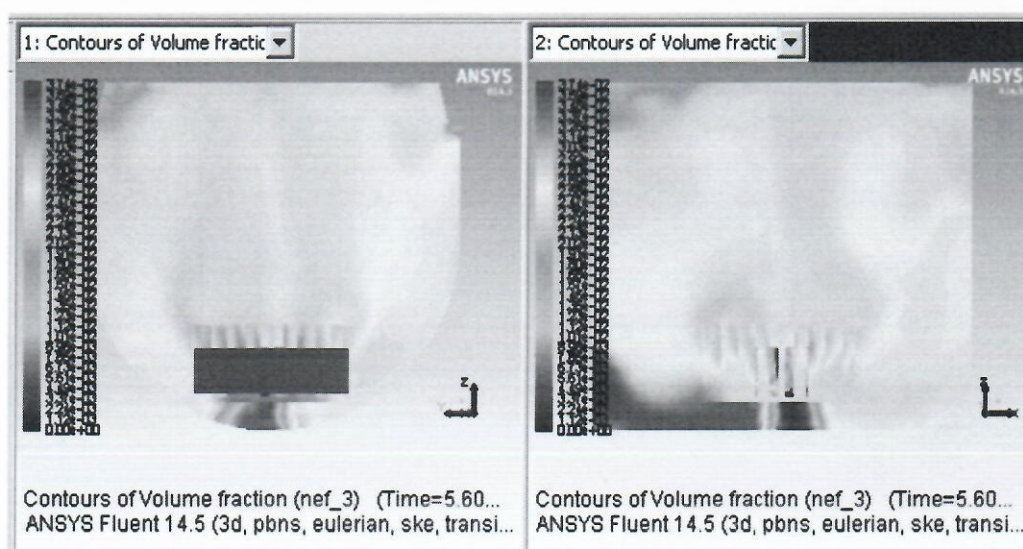


Рис. 20. Индикаторное распределение концентрации УСФ p_{13}

(см. Таблицу 22), имеющей объемное содержание в питании 0,0374 и расход подачи 11,765 кг/с в проекциях нормальных осевых сечений

Получены средневзвешенные распределения (Рисунок 21) концентрации УСФ, для которых центр распределения определен как среднее арифметическое объемных долей твердых фаз модели. Средневзвешенное распределение позволяет установить качественные и количественные прогнозные оценки формирования камерного и пенного продуктов.

Получено представление о характере расположения изоповерхностей концентраций УСФ (Рисунок 22).

В таблицах 25 и 26 приведены значения технологических показателей моделируемого процесса флотации, полученные в результате выполнения

вычислительного эксперимента. Столбцы «Расчет» содержат значения показателей, соответствующие базовым параметрам качественно-количественных показателей CFD модели (см. Рисунок 14), а столбцы «Результат» содержат значения поверхностных интегралов, взятых по поверхностям выходов камерного и пенного продуктов моделируемого объема при выполнении вычислительного эксперимента.

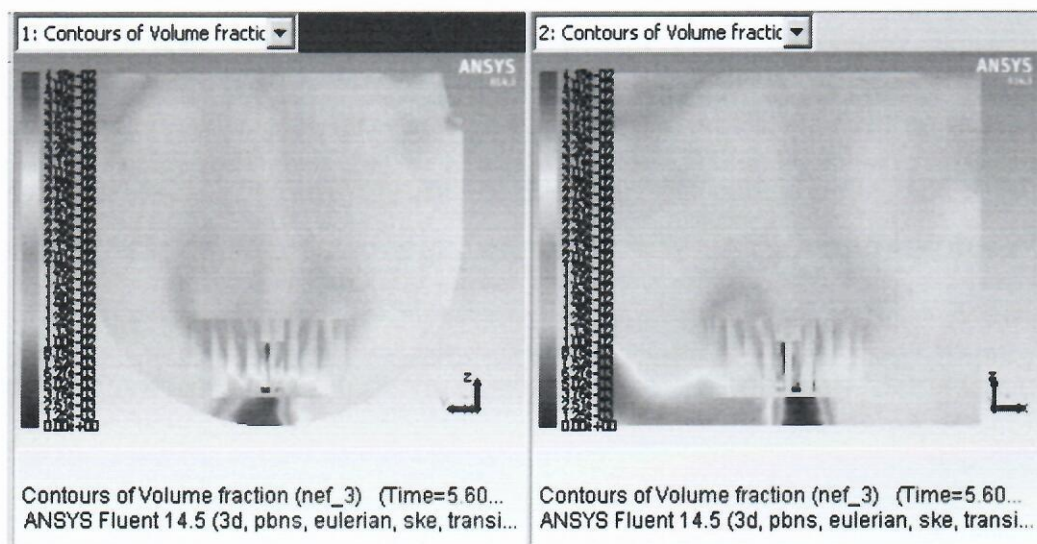
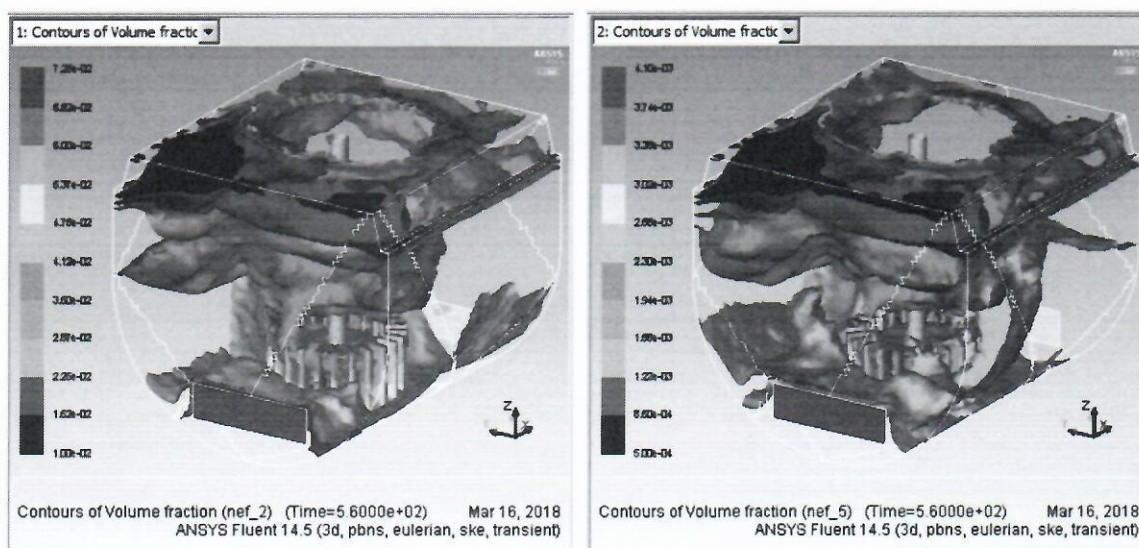


Рис. 21. Средневзвешенное распределение концентрации УСФ p_{13} (см. Таблицу 22) при средней доле твердых фаз модели 0,0418 в проекциях нормальных осевых сечений



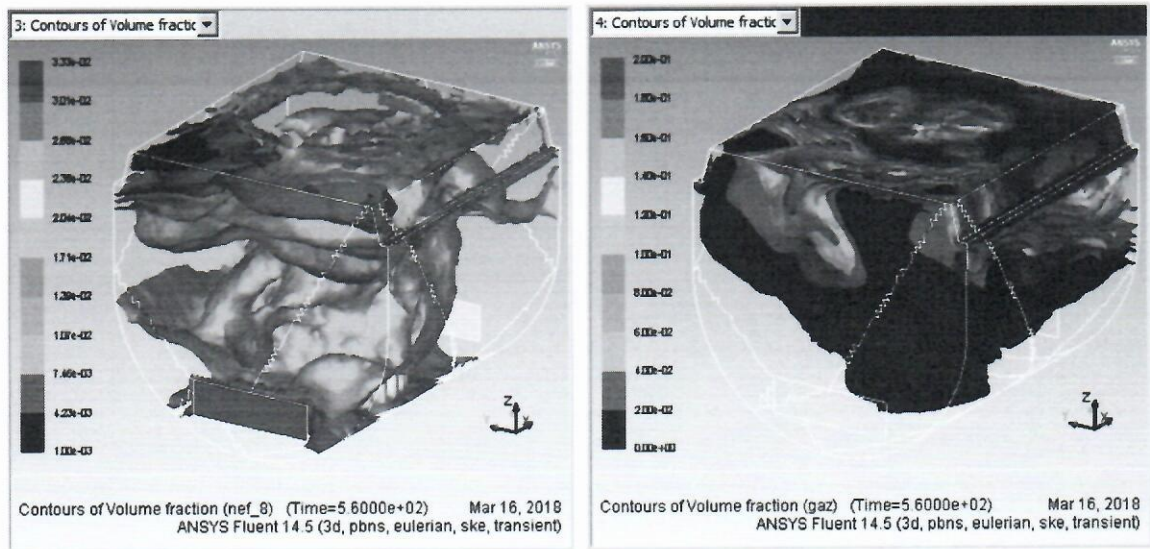
а

б

Рис. 22. Исоповерхности концентраций

а) - УСФ обогащенных нефелином;

б) - УСФ с низким содержанием нефелина



В

Г

Рис. 22 (продолжение). Исоповерхности концентраций
в) - УСФ обедненных нефелином; г) - газовой дисперсной фазы

Таблица 25. Выхода камерного и пенного продуктов в модели ГСПФ

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

Таблица 26. Содержание и извлечение Al_2O_3 и P_2O_5 в продуктах модели ГСПФ

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

Использование разработанного метода инициализации УСФ при проведении вычислительного эксперимента над моделью ГСПФ позволило формулировать условия однозначности с учетом физических и физико-химических свойств компонентов твердой фазы питания флотации. Важным преимуществом метода является возможность учета процессов, происходящих на

границах раздела фаз, для всех УСФ, обладающих различными инертными и поверхностными свойствами. Верификация результатов вычислительных экспериментов, проведенных с использованием данного метода, показала высокую степень корреляции с технологическими параметрами реализации флотационных процессов в промышленных условиях.

Рассмотренный подход к исследованию распределения минералов в продукты флотации обеспечил использование вычислительного эксперимента с CFD моделью процесса флотации, дающего представление о гидродинамике среды, выявляющего закономерности распределения концентраций и скоростей компонентов флотационной пульпы и позволяющего оценить технологические параметры флотации. Кроме того, эксперимент обеспечил прогноз результатов комплексного разделения минералов, входящих в состав питания флотации, с учетом присутствия в нем их сростковых форм.

Использование в вычислительном эксперименте ANSYS Fluent позволило получать интегрально-дифференциальные оценки физических и статистических параметров фаз в любой области исследуемой среды в каждый момент времени, как в графическом, так и в числовом виде. Проведение вычислительного эксперимента для исследования ММК флотации позволяет избежать установки измерительных приборов и датчиков в рабочий объем камеры флотационной машины и при этом получать данные о процессе, минимизировав необходимые для проведения подобного физического эксперимента материальные и временные ресурсы.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

Показано, что увеличение концентрации реагента в исходном растворе достаточно в выбранном диапазоне не приводит к достижению предельных значений адсорбции, что обеспечивает возможности управления характеристиками АВДВ и, следовательно, режимами флотации на стадии приготовления АВДВ. Показано, что условиями подачи АВДВ и видом гетерополярного ПАВ определяется аэрация пульпы. Так, при увеличении концентрации ПАВ в 2,5 раза, величина удельной площади поверхности раздела газ-жидкость в случае использования МДТМ возрастает в 1,7 раза, а в случае ЖКТМ, аэрофлота и олеиновой кислоты почти в 2 раза. Оценка толщины адсорбционного слоя позволяет судить о численных значениях адсорбции реагентов на поверхности пузырьков воздуха.

Приведено описание этапов постановки и проведения вычислительного эксперимента над моделью ГСПФ на основе инициализации узких сепарационных фракций (на примере модели ГСПФ хвостов апатитового производства при получении нефелинового концентрата в АО "Апатит"). Использование разработанного метода инициализации УСФ позволило определить конечные значения величин свойств УСФ, интерпретируемые в дальнейшем как условия однозначности математической модели. Выявлены закономерности распределения концентраций и скоростей УСФ. Показана возможность оценки распределения объемных фракций компонентов флотации, дающей представление о кинетике процесса и формировании продуктов разделения минералов. Тем самым, показана возможность использования вычислительного эксперимента и для исследования ГСПФ, и для прогнозирования технологических показателей флотации.

ОПТИМИЗАЦИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ФЛОТАЦИИ АПАТИТСОДЕРЖАЩИХ РУД В АКТИВИРОВАННОЙ ВОДНОЙ ДИСПЕРСИИ ВОЗДУХА

4.1. ИССЛЕДОВАНИЕ ФЛОТИРУЕМОСТИ БЕДНЫХ АПАТИТСОДЕРЖАЩИХ РУД В АКТИВИРОВАННОЙ ВОДНОЙ ДИСПЕРСИИ ВОЗДУХА

Исследования флотуемости апатитсодержащих руд в АВДВ проводились на лабораторной установке, показанной на рисунке 3, и стали продолжением исследований, ранее проводимых в ГоИ КНЦ РАН, с целью оценки возможности вовлечения в переработку бедных руд.

Для обеспечения сравнительного анализа исследовались режимы пенной сепарации с подачей пульпы на пенный слой и комбинированной флотации с разделением минералов как в объеме пульпы, так и пенной сепарацией. В этих режимах собиратель подавался как в перемешивание, так и в исходный раствор. Режим флотации в АВДВ обеспечивался увеличением времени активации пузырьков воздуха за счет заглубления диспергатора. Флотация в АВДВ осуществлялась в объеме пульпы, собиратель подавался только с исходным раствором, а при кондиционировании поддерживалось заданное значение рН пульпы и в нее добавлялись реагенты модификаторы.

В исследованиях использовалась бедная апатитовая руда, измельченная до класса крупности минеральных частиц 100% –1 мм с распределением свободного апатита и апатита в сростках 73,8 и 26,2% и исходным содержанием P_2O_5 4,81%, при этом выход класса +0,16 мм составил 72,5% с распределением свободного

апатита и апатита в сростках 62,3% с содержанием P_2O_5 2,03% и 37,3% с содержанием P_2O_5 1,23%, а выход класса $-0,16$ мм составил 27,5% с распределением свободного апатита и апатита в сростках 98,2% с содержанием P_2O_5 1,52% и 1,8% с содержанием P_2O_5 0,03%. Гранулометрический и минералогический составы пробы этой руды приведены в таблице 27.

В качестве собирателя использовался олеат натрия. Были применены следующие режимы проведения опытов: время кондиционирования – 2 мин; рН пульпы и исходного раствора собирателя 9,3–9,5; расход воздуха на диспергирование 0,1 л/мин; расход исходного раствора собирателя 150 мл/мин; плотность минеральной суспензии 40% тв.; время истечения суспензии (продолжительность опыта) 2 минуты; масса твердого 200 г.

В проводимых опытах, помимо выходов пенного и камерного продуктов, содержания и извлечения полезного компонента определялся общий расход собирателя. Для этого использовалось следующее соотношение:

$$G = \frac{\text{Расход исходного, [мл]} * \text{Концентрация исходного, [мг/л] раствора}}{\text{Масса твердого, [г]}} + \frac{\text{Расход собирателя в операцию, [г/т] кондиционирования}}$$

В результате опытов показано, что при различных расходах собирателя на кондиционирование показатели пенной сепарации зависят от его концентрации в исходном растворе. Результаты опытов в режиме пенной сепарации показаны на рисунке 23.

При концентрации исходного раствора собирателя 25 мг/л, что соответствует дополнительному расходу собирателя 37,5 г/т, сепарация, предварительно обработанной в операции кондиционирования пробы с присутствием 50 г/т собирателя, практически не происходит и начинается с увеличением расхода собирателя в кондиционирование до 100 г/т ($\gamma=2,63\%$; $\beta=34,20\%$; $\varepsilon=18,70\%$; $\eta=16,88\%$; $G=137,5$ г/т (η - эффективность флотации)). Здесь и далее эффективность разделения определялась по формуле:

$$\eta = \frac{\varepsilon - \gamma}{100 - \alpha} \cdot 100\% .$$

Таблица 27. Гранулометрический и минералогический составы пробы апатитовой руды Хибинского месторождения

Крупность, мм	Выход, %	Содержание минералов, %										
		Апатит				нефелин	вторичный нефелин	полевой шпат	эгирин	сфен	титано-магнетит	прочие
		свободный	сростки	распределение								
				свободный	сростки							
+0,63	27,7	1,5	5,2	3,7	12,7	42,4	6,4	3,7	35,6	1,9	1,8	1,44
+0,40	17,7	5,1	4,7	8,0	7,3	45,6	7,6	3,6	27,5	2,7	1,5	1,63
+0,31	8,3	9,0	4,7	6,5	3,4	41,9	4,6	3,5	29,3	4,6	1,4	0,93
+0,20	12,5	13,7	1,6	15,1	1,8	38,8	3,4	2,5	33,8	3,8	1,5	0,89
+0,16	6,1	16,3	0,7	8,8	0,4	35,6	3,2	1,8	34,4	5,1	1,2	1,67
+0,10	8,8	14,9	0,5	11,5	0,4	32,1	3,9	2,5	37,3	6,5	0,9	1,35
+0,06	7,1	13,6	0,3	8,5	0,2	31,7	2,9	2,8	38,3	7,4	1,1	1,83
-0,06	11,3	11,3	-	11,7	-	-	41,8	-	37,6	6,2	1,5	1,6
Итого	100	8,38	2,97	73,8	26,2	39,3	5,2	3,3	33,9	4,0	1,45	1,42

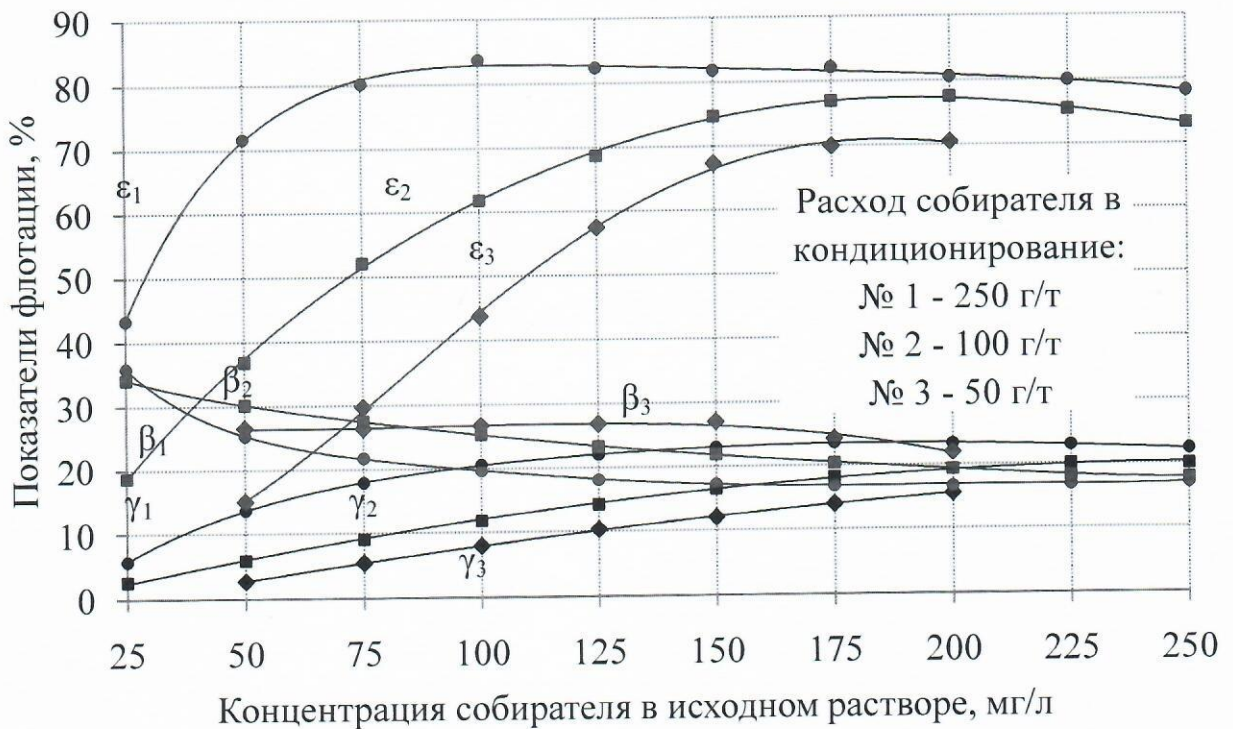


Рис. 23. – Показатели пенной сепарации в зависимости от концентрации собирателя в исходном растворе

Извлечение повышается, когда расход собирателя в операцию кондиционирования увеличивали до 250 г/т ($\gamma=5,80\%$; $\beta=35,98\%$; $\epsilon=43,39\%$; $\eta=39,49\%$; $G=287,5$ г/т). С увеличением концентрации собирателя в исходном растворе извлечение P_2O_5 возрастает, достигая при каждом конкретном расходе собирателя в голову процесса некоторого предельного значения с последующим его убыванием при увеличении концентрации собирателя в исходном растворе. Так в проведенных опытах соответствующие максимумы извлечения следующие:

- Расход собирателя в кондиционирование 250 г/т, концентрация исходного раствора собирателя 100 мг/л
 $\gamma=20,58\%$; $\beta=19,58\%$; $\epsilon=83,77\%$; $\eta=66,38\%$; $G=400,0$ г/т.
- Расход собирателя в кондиционирование 100 г/т, концентрация исходного раствора собирателя 200 мг/л
 $\gamma=19,35\%$; $\beta=19,27\%$; $\epsilon=77,52\%$; $\eta=61,11\%$; $G=400,0$ г/т.
- Расход собирателя в кондиционирование 50 г/т, концентрация исходного раствора собирателя 200 мг/л
 $\gamma=15,48\%$; $\beta=21,90\%$; $\epsilon=70,48\%$; $\eta=57,78\%$; $G=350,0$ г/т.

Таким образом, в выполненных опытах общий расход собирателя порядка 400 г/т, являлся минимумом, при котором пенной сепарацией обеспечиваются приемлемые показатели обогащения грубоизмельченной апатитовой руды. При этом извлечение P_2O_5 в пенный продукт получается тем выше, чем больше расход собирателя в кондиционирование. Однако, даже при наибольшем из испытанных расходов собирателя (250 г/т), когда достигалось максимальное извлечение P_2O_5 83,77%, концентрация собирателя в исходном растворе не должна быть ниже 100 мг/л. При снижении этой величины в два раза извлечение уменьшается до 71,67%, а при концентрации 25 мг/л оно не превышает 43,39%. Учитывая прочность закрепления собирателя на поверхности апатита в процессе двухминутного контактирования, а также малое время нахождения минералов в пенном слое, снижение извлечения P_2O_5 в пенный продукт по мере уменьшения концентрации собирателя в исходном растворе, нельзя объяснить ухудшением его гидрофобности. Очевидно, что возможной причиной является изменение свойств поверхностных оболочек газовых пузырьков, образующих пенный слой.

Флотация проб руды в комбинированном режиме осуществлялась в камере глубиной 225 мм при следующих реагентных режимах (Таблица 28).

Таблица 28. Реагентные режимы комбинированной флотации

Расход собирателя в кондицион-ие, г/т	50	100	150	200	250
Концентрация в исходном р-ре, мг/л*	24 ₃₀	60 ₇₅	90 ₁₁₃	120 ₁₅₀	150 ₁₈₇
Общий расход собирателя, г/т	95	213	320	425	530

* Указанные концентрации в исходном растворе равны остаточным значениям концентрации собирателя в жидкой фазе минеральной суспензии после ее двухминутного контактирования с соответствующим количеством собирателя.

Нижний индекс – концентрация собирателя в исходном растворе.

Из рисунка 24 видно, что оптимальное извлечение P_2O_5 ($\gamma=22,73\%$; $\beta=18,17\%$; $\epsilon=85,86\%$; $\eta=66,32\%$) в пенный продукт достигается при общем расходе собирателя порядка 350 г/т, что на 12,5% ниже, чем при пенной сепарации, с пренебрежимо малым снижением эффективности флотации $\Delta\eta=0,06\%$.

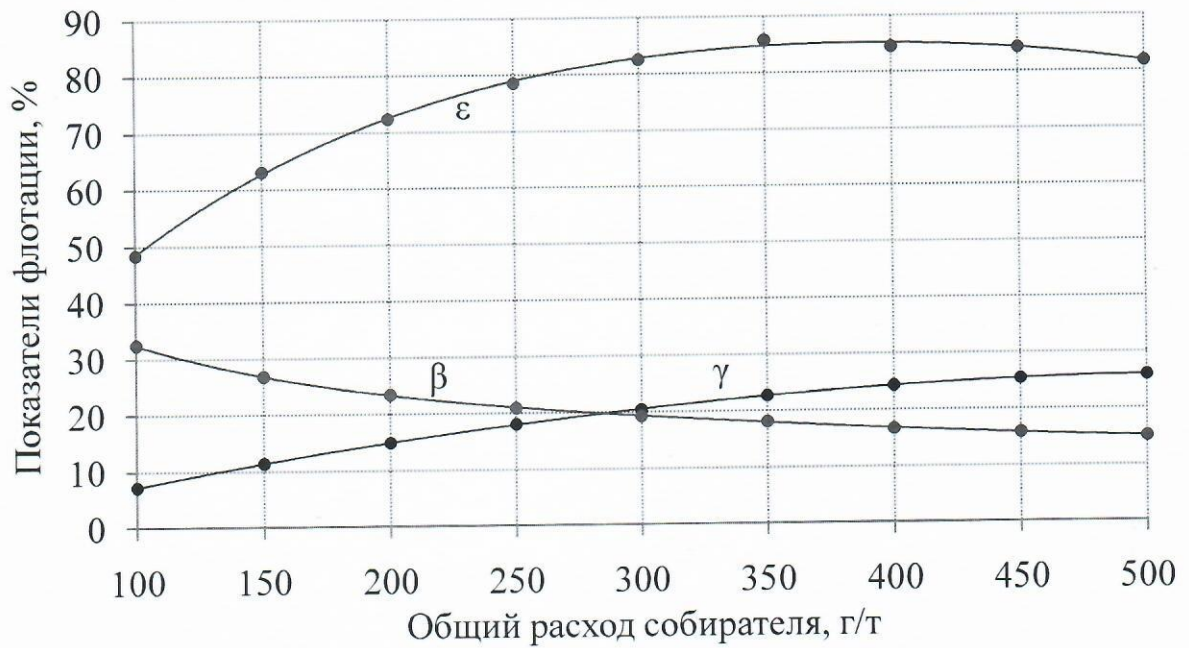


Рис. 24. – Показатели флотации комбинированным способом в зависимости от общего расхода собирателя

Извлечение при комбинированном режиме флотации повышается, если диспергирование воздуха осуществлять не в донной части разделительной камеры, а в зоне, расположенной ниже ложного днища камеры. Результаты флотации проб руды в АВДВ приводятся на рисунке 25.

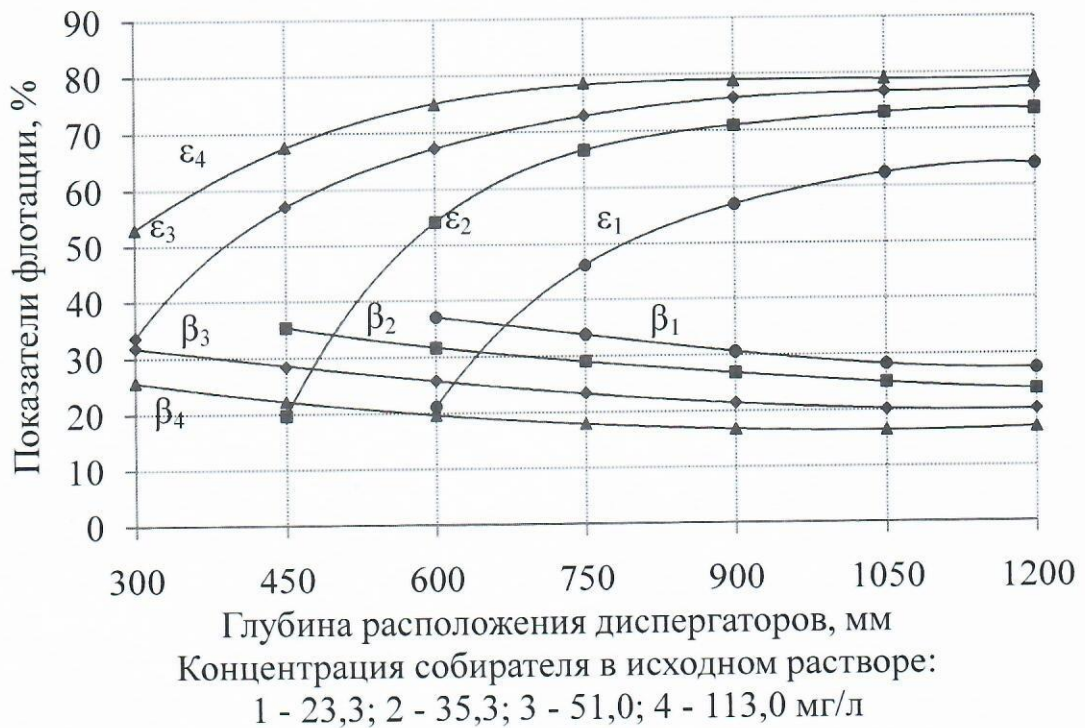


Рис. 25. – Зависимость показателей флотации от глубины расположения диспергаторов при различной концентрации собирателя в исходном растворе

Результатами опытов показано, что при концентрации собирателя в исходном растворе 113 мг/л ($G=169,5$ г/т) в пенные продукты флотации с содержанием 16,48% P_2O_5 извлекается до 79,01% ценного компонента, что только на 4,76% ниже максимума извлечения при пенной сепарации со снижением общего расхода собирателя на 230,5 г/т, и только на 6,68% ниже максимума извлечения при комбинированном режиме флотации со снижением общего расхода собирателя на 180,5 г/т. Полученный эффект при отсутствии расхода собирателя в кондиционирование можно объяснить повышением активности поверхности пузырьков, которые до поступления во флотационную камеру определенное время находились в контакте с исходным раствором.

В экспериментах по флотации навесок руды в АВДВ флотируемость апатита изучалась в зависимости от концентрации собирателя в исходном растворе и уровня расположения диспергаторов воздуха в подготовительном отделении флотационной колонки. Это позволило оптимизировать технологические показатели разделения руды в АВДВ и установить влияние адсорбционных слоев газовых пузырьков на их активность по отношению к гидрофильной или слабо гидрофобной поверхности минеральных частиц.

Анализ результатов показывает, что в АВДВ, приготовленных при рН исходного раствора 9,3-9,5 и в присутствии собирателя, апатит хорошо флотируется без предварительной гидрофобизации поверхности. Извлечение апатита в пенный продукт зависит от времени нахождения пузырьков в исходном растворе, резко возрастая при его увеличении и достигая некоторого максимума при расположении диспергаторов воздуха на уровне 750-1200 мм от сливного порога камеры. Существенный прирост извлечения в зависимости от концентрации собирателя в исходном растворе наблюдается только при ее увеличении до порядка 50 мг/л. В этих условиях в пенный продукт с содержанием около 20% P_2O_5 извлекается до 77,4% P_2O_5 , что на 13,55% больше, чем при минимальной испытанной концентрации собирателя. Дальнейшее повышение концентрации до 113 мг/л, т.е. в 2,2 раза, вызывает увеличение извлечения не

более чем на 1,61%, но при этом заметно, примерно на 3,5% снижается селективность флотации.

Полученные в опытах результаты можно сравнивать, как минимум, с двух точек зрения, – с точки зрения максимума извлечения и общего расхода собирателя и с точки зрения соизмеримо равной эффективности флотации и общего расхода собирателя (Таблица 29; Таблица 30).

Таблица 29. Показатели разделения различными способами при максимальных извлечениях ценного компонента

Процесс	Пенная сепарация			Комбиниров. режим			Флотация в АДВ		
	Г, г/т	400			350			169,5	
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 30. Показатели разделения различными способами при соизмеримо равной эффективности флотации

Процесс	Пенная сепарация			Комбиниров. режим			Флотация в АДВ		
	Г, г/т	325			200			169,5	
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*		

* В таблице 30 приведенное значение эффективности флотации в АДВ является максимальным из серии опытов с наибольшим общим расходом собирателя.

Таким образом наибольшее извлечение 83,77% и 85,86% было получено соответственно пенной сепарацией и флотацией при комбинированном режиме. Комбинированная флотация при этом отличалась от пенной сепарации меньшим на 12,5% общим расходом собирателя. При флотации в АДВ наибольшее извлечение 79,01% было получено при общем расходе собирателя 169,5 г/т, что соответственно на 4,76% и 6,86% меньше по извлечению и в 2,36 и 2,06 раза меньше по общему расходу собирателя. Кроме того, показано, что эффективность флотации в АДВ соизмеримо равная эффективностям флотации при пенной

сепарации и флотации в комбинированном режиме и определяемая из серии опытов с наибольшим общим расходом собирателя достигается при значительно меньшем расходе собирателя, - соответственно в 1,92 и 1,18 раза. Таким образом, флотация в АВДВ обеспечивает кратное снижение общего расхода собирателя, что способно позитивно отразиться на себестоимости концентрата, организации оборотного водоснабжения и экологизации производства. Однако, сравниваемые результаты опытов показали, что флотация в АВДВ уступает по селективности и получаемые продукты должны быть подвергнуты дальнейшим перечистным операциям.

Как известно, наибольшие потери апатита с отвальными продуктами связаны с классами крупнее 0,15-0,20 мм. Ранее проведенные в ГоИ КНЦ РАН исследования показали, что такой материал может эффективно разделяться флотацией в АВДВ. Эксперименты на руде класса 100 % -0,5 мм показали эффективность первичной флотации в АВДВ и первой перечистки черновых концентратов с выводом из переработки отвальных хвостов. Пенные продукты основной и контрольной флотации показали содержание 10,4 и 14,2 % материала класса +0,2 мм, из которого апатит в условиях производства трудно извлекается. Поэтому пенный продукт первой перечистки измельчался до 100% -0,2 мм. С учетом кондиций на апатитовый концентрат, снижения потерь и качества за счет сфлотированных сростков и возможности осуществления первой перечистки в пневматических флотомашинах ранее в ГоИ КНЦ РАН была предложена качественно-количественная схема обогащения бедной апатитовой руды с применением АВДВ (Рисунок 26). Последующие конструктивные изменения условий диспергации воздуха (переход с войлочных на струйные диспергаторы и оптимизация их заглубления) позволили получать кондиционный апатитовый концентрат при извлечении до 90 %. Апробация предложенной схемы проводилась в лабораторных условиях.

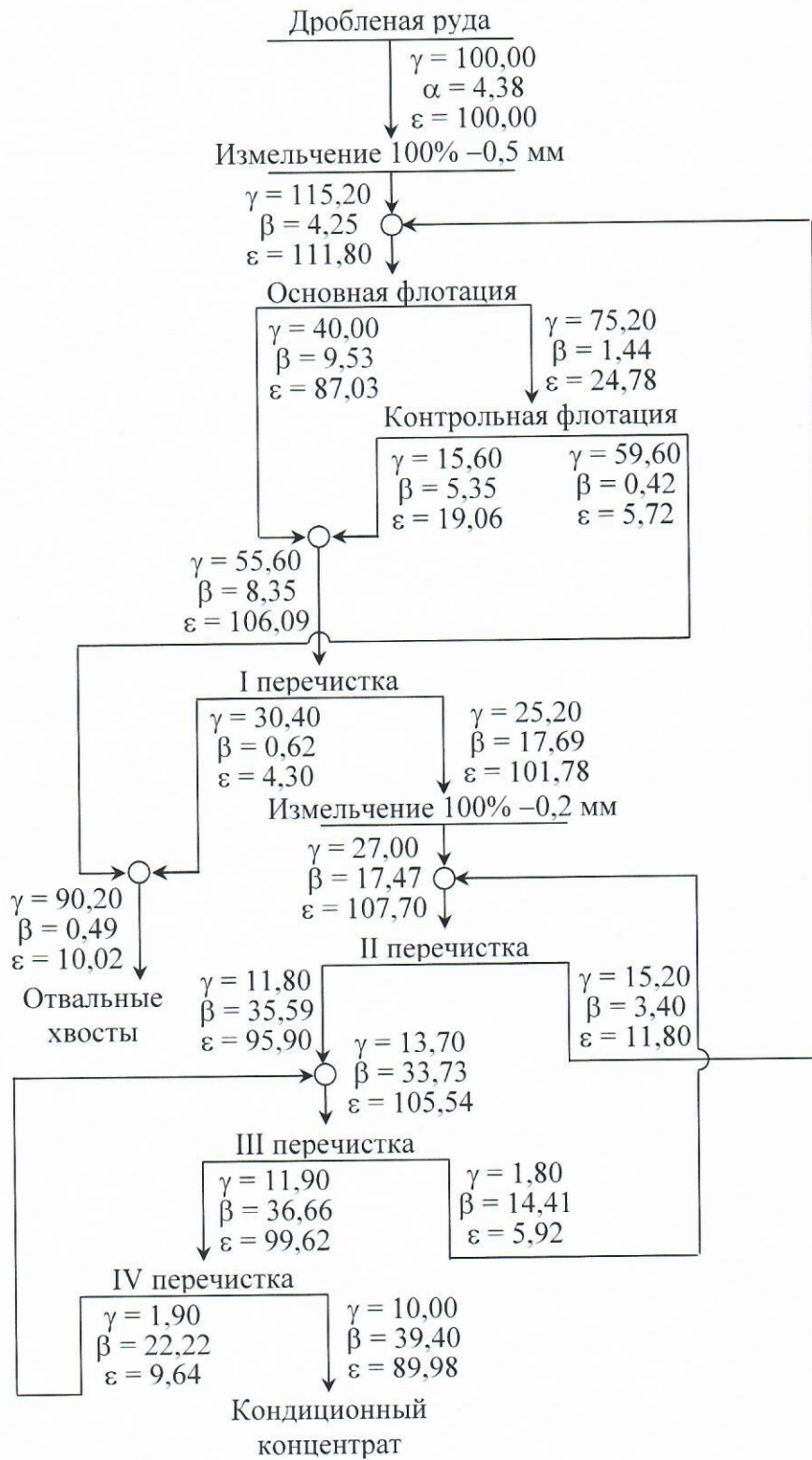


Рис. 26. – Качественно-количественная схема обогащения бедной апатитсодержащей руды с применением АДВ

4.2. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ОБОСНОВАНИЮ ПРОВЕДЕНИЯ ОСНОВНОЙ ФЛОТАЦИИ БЕДНОЙ АПАТИТСОДЕРЖАЩЕЙ РУДЫ В АКТИВИРОВАННОЙ ВОДНОЙ ДИСПЕРСИИ ВОЗДУХА В СТАНДАРТНОМ ОБОРУДОВАНИИ

Как видно из приведенной количественной схемы обогащения бедной апатитсодержащей руды, основная флотация с применением АВДВ в голове процесса позволяет выводить значительную часть материала с низким содержанием полезного компонента уже после контрольной флотации. Поэтому дальнейшие исследования в рамках работы были направлены на оценку возможности применения стандартного флотационного оборудования для проведения основной флотации по приведенной схеме в условиях производства.

Флотация в производственном апатитовом цикле АО "Апатит" осуществляется в колонных флотомашинах. Прообразом этих машин является колонная флотационная машина производства Канадской компании "Canadian Process Technologies Inc." CETCO, оснащенная водно-воздушными диспергаторами Sparjet (Рисунок 27).

Для обоснования проведения основной флотации бедной апатитсодержащей руды в АВДВ в условиях производства был подготовлен и проведен вычислительный эксперимент над моделью ГСПФ в камере флотационной машины CETCO.

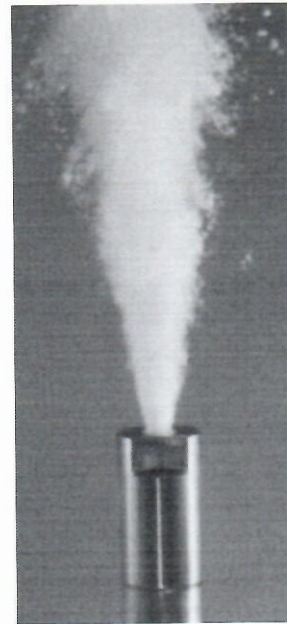
Вычислительный эксперимент был проведен на ПК с модификацией Intel(R) Core, 2.93 GHz, 8.00 ГБ, 64-ОС // Windows 7(max) в программном комплексе ANSYS Fluent (R 14,5). Распараллеливание задачи – 8 ядер. 3D проекция. Временная дискретизация $1e-2$ с на 20 итераций.

Конструктивные элементы камеры флотационной машины CETCO, прототипированные в сеточном генераторе Gambit, показаны на рисунке 28. Емкость структурированной расчетной сетки конечных тетрагональных

элементов модели 677398, при минимальном размере элемента $3,08e-9 \text{ м}^3$, максимальном размере элемента $9,15e-3 \text{ м}^3$ и физическом объеме $122,1 \text{ м}^3$.

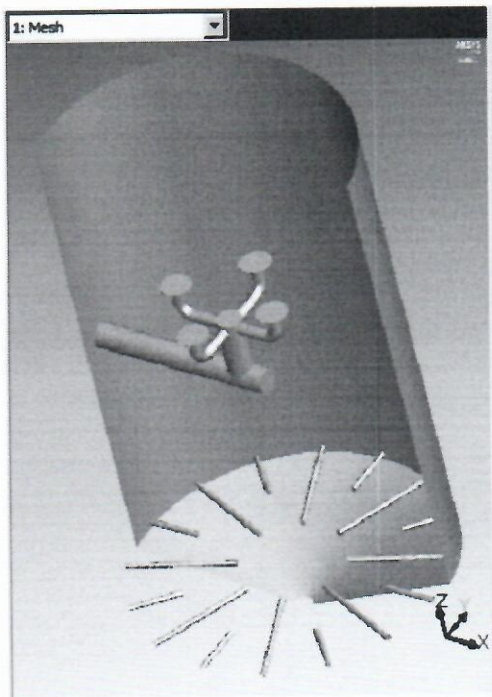


а)

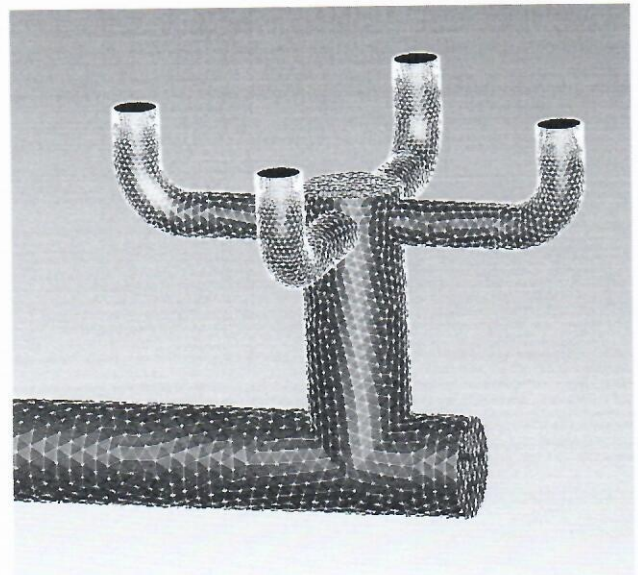


б)

Рис. 27. – а) флотационная машина SETCO; б) диспергатор Sparjet.
(фотографии сайта <http://coralina.ru/files/mining/9.pdf>)



а)

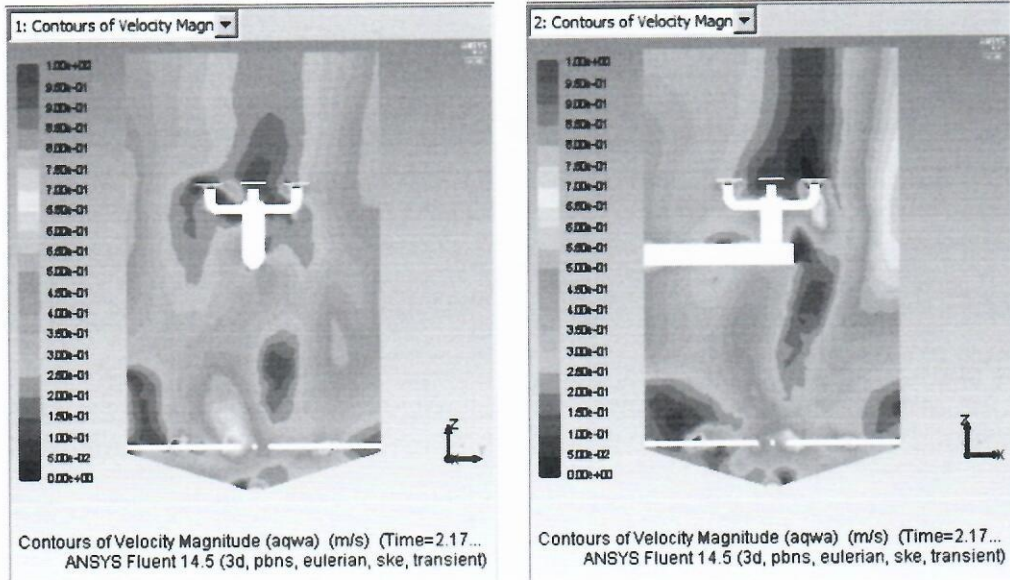


б)

Рис. 28. – а) корпус флотационной машины SETCO с направляющими диспергаторов, распределителем питания и диспергирующими пластинами;
б) внутренний четырех-ходовой распределитель.

При подготовке эксперимента использовался метод инициализации узких сепарационных фракций.

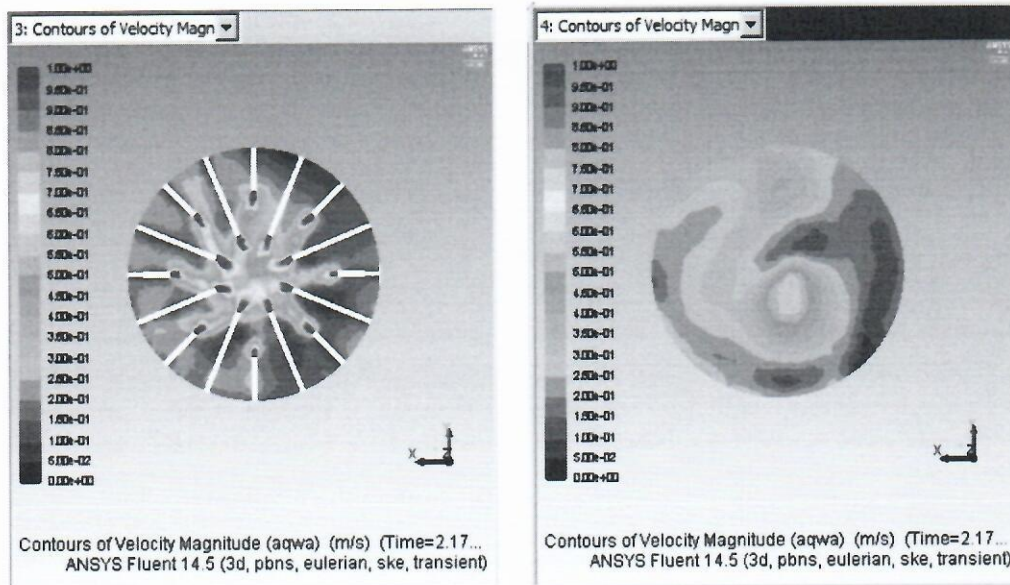
В результате вычислительного эксперимента было получено распределение скоростей флотационной пульпы в рабочем объеме флотомшины. На рисунке 29 показаны осевые вертикальные и горизонтальные проекции этого распределения.



а)

б)

Рис. 29.: а) осевая z0y проекция; б) осевая z0x проекция

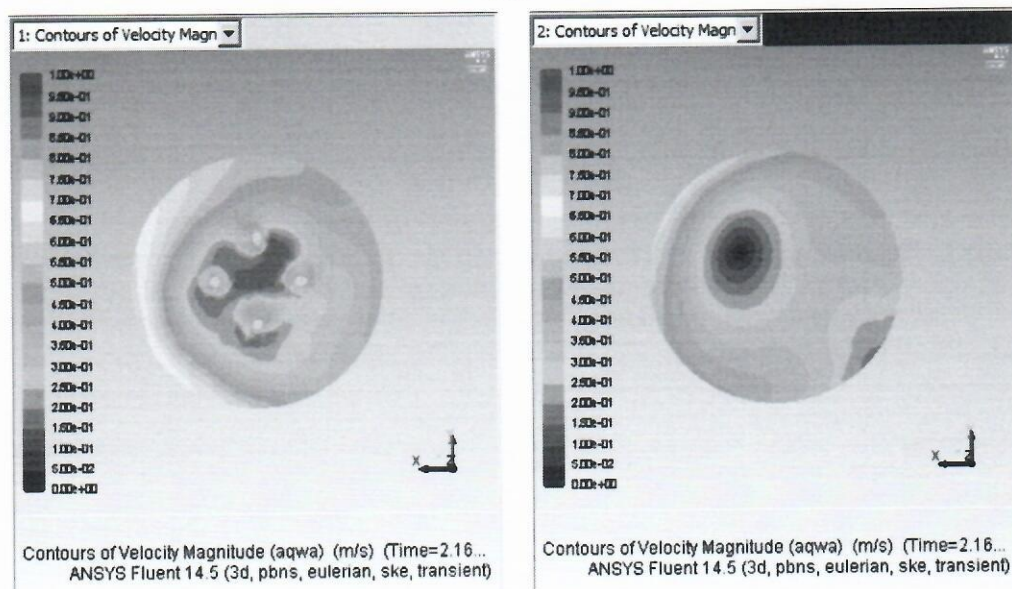


в)

г)

Рис. 29.: в) горизонтальная проекция на уровне диспергаторов;

г) горизонтальная проекция $\approx 3/4$ глубины камеры



д)

е)

д) горизонтальная проекция на уровне подачи питания;

е) горизонтальная проекция на уровне выхода пенного продукта

Рис. 29. – Проекция распределения скорости пульпы

Также в результате вычислительного эксперимента было получено распределение концентраций сепарационных фракций флотационной пульпы в рабочем объеме флотомашины. На рисунке 30 показаны изоповерхности равных концентраций различных сепарационных фракций, отличающихся крупностью и, следовательно, степенью раскрытия апатита.

В эксперименте определялись потоки масс сепарационных фракций через выхода пенного и камерного продуктов. Интегральные оценки технологических показателей флотации (Таблицы 31, 32) позволяют сделать вывод о близости их значений с соответствующими значениями технологических показателей основной флотации количественной схемы обогащения бедной апатитсодержащей руды.

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 количественной схемы в условиях производства и, тем самым, вовлечения в

переработку бедной апатитсодержащей руды при снижении энергозатрат на подготовительных операциях дробления и измельчения.

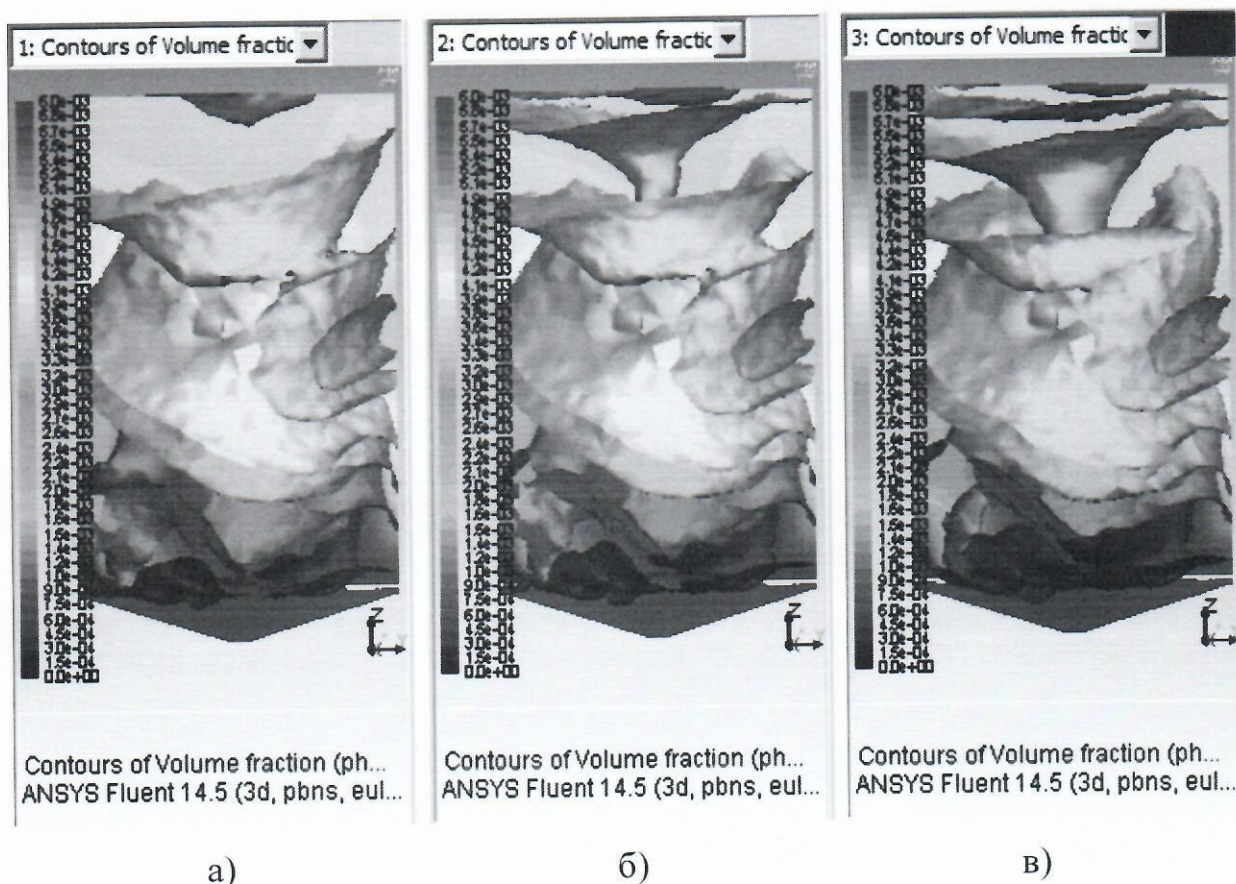


Рис. 30. – Изоповерхности равных концентраций различных сепарационных фракций: а) фракция $-0,15$ мм; б) фракция $-0,28$ мм; в) фракция $-0,40$ мм

Таблица 31. Выхода камерного и пенного продуктов в модели ГСПФ, %

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

Таблица 32. Содержание и извлечение P_2O_5 в продуктах модели ГСПФ, %

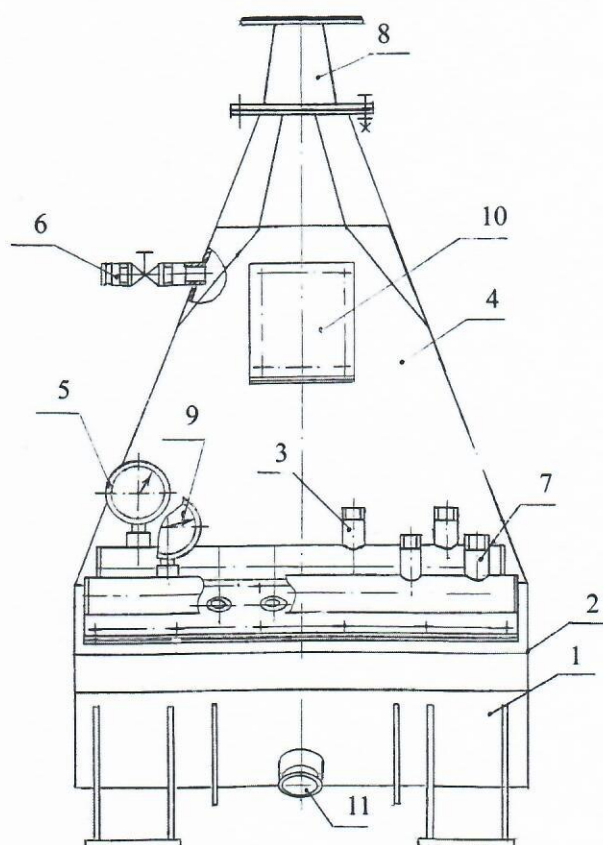
Параметр	Питание	Пенный продукт		Камерный продукт	
		По схеме	Модель	По схеме	Модель
β	4,25	9,53	8,34	1,44	1,77
ϵ	100	77,84	74,10	22,16	25,90

4.3. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ УСТРОЙСТВА ПРИГОТОВЛЕНИЯ И ДОЗИРОВАНИЯ АКТИВИРОВАННОЙ ВОДНОЙ ДИСПЕРСИИ ВОЗДУХА В ОСНОВНОЙ ФЛОТАЦИИ НЕФЕЛИНА В АО "АПАТИТ"

Анализ результатов исследований, ранее проведенных в ГоИ КНЦ РАН, показал, что при использовании в процессе обратной флотации нефелина собирателя в виде АВДВ из обесшламленных хвостов апатитового передела получают нефелиновые концентраты, удовлетворяющие по содержанию Al_2O_3 установленным кондициям. Устройство для приготовления и дозирования АВДВ в камеры промышленных флотомашин, разработанное в ГоИ КНЦ РАН, было установлено на первой машине нефелинового цикла АО "Апатит" с возможностью дозирования АВДВ в первые шесть флотационных камер. Параллельно опробовалась вторая флотомашинка, также состоящая из шести флотационных камер, принятая за эталон и работавшая в установленном на фабрике реагентном режиме. Целями промышленных испытаний были: проверка показателей полупромышленной технологии; изучение механической и технологической работоспособности устройства для приготовления и дозирования АВДВ; изучение устойчивости газожидкостной смеси по дисперсному составу газовой фазы в зависимости от пути транспортирования дисперсии от устройства до ввода ее в рабочую камеру флотомашинки.

В составе устройства (Рисунок 31): корпус 2; патрубки для подачи воздуха 3 и раствора ПАВ 7; манометры давления раствора ПАВ 9 и давления воздуха 5; сливное отверстие для аварийного выпуска раствора ПАВ из устройства 11; смотровое окно для визуального контроля за состоянием дисперсии 10; патрубок с вентилем 6 для отбора активированной газожидкостной смеси; сужающее устройство АВДВ 8.

Рис. 31. – Устройство для приготовления и дозирования АВДВ



- 1 – колоколообразная камера;
- 2 – корпус;
- 3 – патрубок для подачи воздуха;
- 4 – трапецеидальная камера;
- 5 – манометр давления воздуха;
- 6 – патрубок с вентилем для отбора поверхностно - активной газожидкостной смеси;
- 7 – патрубок для подачи раствора ПАВ;
- 8 – сужающий патрубок;
- 9 – манометр давления раствора ПАВ;
- 10 – смотровое окно для визуального контроля за состоянием дисперсии;
- 11 – сливное отверстие.

Для измерения и регулирования количества раствора ПАВ и воздуха на соответствующих трубопроводах была установлена запорная арматура и контрольно-измерительные приборы. Корпус устройства представляет собой емкость, выполненную из металла и включающую две последовательно соединенные камеры. Нижняя камера 1 имеет колоколообразную форму, выполненную в виде емкости в вертикальной плоскости, имеющую форму трапеции. Для ввода жидкости и газа колоколообразная камера оснащена патрубками, соединенными с компрессором и водяным насосом или с соответствующими магистралями. Угол "атаки" струи жидкости составляет 45° , что обеспечивает максимальный захват газа. Камера 4 предназначена для выдержки дисперсии и образования предельных (равновесных) адсорбционных пленок реагентов на поверхности пузырьков, заканчивается сужающим устройством 8, из которого готовая АВДВ транспортируется в трубопровод и поступает в периферийную зону импеллера рабочих камер флотомашин.

Принцип работы устройства АВДВ заключается в следующем. В объем аэрационного блока предварительно заполненного раствором ПАВ, через вводные

патрубки под определенным давлением подается воздух и раствор ПАВ. Подаваемый раствор ПАВ с помощью специального устройства и насадок формируется в струи. При ударе струи о поверхность жидкости образуется каверна, которая является источником аэрации. Диспергирование газа таким образом позволяет регулировать гранулометрический состав образующихся пузырьков как концентрацией ПАВ, так и скоростью течения сформированных струй раствора. Разбиваемый струями раствора ПАВ воздух переходит в пенообразное состояние и, поступая в камеру 4, выдерживается до образования на межфазной границе предельных (равновесных) адсорбционных пленок реагентов на поверхности пузырьков. Далее, приготовленная АВДВ вводится в камеру флотационной машины.

Особо следует отметить возможность регулирования дисперсности газовой фазы при постоянстве ее расхода. Этот фактор является одним из основных при флотационном разделении минералов.

Схема технологической установки для приготовления и дозирования собирательной смеси представлена на рисунке 32.

На схеме представлена связь элементов устройства для приготовления и подачи реагентов в виде АВДВ в камеру флотационной машины ОК-38 с целью интенсификации процесса флотационного извлечения нефелина и уменьшения расхода собирательной смеси. Устройство расположено на верхней площадке флотомашины ОК-38 8, для удобства ввода трубопровода дозирования готовой АВДВ 10 в зону импеллера 12, закрытого статором 13 и находящегося внутри корпуса камеры флотомашины ОК-38 14, и вращающегося с помощью двигателя привода импеллерного блока 11. Корпус флотомашины ОК-38 расположен на фундаменте 15. Для приготовления собирателя и дозирования его в виде АВДВ обеспечен подвод дополнительной воды (свежая вода обогатительной фабрики), раствора собирателя с концентрацией 2,2% и воздуха в смесительную камеру. К устройству должен быть обеспечен свободный доступ для визуального контроля над состоянием дисперсии и контроля коллекторов воздуха и раствора собирателя при профилактических осмотрах.

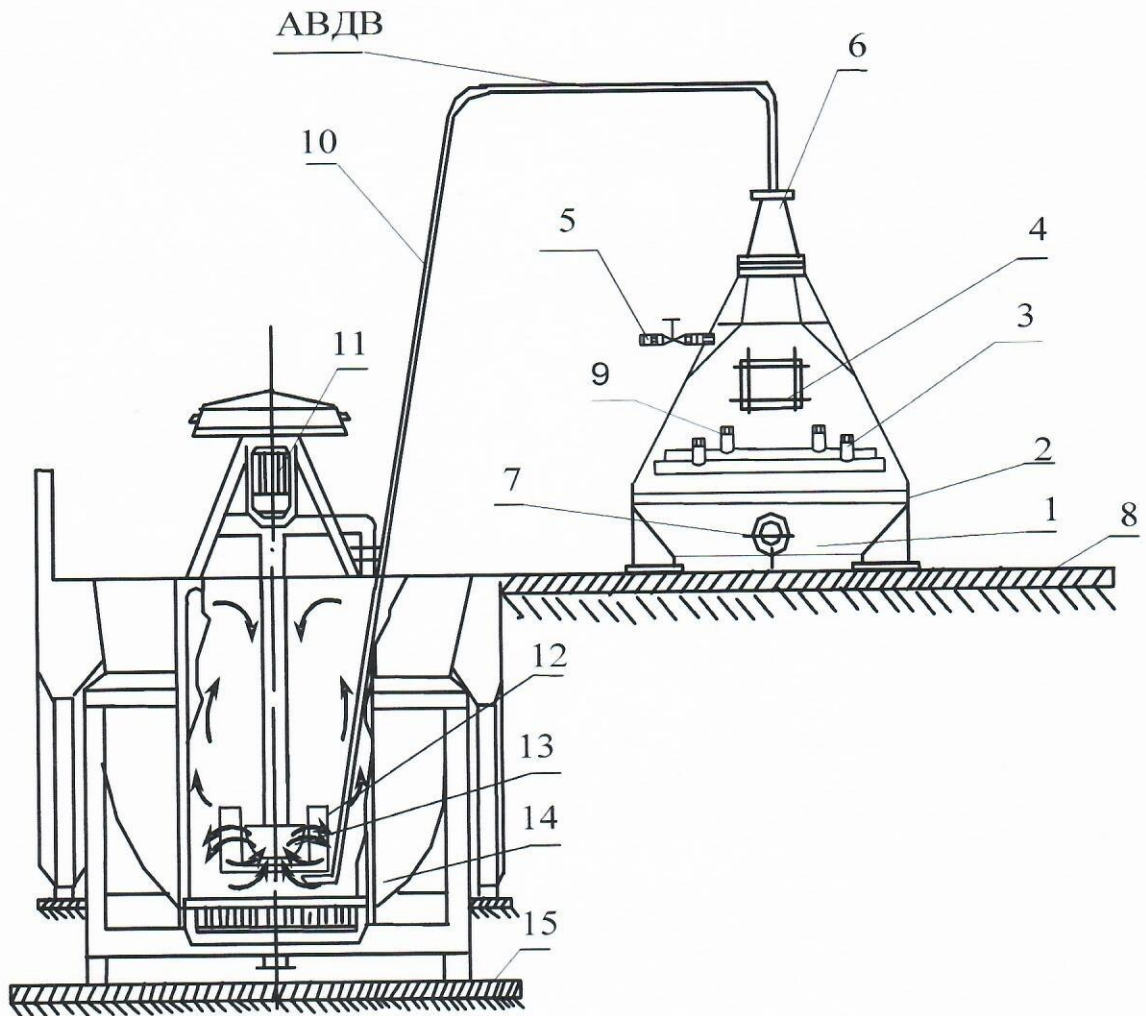


Рис. 32. – Схема подачи собирательной смеси с использованием устройств для приготовления и дозирования реагентов в камеру флотационной машины ОК – 38
 1 – колоколообразная камера; 2 – корпус устройства АВДВ; 3 – регистр распределения воздуха; 4 – смотровое окно для визуального контроля за состоянием дисперсии; 5 – патрубок с вентилем для отбора поверхностно-активной газожидкостной смеси; 6 – сужающее устройство АВДВ; 7 – сливное отверстие; 8 – фундамент; 9 – регистр распределения раствора ПАВ; 10 – трубопровод трансферта готовой АВДВ; 11 – двигатель привода импеллера; 12 – статор; 13 – импеллер; 14 – корпус флотационной машины ОК -38; 15 – фундамент флотационной машины ОК – 38.

Для обеспечения эффективной работы концентрация ПАВ не должна быть выше критической концентрации мицеллообразования, при которой не происходит уменьшение диаметра образуемых воздушных пузырьков. Регулирование технологическим процессом осуществляется с помощью изменения расхода собирателя в аэрационное устройство приготовления и дозирования реагентов в виде АВДВ.

Первый этап испытаний состоял в опробовании обратной нефелиновой флотации при стандартном режиме подачи собирателя в технологический процесс. Производилось опробование питания нефелиновой флотации, пенного и камерного продуктов основной флотации, флотационного нефелинового концентрата и определение в них содержания Al_2O_3 , а также замерялся расход собирателя, подаваемого во все точки технологического процесса. В период опробования содержание Al_2O_3 в питании нефелиновой флотации изменялось в пределах 20,44-22,37%, содержание основных компонентов в хвостах апатитовой флотации – эгирин 11,13-13,84%, полевой шпат 5,41-8,58%. Расход собирателя в среднем за весь этап составил при работе одного сушильного барабана 4,43 кг/т, при работе двух 3,33 кг/т.

На втором этапе испытаний собиратель в камеры основной флотации подавался через аэрационные устройства, предназначенные для приготовления и дозирования АВДВ. На основании результатов предварительных испытаний расход собирателя в основную нефелиновую флотацию был сокращен на 40%. Расход реагента в различных точках подачи варьировался в зависимости от качества питания флотации. Контролируемыми параметрами также были содержание Al_2O_3 в продуктах флотации, расход собирателя как по отдельным точкам, так и общий.

В ходе второго этапа испытаний было установлено, что малое сечение патрубков для подачи раствора ПАВ на первом устройстве АВДВ не позволяет установить необходимый расход, поэтому сечение патрубков было увеличено с 9 до 14 мм. При этом полученные результаты показали возможность получения качественного нефелинового концентрата при снижении расхода собирателя. В течение второго этапа испытаний содержание Al_2O_3 в питании нефелиновой флотации изменялось в пределах 20,82-21,89%, содержание в хвостах апатитовой флотации эгирина 12,51-13,24% и полевого шпата 7,15-7,81%. Расход собирателя в среднем за весь этап составил при работе одного сушильного барабана 3,32 кг/т, при работе двух 1,86 кг/т.

Условия проведения третьего этапа испытаний были идентичными условиям на двух предыдущих, то есть осуществлялось опробование и контроль тех же продуктов обогащения и контроль расхода собирателя. На третьем этапе опробования содержание Al_2O_3 в питании нефелиновой флотации изменялось в пределах 20,12-22,45%, содержание в хвостах апатитовой флотации эгирина 10,61-12,59% и полевого шпата 5,50-8,54%. Расход собирателя в среднем за весь этап составил при работе одного сушильного барабана 2,57 кг/т, при работе двух 2,14 кг/т.

В период испытаний технологии получения нефелинового концентрата с подачей собирателя традиционным способом и в виде АВДВ было установлено, что содержание основных компонентов в хвостах апатитовой флотации изменялось в пределах: при стандартном режиме подачи собирателя на первом этапе – эгирина 11,13-13,31%, полевого шпата 5,41-9,82%, Al_2O_3 в питании флотации 20,44-22,11%; при подаче собирателя в виде АВДВ на втором этапе в хвостах апатитовой флотации – эгирина 12,51-13,24%, полевого шпата 7,15-7,81%, Al_2O_3 в питании флотации 20,82-21,89%; на третьем этапе – эгирина 10,61-12,85%, полевого шпата 5,21-8,54%. Полученные концентраты на всех этапах соответствовали требованиям и в среднем при стандартном режиме содержание Al_2O_3 составляло при работе одного сушильного барабана 28,73%, при работе двух 28,60%; при подаче собирателя в виде АВДВ на втором этапе при работе одного сушильного барабана 28,15%, при работе двух 28,58%; при подаче собирателя в виде АВДВ на третьем этапе при работе одного сушильного барабана 28,51%, при работе двух 28,44%.

Результаты опробований показали, что кондиционный нефелиновый концентрат с содержанием Al_2O_3 выше 28,0% получается после основной флотации как в стандартном режиме (28,37%), так и в режиме подачи собирателя в виде АВДВ (28,34%). Снижение расхода собирателя в основную флотацию в сравниваемых режимах колебалось от 36 до 56%, что в абсолютных единицах составляла до 1,24 кг/т. При этом в период испытаний практически полностью в испытываемом режиме удалось отказаться от подачи собирателя в камеры

контрольной флотации, что не отразилось на качестве концентрата, а уменьшение расхода собирателя по сравнению со стандартным режимом флотации достигало 56%, что в абсолютных единицах составляет 2,2 кг/т.

Таблица 33. Результаты испытаний устройств приготовления и дозирования собирателя в виде АВДВ

Режим флотации	Смен	Расход собирателя, кг/т			$\Delta, \%$	Содержание Al_2O_3	
		Основная	Контрол.	Всего		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

4.4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СПОСОБА ПОДАЧИ АКТИВИРОВАННОЙ ВОДНОЙ ДИСПЕРСИИ ВОЗДУХА НА АЭРАЦИЮ ФЛОТАЦИОННОЙ ПУЛЬПЫ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

Одним из основных факторов, влияющих на эффективность процесса флотации, является состояние газовой фазы внутри рабочего объема камеры флотационной машины. Это состояние характеризуется распределением газовой фазы и ее диспергацией. Формирование стабилизированного градиентного поля концентрации газовой фазы в рабочем объеме камеры флотационной машины определяет устойчивость процесса флотации. От эффективности аэрации жидкой фазы зависят снижение доли «мертвых» зон в объеме камеры флотационной машины и возможность вовлечения в процесс флотации более крупных частиц,

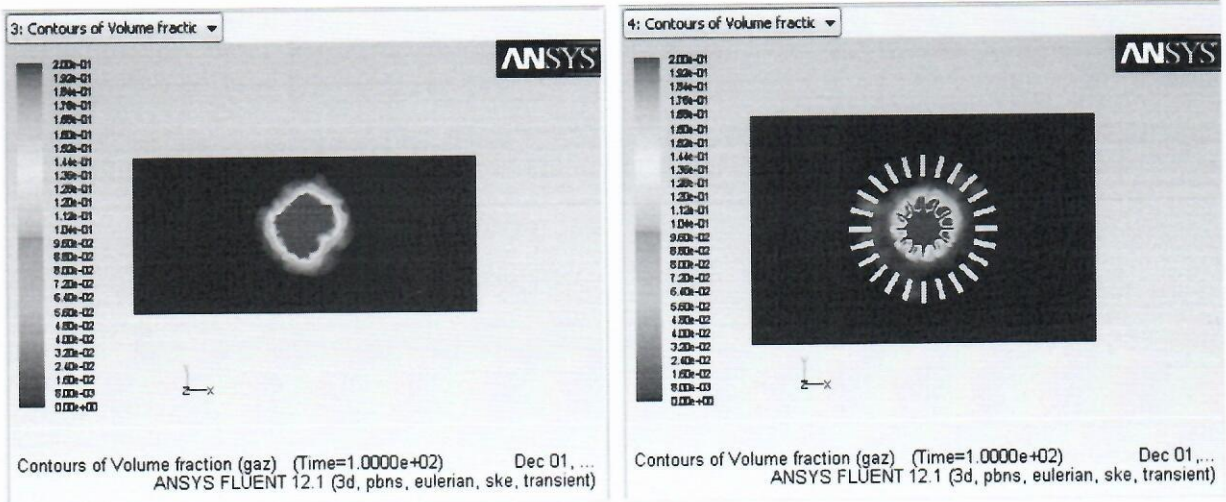
имеющих более высокие значения тангенциальной составляющей скорости. Одним из направлений интенсификации процесса флотации является использование АВДВ [114]. Эффективность применения АВДВ зависит, в том числе, от условий ее подачи в камеру флотационной машины.

На основе результатов промышленных испытаний далее для выработки рекомендаций по улучшению режимов применения АВДВ исследовалось влияние способа подачи АВДВ на повышение значений аэрации флотационной пульпы. Исследования проводились путем постановки вычислительных экспериментов в программной среде ANSYS Fluent. Моделированием штатного режима работы ОК-38 исследовалось распределение концентрации диспергированной газовой фазы в объеме флотационной камеры. Определяемой величиной являлось объемное содержание (*volume fraction*) газовой фазы, а расчетной величиной аэрация пульпы [$\text{л}/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$], определяемая согласно [115].

В пневмомеханических машинах ОК-38 воздух под давлением подается через канал вала импеллера и, попадая в камеру, диспергируется пластинами импеллера. В штатном режиме работы ОК-38 расход воздуха при диаметре канала 0,16 м – 0,25 м³/с и скорость вращения импеллера при диаметре 0,9 м 150 мин⁻¹.

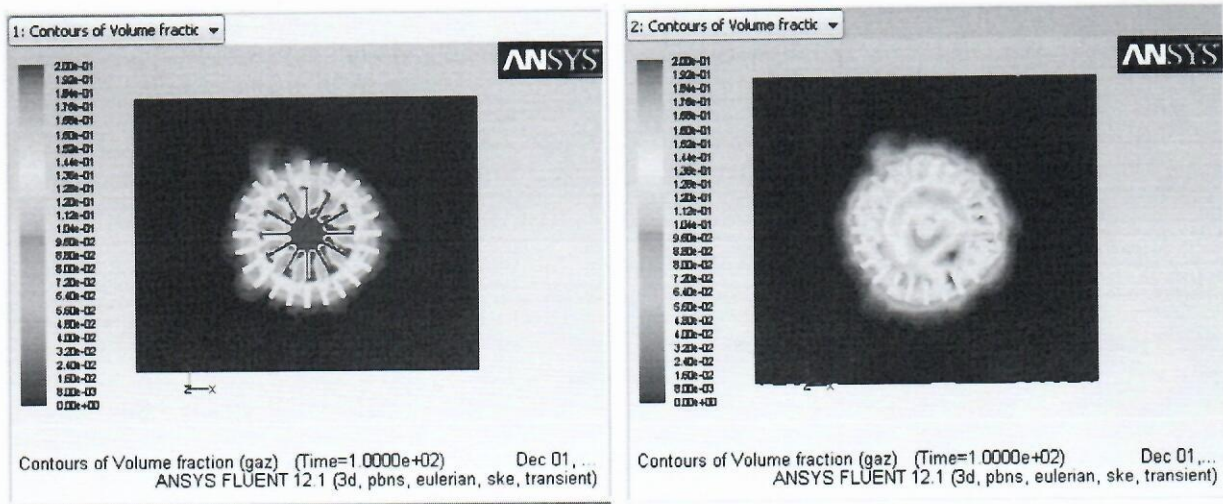
CFD моделированием штатного режима работы ОК-38 в ходе вычислительного эксперимента исследовалось распределение концентрации диспергированной газовой фазы в объеме флотационной камеры. Визуализация результатов вычислительного эксперимента в ANSYS Fluent показана на рисунке 33.

В результате эксперимента установлено, что распределение газовой фазы в объеме камеры флотационной машины характеризуется резкой неоднородностью поля ее концентрации. Высокие гидродинамические нагрузки при диспергации поступающего воздуха приводят к формированию центростремительных составляющих движения газовой фазы. Тенденция к стабилизации поля концентрации газовой фазы начинает складываться, отвечая выравниванию поля скоростей, связанному с образованием пенного слоя.



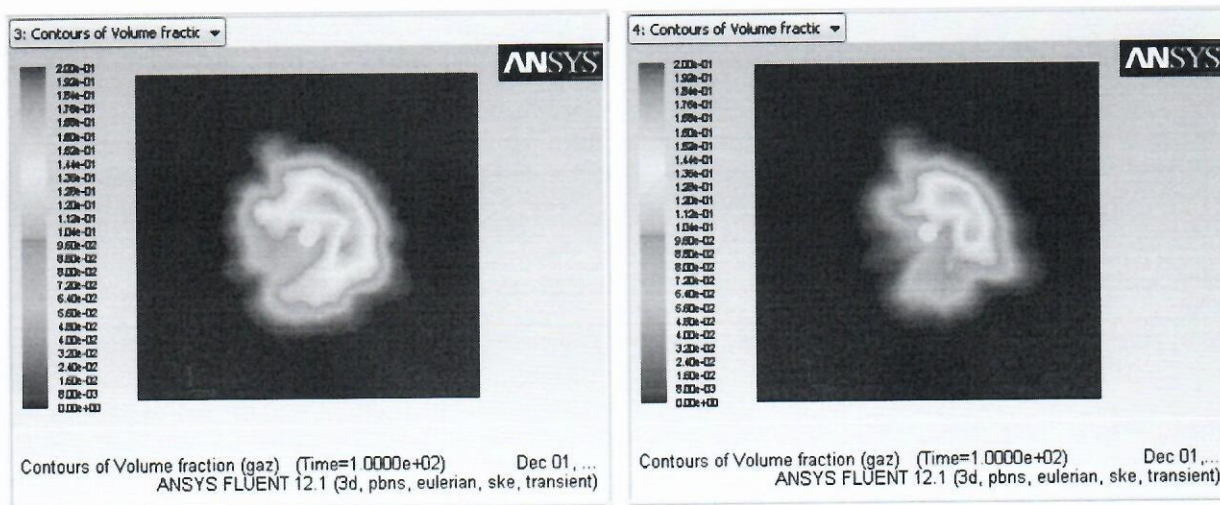
а)

б)

Рис. 33. Распределение газовой фазы по горизонту а) $-0,75$ м; б) $-0,50$ м

в)

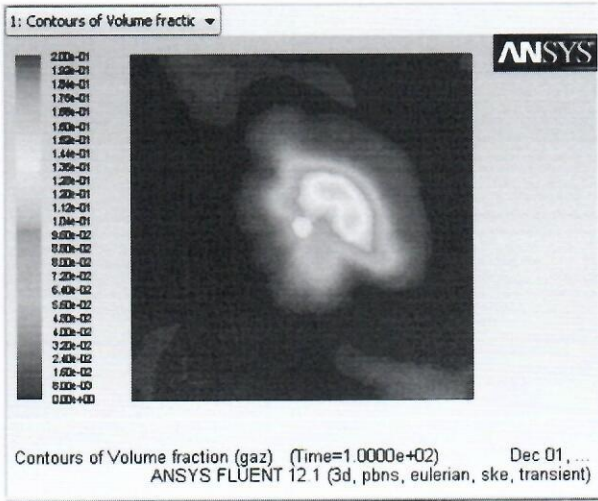
г)

Рис. 33. Распределение газовой фазы по горизонту в) $-0,25$ м; г) $0,00$ м

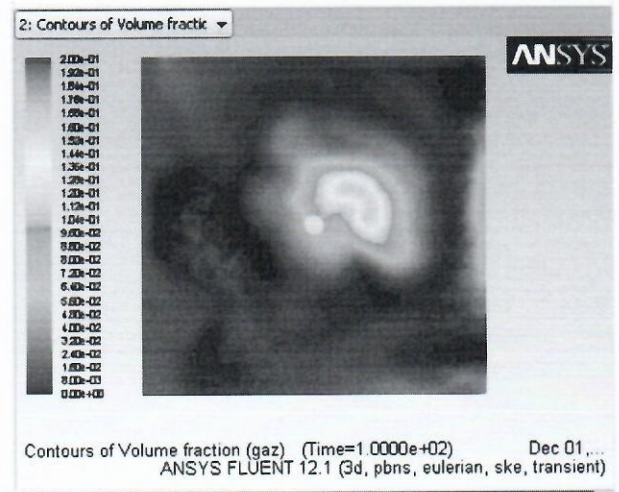
д)

е)

Рис. 33. Распределение газовой фазы по горизонту д) $0,25$ м; е) $0,50$ м

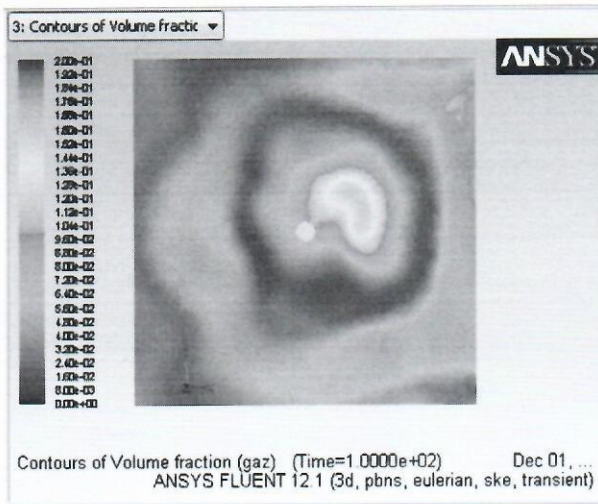


ж)

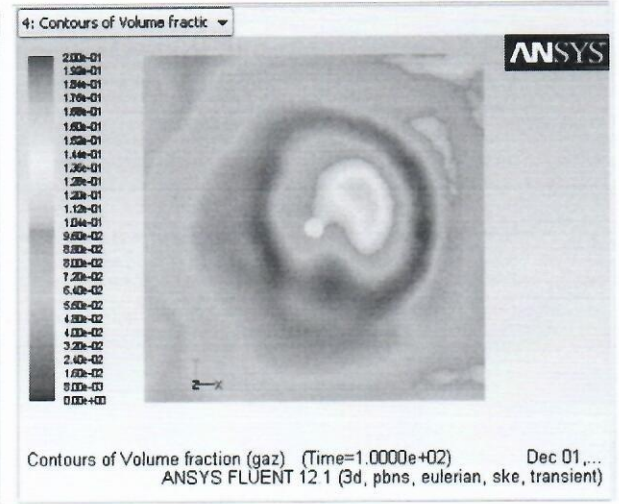


з)

Рис. 33. Распределение газовой фазы по горизонту ж) 0,75 м; е) 1,00 м

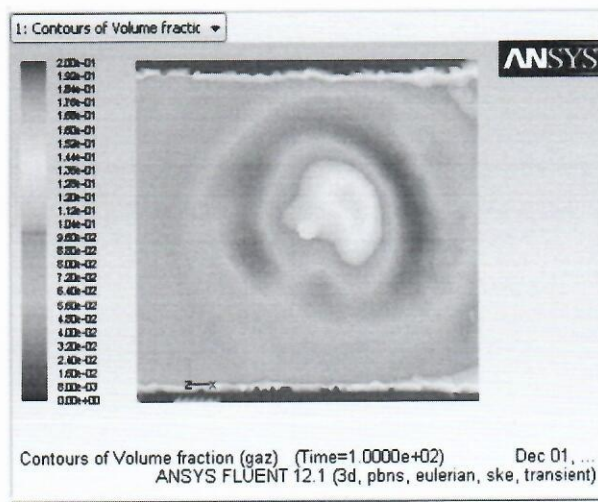


и)

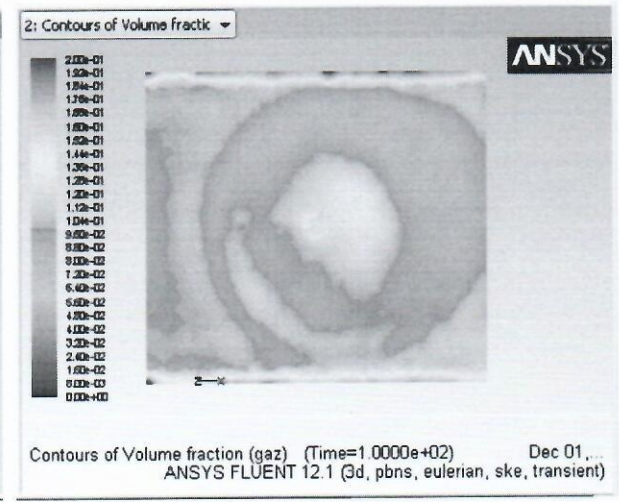


к)

Рис. 33. Распределение газовой фазы по горизонту и) 1,25 м; к) 1,50 м

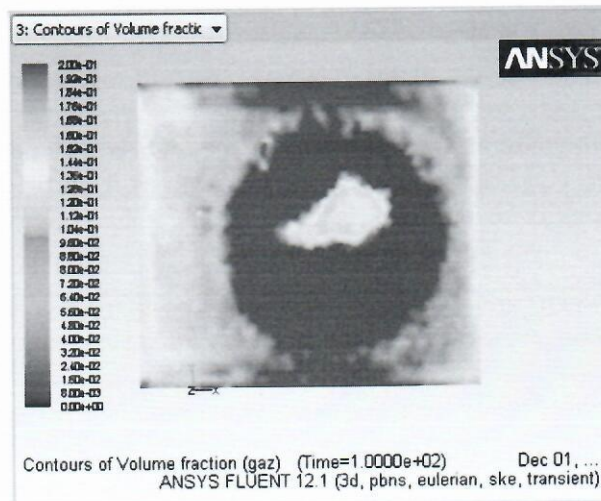


л)



м)

Рис. 33. Распределение газовой фазы по горизонту л) 1,75 м; м) 2,00 м



н)

Рис. 33. Распределение газовой фазы по горизонту н) 2,25 м

Рис. 33. Эпюры распределения газовой фазы по горизонтам камеры машины ОК-38 в штатном режиме (вид сверху, поток питания слева направо, вращение правовинтовое, шаг горизонта 0,25 м (нулевая отметка – верхняя плоскость диска импеллера))

В ходе исследований были выявлены возможности дальнейшего повышения эффективности флотации путем модификации конструкции для подачи активированной газо-жидкостной смеси, состоящей в оснащении камеры флотационной машины ОК-38 устройством радиального распределения (УРР) АВДВ, установленным в окружной зоне статора.

Постановка дальнейших вычислительных экспериментов базировалась на том, что при флотации после приготовления активированная газо-жидкостная смесь точно подается под импеллер, и вовлекается в процесс аэрации жидкой фазы дополнительно к воздуху, подаваемому через импеллер [116].

Также следует указать, что расчет величины аэрации пульпы производился на основе данных, полученных в вычислительных экспериментах по формуле [115]:

$$\alpha = \frac{Q \cdot V_f \cdot 10^3 \cdot 60}{S_z} \left[\frac{\text{л}}{\text{м}^2 \cdot \text{мин}} \right],$$

где: Q – секундный расход воздуха, S_z – площадь сечения камеры флотационной машины нормальной вертикальной оси на высоте z , V_f – объемное содержание (*volume fraction*) газовой фазы.

Для обоснования модификации конструкции для подачи активированной газо-жидкостной смеси были разработаны CFD-модели процесса аэрации при точечной подаче и при использовании для подачи АВДВ УРР. На рисунке 34 приведены соответствующие конструктивные модификации камеры флотационной машины ОК-38.

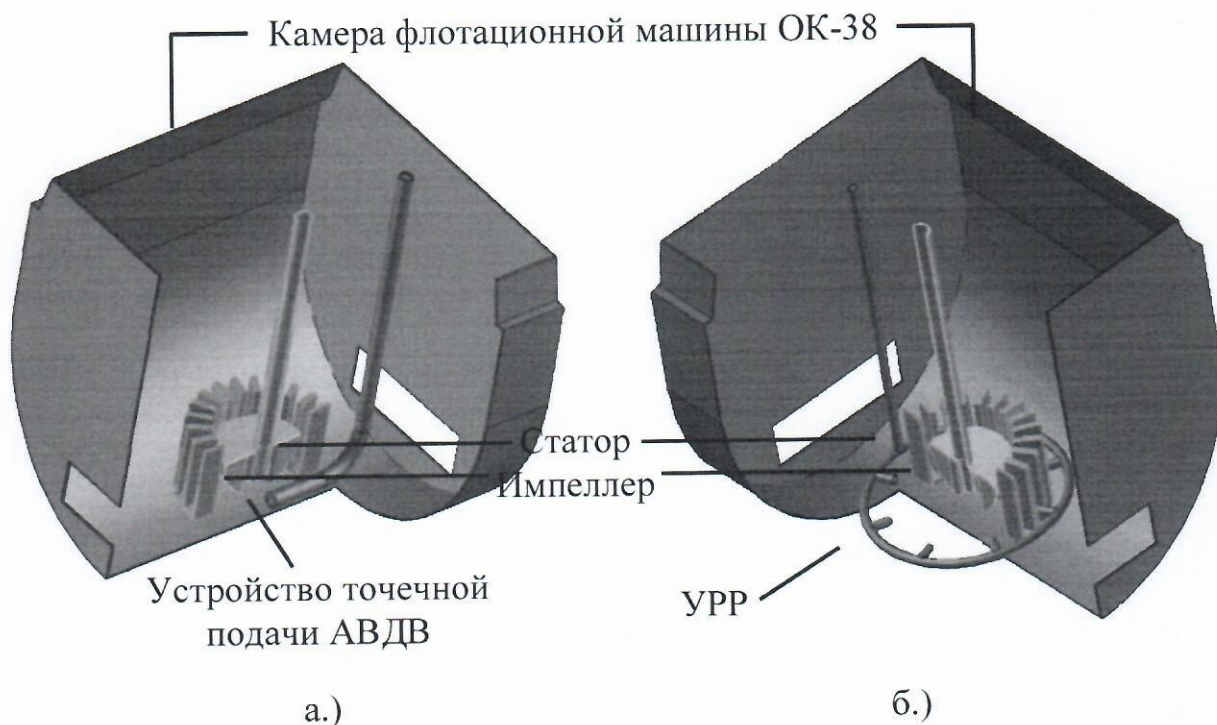


Рис. 34. – Конструктивные модификации камеры флотационной машины ОК-38, а.) – с точечной подачей АВДВ; б.) – с УРР

Форсунки УРР расположены в горизонтальной плоскости таким образом, что поток активированной газо-жидкостной смеси направлен противоположно радиальной составляющей скорости пузырьков воздуха, подаваемого через вал импеллера. Это обеспечивает интенсивное перемешивание пузырьков газовой фазы, а формирование области пониженного давления за внешним геометрическим контуром статора позволяет осуществлять более интенсивную и равномерную

аэрацию придонных областей камеры при сниженной напряженности поля скоростей пульпы.

При построении моделей использование сеточного генератора Gambit позволило создать расчетные сетки моделей с учетом применения технологии Dynamic Mesh, которая обеспечивает сопряжение движущихся и неподвижных подобластей модели через поверхности сетки абсолютно проницаемые для вещества и энергии (Mesh Interface). На рисунке 35 приведена проекция расчетной сетки на поверхность УРР.

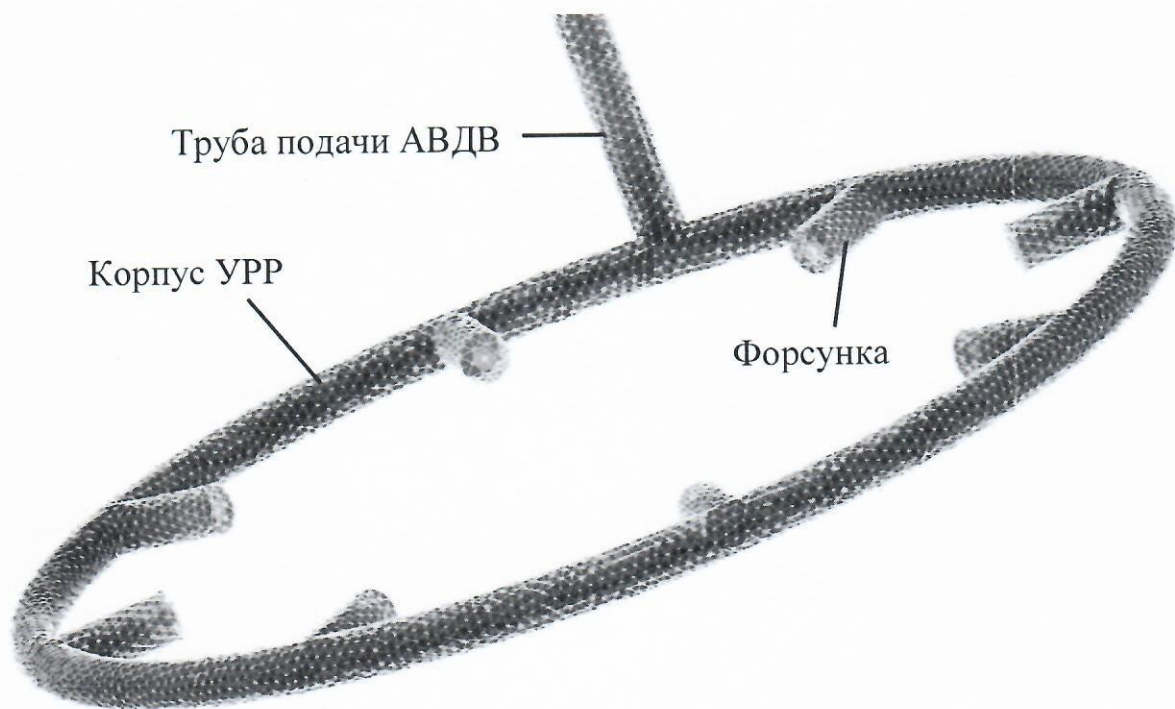


Рис. 35. – Проекция расчетной сетки на поверхность УРР.

Важно, что начальные условия всех вычислительных 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 $4 \div 1$.

На рисунке 36 приведены графики распределения аэрации пульпы по высоте камеры флотационной машины ОК-38 в штатном режиме работы (подача

воздуха через вал импеллера с последующей диспергацией на его лопатках) – А; Б и В – зависимости, полученные при различных способах подачи в камеру АВДВ.

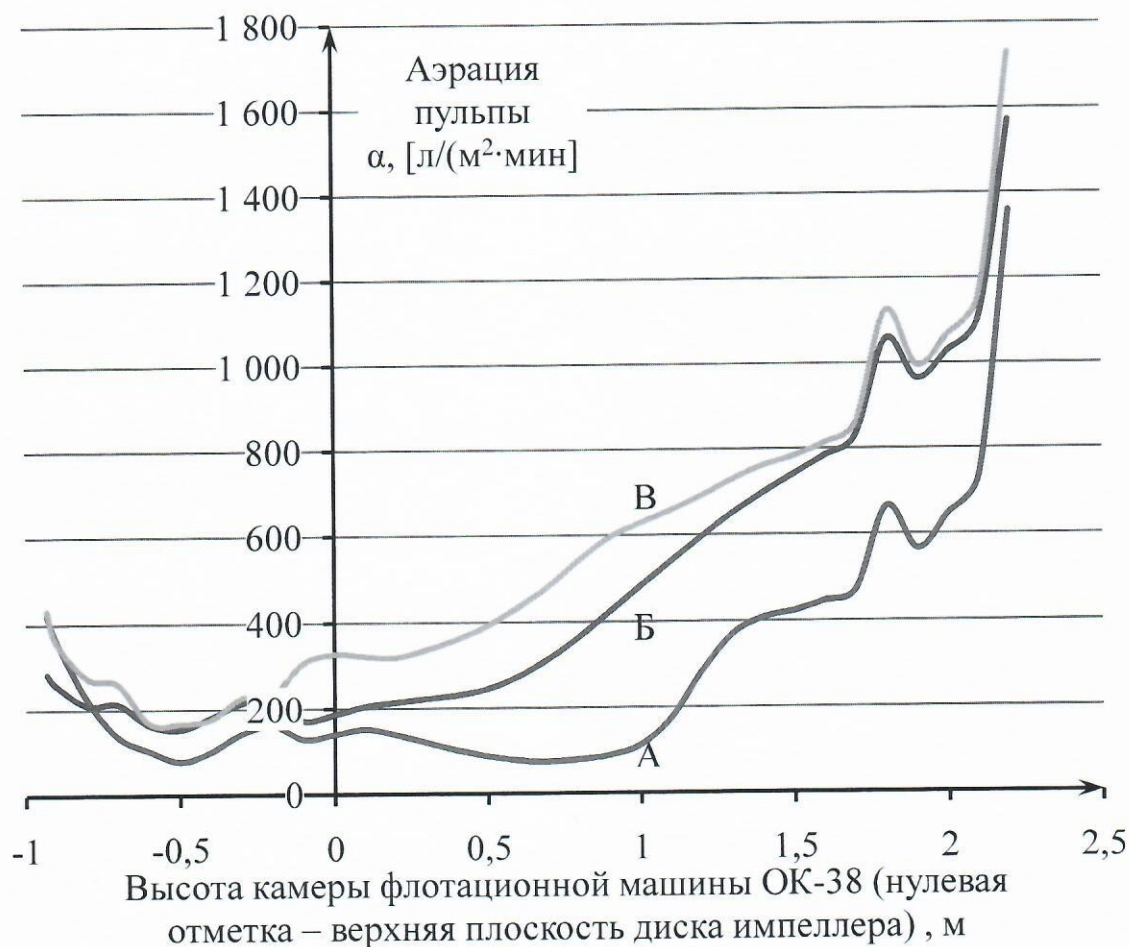


Рис. 36. – Изменение аэрации пульпы по высоте камеры флотационной машины ОК-38

А – штатный режим работы; Б – режим с точечной подачей АВДВ; В – режим с подачей АВДВ через устройство радиального распределения

В ходе вычислительных экспериментов выявлены закономерности распределения газовой фазы в стационарном режиме работы камеры флотационной машины ОК-38 в случае точечной подачи АВДВ (Рисунок 36, Б) и в случае подачи АВДВ через устройство радиального распределения (Рисунок 36, В). Получены данные об объемном распределении концентраций газовой фазы. При этом установлены доли газовой фазы, формирующиеся при диспергации воздуха на лопатках импеллера и поступающие в процесс флотации в виде АВДВ (Таблица 34).

Таблица 36. Распределение газовой фазы в объеме камеры флотационной машины ОК-38 в штатном режиме и при различных режимах подачи АВДВ (в единицах аэрации пульпы α , [л/(м²·мин)])

Высота камеры	Штатный режим	Режим точечной подачи АВДВ					Режим подачи АВДВ через УРР				
		Через импеллер		АВДВ		Всего	Через импеллер		АВДВ		Всего
м	α	α	%	α	%	α	α	%	α	%	α
-0,93	421	245	86	39	14	284	431	100	0	0	431
-0,80	224	174	83	36	17	210	274	100	0	0	274
-0,60	102	148	90	16	10	164	168	100	0	0	168
-0,40	100	165	92	15	8	181	154	88	22	12	176
-0,20	161	205	93	14	7	219	215	92	18	8	233
0,00	139	168	90	18	10	186	290	89	37	11	327
0,20	137	188	88	26	12	214	263	82	56	18	319
0,40	101	197	86	33	14	230	284	79	77	21	361
0,60	77	232	85	41	15	273	348	80	87	20	434
0,80	78	317	87	49	13	366	455	84	87	16	542
1,00	112	429	89	53	11	482	545	87	83	13	628
1,20	285	542	91	54	9	596	611	88	80	12	692
1,40	408	643	92	55	8	698	682	90	79	10	762
1,60	446	727	93	58	7	785	734	90	80	10	814
1,80	665	978	93	79	7	1057	1018	91	105	9	1123
2,00	647	966	94	62	6	1028	976	92	90	8	1066
2,20	1358	1483	94	87	6	1570	1591	92	137	8	1728

Таким образом, при неизменном расходе воздуха применение АВДВ позволяет значительно увеличить аэрацию пульпы, а использование устройства радиального распределение не только повышает аэрацию пульпы, но и увеличивает долю участия во флотации активированной поверхности границы раздела газовой и жидкой фазы.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

Проведены лабораторные исследования по флотации бедной апатитсодержащей руды в режимах пенной сепарации, комбинированной флотации и флотации в АВДВ. Исследования показали принципиальную возможность использования АВДВ для флотации апатитсодержащих руд грубого помола с низким содержанием полезного компонента. При этом было установлено, что флотация в АВДВ обеспечивает существенное снижение общего расхода собирателя, что способно уменьшить себестоимость апатитового концентрата и благотворно влиять на повышение уровня экологизации производства.

На основе качественно-количественной схемы обогащения бедной апатитсодержащей руды с применением АВДВ, разработанной ранее в ГоИ КНЦ, в вычислительном эксперименте исследована возможность применения стандартного флотационного оборудования для проведения основной флотации бедной апатитсодержащей руды по приведенной схеме. Результаты эксперимента показали, что 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 качественно-количественной схемы и, тем самым, вовлечения в переработку бедной апатитсодержащей руды при снижении энергозатрат на подготовительных операциях дробления и измельчения.

Рассмотрены результаты промышленных испытаний устройства приготовления и дозирования АВДВ в основной флотации нефелина в АО "Апатит". Показано, что оно является эффективным средством интенсификации флотационного обогащения хвостов апатитового цикла с получением кондиционного нефелинового концентрата. Установкой дополнительных

аэрационных устройств к камерам флотационных машин ОК-38, работающих в операции основной нефелиновой флотации, достигнуто снижение суммарного расхода собирателя более чем на 30% при сохранении качества нефелинового концентрата. В ходе испытаний выявлена зависимость эффективности флотации в АВДВ от соотношения количеств дополнительной воды и собирателя. При близости данного соотношения к 1:1 обеспечивается максимальная активность приготавливаемой газожидкостной смеси и повышение эффективности выделения нефелина крупных фракций. Результаты испытаний показали, что на распределение дисперсной газовой фазы по объему флотационной камеры, в том числе, влияет выбор точки ввода АВДВ.

Исследовано влияние способа подачи АВДВ на результат аэрации флотационной пульпы в камере флотомашини ОК-38. Результатами моделирования показана резкая неоднородность поля концентрации газовой фазы и обоснована ее зависимость от поля скоростей в объеме камеры флотационной машины. Предложен прототип устройства радиального распределения АВДВ, предполагающий, что подача активированной газо-жидкостной смеси противоположно радиальной составляющей скорости пузырьков воздуха, подаваемого через вал импеллера, обеспечит интенсивное перемешивание пузырьков газовой фазы, а формирование области пониженного давления за внешним геометрическим контуром статора позволит осуществлять более интенсивную и равномерную аэрацию придонных областей камеры при сниженной напряженности поля скоростей пульпы. Приведен сравнительный анализ результатов различных режимов подачи АВДВ, показавший большую эффективность использования предложенного устройства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе, направленной на развитие представлений о движении и распределении компонентов гетерогенных сред процессов флотации в активированных водных дисперсиях воздуха, прослеживается два, на первый взгляд, самостоятельных направления. Это внедрение в способы исследования и прогнозирования процессов флотации компьютерного моделирования с аналитической проработкой условий однозначности математических моделей гетерогенных сред и дальнейшее исследование процессов флотации минералов в активированных водных дисперсиях воздуха.

Решение поставленных в работе задач осуществляется комплексом аналитических исследований, разработкой новых методов и подходов к подготовке и проведению вычислительного эксперимента, проведением лабораторных исследований и анализом результатов промышленных испытаний. В работе акцентированы вопросы о возможностях вычислительного эксперимента и его верификации, что на сегодняшний день является одной из основных проблем внедрения современных информационных технологий в теорию и практику обогащения минерального сырья.

В главе 2 рассмотрен алгоритм оценки площади и толщины адсорбционного слоя на поверхности газ-жидкость в АВДВ. Алгоритм разработан при выполнении работы. Показана возможность применения алгоритма в исследовательских и технологических целях для получения информации о распределении газовой фазы и степени готовности АВДВ в объеме ее приготовления. Далее в Главе 3 с использованием названного алгоритма выявлены зависимости удельной площади поверхности раздела газ-жидкость и толщины адсорбционного слоя на поверхности пузырьков воздуха от вида и концентрации гетерополярного ПАВ при приготовлении АВДВ. Показано, что, с практической точки зрения применение алгоритма, уже на стадии приготовления АВДВ обеспечивает

возможность управления режимами флотации, а с точки зрения исследования процесса флотации, оценка толщины адсорбционного слоя позволяет судить о численных значениях адсорбции реагентов на поверхности пузырьков воздуха, – величине, лежащей в основе теории флотации.

Также в главе 2 описан алгоритм предлагаемого метода инициализации узких сепарационных фракций для проведения вычислительного эксперимента над моделью гетерогенной среды процесса флотации. Разработка метода, вне зависимости от оценок степени его полноты и точности, которые, безусловно, могут улучшаться в дальнейшем, является необходимой составляющей применения вычислительной гидродинамики в исследованиях флотационного разделения минералов, поскольку теория оперирует лишь универсальными системами фундаментальных уравнений, а их "привязка" к конкретной гетерогенной среде осуществляется набором конечных значений физических и физико-химических свойств ее компонентов. На основе метода в Главе 3 определены конечные значения величин свойств УСФ, интерпретируемые в дальнейшем как условия однозначности математической модели гетерогенной среды процесса флотации хвостов апатитового производства при получении нефелинового концентрата в АО "Апатит". В вычислительном эксперименте выявлены закономерности распределения концентраций и скоростей УСФ в камере флотационной машины и показана возможность интерпретаций распределения объемных фракций компонентов среды флотации, дающего представление о внутренней кинетике процесса и формировании продуктов разделения минералов.

В Главе 4 описаны лабораторные исследования флотации бедных апатитсодержащих руд в режимах пенной сепарации, комбинированной флотации и флотации в АВДВ. Показано, что при равной эффективности процессов разделения применение АВДВ позволяет добиваться лучших показателей обогащения и кратного снижения общего расхода собирателя. С одной стороны, это обозначает перспективы снижения затрат обогатительных предприятий на проведение операций дробления и измельчения и снижение техногенной нагрузки

на окружающую среду, с другой стороны, ставит задачи совершенствования способа и аппаратов для флотации руд в АВДВ.

Флотация в АВДВ отличается меньшей селективностью, что отражено в работе, однако использование этого метода в основной флотации бедных апатитсодержащих руд грубого помола, позволяет коренным образом изменить вещественный баланс процесса разделения и уже в голове переработки вывести отвальные хвосты и далее получать апатитовый концентрат с извлечением до 90%. Поскольку такой подход имел только лабораторную апробацию, был подготовлен и проведен вычислительный эксперимент, позволивший обосновать в работе возможность применения стандартного флотационного оборудования для проведения основной флотации бедной апатитсодержащей руды по приведенной схеме.

Рассмотрены и проанализированы результаты промышленных испытаний устройства приготовления и дозирования АВДВ в основной флотации нефелина на АНОФ-2 АО "Апатит". Показано, что использование АВДВ при флотации нефелина позволяет получать кондиционный концентрат при значительном диапазоне состава и качества исходного питания, что в условиях производства зависит от множества природных и технологических факторов. Также показано, что использование АВДВ способно значительно снизить суммарный расход флотационных реагентов при сохранении значений содержания и извлечения полезных минеральных компонентов в получаемых концентратах.

В развитие технологических особенностей устройства приготовления и дозирования АВДВ описаны вычислительные эксперименты, целью которых являлось исследование влияния способа подачи АВДВ на результат аэрации флотационной пульпы в камере флотационной машины ОК-38. На основе полученных результатов и их анализа предложен прототип устройства радиального распределения АВДВ, предполагающий, что поток активированной газо-жидкостной смеси будет направлен противоположно радиальной составляющей скорости пузырьков воздуха, подаваемого через вал импеллера, что обеспечит интенсивное перемешивание пузырьков газовой фазы, а

формирование области пониженного давления за внешним геометрическим контуром статора позволит осуществлять более интенсивную и равномерную аэрацию придонных областей камеры при сниженной напряженности поля скоростей пульпы.

Тем самым, задачи, поставленные в работе, решены. Обобщая итоги работы, можно заключить, что в ней, на основе вновь полученного и существующего опыта, предложены пути совершенствования способа флотации минералов в активированных водных дисперсиях воздуха как в теоретическом, так и в практическом аспектах. При этом в работе обосновано использование в ходе исследований вычислительного эксперимента, позволяющего получать принципиально новую качественную и количественную информацию о гетерогенной среде процесса флотации.

СОКРАЩЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В РАБОТЕ

1. ПАВ - поверхностно активное вещество.
2. АВДВ - активированная водная дисперсия воздуха (активированная газожидкостная смесь).
3. АО "Апатит" - Кировский филиал АО "Апатит" группы предприятий ФОСАГРО.
4. ГСПФ - гетерогенная среда процесса флотации.
5. ГоИ КНЦ РАН - обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр "Кольский научный центр Российской академии наук" Горный институт КНЦ РАН.
6. CFD - Computational Fluid Dynamics (Вычислительная гидродинамика).
7. УСФ - узкая сепарационная фракция.
8. ММК - многоскоростной многофазный континуум.
9. УРР - устройство радиального распределения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глембоцкий В.А., Классен В.И. Флотация. - М.: Недра, 1973. - 384 с.
2. Чантурия В.А. Предисловие к сборнику: Современное состояние и перспективы развития теории флотации. // Сб. тр. под ред. Ласкорина Б.Н. - М.: Наука, 1979. - 306 с.
3. Зуев В.В., Поцелуева Л.Н., Гончаров Ю.Д. Кристаллоэнергетика как основа оценки свойств твердотельных материалов. - СПб. 2006. - 139 с.
4. Ферсман А.Е. Геохимия. Т.3. - Л.: ОНТИ - Химтеорет. 1937. - 503 с.
5. Guimaraes R.C., Peres A.E.C. Industrial practice of phosphate ore flotation at Serrana-Arax'a, Brazil. // Proceeding of the XXI International Mineral Processing Congress, Rome, July 23-27, 2000. - Amsterdam etc.: Elsevier, 2000. - Oral Sessions, Vol. B.
6. Yoon R.H. The role surface in flotation kinetics. // Proceeding of the XXI International Mineral Processing Congress, Rome, July 23-27, 2000. - Amsterdam etc.: Elsevier, 2000. - Oral Sessions, Vol. B.
7. Глембоцкий В.А. Исследования раздельного кондиционирования песков и шламов перед их совместной флотацией с целью интенсификации флотационного процесса // Материалы VIII Международного конгресса по обогащению полезных ископаемых. Т.2. - Л. 1969. - С. 399-408.
8. Славин Г.П. Флотация и флотогравитация крупновкрапленных руд. - М.: Госгортехиздат. 1960. - 132 с.
9. Shen W.Z., Fornasiero D., Ralston J. Flotation of sphalerite and pyrite in the presence of sodium sulfite // Int. J. Mineral Process. 2001, 61, №1. - P. 17-28.
10. Белобородов В.И., Захарова И.Б., Неволина В.Г. Создание прогрессивной технологии обогащения бадделитсодержащих продуктов и опыт ее внедрения на Ковдорском ГОКе. // Обогащение руд. 1996. №1. - С. 42-45.

11. Дуденков С.В., Шубов Л.П., Глазунов Л.А. Основы теории и практики применения флотационных реагентов. - М.: Недра. 1969. - 290 с.
12. Классен В.И. Проблемы теории действия аполярных реагентов при флотации. Физико-химические основы действия аполярных собирателей при флотации руд и углей. - М.: Наука. 1965. - С. 3-11.
13. Rearce W.E. Progress in froth flotation. // Mining Congress Journal, 1962, 48. №5. - P. 37-40.
14. Дебердеев И.Х., Рубинштейн Ю.Б., Романов В.К. Современные направления конструирования флотационных машин. - М.: ЦНИИУголь. 1985, вып.6. - 60 с.
15. Мещеряков Н.Ф. Перспективы совершенствования и развития флотационной техники. // Цветная металлургия. 1993. №11. - С. 6-7.
16. Небера В.П., Соболев Д.С. Состояние и основные направления развития флотации за рубежом. - М.: Недра. 1968. - 326 с.
17. Solozenkin P.M., Nebera V.P., Skorochodov V.F. The ores Flotation bubbles containing surficant films. // XXII IMPC (International Mineral Processing Congress), Cape Town, 28 September – 3 October, 2003, New tracking № 227.
18. Скороходов В.Ф., Месяц С.П., Никитин Р.М. Очистка сточных вод горнорудных предприятий. IX Конгресс обогатителей стран СНГ, Москва, 26-28 февраля 2013. // Сборник материалов т.II. - С. 522-524.
19. 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.
20. Скороходов В.Ф., Шилин В.Б. Новая пневматическая флотомашина для разделения руд в активированных водных дисперсиях воздуха. // Сб. научных трудов "Развитие экологически безопасных технологий переработки минерального сырья". Апатиты, КНЦ РАН. 1996. - С. 95-102.

21. Абрамов А.А. Флотационные методы обогащения. - М.: Недра. 1984. - 382 с.
22. Богданов О.С., Максимов И.С., Поднек А.К. и др. Теория и технология флотации руд. - М.: Недра. 1990. - 363 с.
23. Богданов О.С., Кизельватер Б.В. Некоторые итоги изучения физики флотационного процесса. - М.: Metallurgizdat. 1952. - 86 с.
24. Классен В.И., Мокроусов В.А. Введение в теорию флотации. - М.: Госгортехиздат. 1959. - 636 с.
25. Таггарт А.Ф. Справочник по обогащению полезных ископаемых. - М.: Metallurgizdat. 1952. Т.3. - 991 с.
26. Алейников Н.А. Образование и свойства адсорбционных дисперсных систем. // ЖПХ. 1949. - Т. XXII. № 8. - С. 812-822.
27. Уорк У. Принципы флотации. - М.: Metallurgizdat. 1943. - 204 с.
28. Классен В.И., Тихонов С.А. Действие олеата натрия на флотационные свойства поверхности пузырьков воздуха. // Цветные металлы. 1960. № 10. - С. 12-14.
29. Тихомиров В.К. Пены. Теория и практика их получения и разрушения. - М.: Химия. 1975. - 264 с.
30. Эйгелес М.А. О механизме флотационного прилипания. // Цветные металлы. 1963. № 3. - С. 5-10.
31. Глембоцкий В.А., Соложенкин П.М., Гиацинтова К.В. О кинетике физико-химических процессов, протекающих на поверхности раздела фаз жидкость-газ. // Физико-химические основы комплексной переработки руд Средней Азии. Душанбе. 1970. - С. 5-10.
32. Тюрникова В.И., Наумов М.Е., Рубинштейн Ю.Б. Некоторые особенности процесса минерализации в вертикальной противоточной машине (ФППМ). Труды Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института твердых горючих ископаемых. 1973. Т. III, вып. I. - С. 43-50.
33. Kurkarni R., Somasundaran P. Kinetics of oleate adsorption at the lignin / air interface and its role in hematite of flotation. // AXNE Symposium Series, 1975. - 71, N 150. - P. 124-133.

34. Шахматов С.С., Усачев П.А., Ефремов А.Г. и др. Применение флотоотсадки для обогащения немагнитных продуктов. // Горный журнал. 1964. № 7. - С. 60-62.
35. Шахматов С.С. Получение кондиционных фосфоритовых концентратов Кингисеппского месторождения. // Доклады на отраслевом научно-техническом совещании работников горно-химической промышленности. - М.: 1971. - С. 82-83.
36. Духин С.С., Дерягин Б.В. Теория движения минеральных частиц вблизи всплывающего пузырька в применении к флотации. // Изв. Ан СССР, ОТН. Metallургия и топливо. 1959. № 1. - С. 123-127.
37. Глембоцкий В.А. Физико-химия флотационных процессов. - М.: Недра. 1972. - 392 с.
38. Адам Н.К. Физика и химия поверхностей. - М.: Гостехиздат. 1947. - 147 с.
39. Сквирский Л.П., Абрамзон А.А., Чернятьева В.К., Майофис А.Д. Определение предельной концентрации неионогенных поверхностно-активных веществ при адсорбции на границе раздела газ-жидкость. // Коллоидный журнал. 1973. № 4. - С. 786-789.
40. Majama K. Radiotracer studies on adsorption of surface active substance at aqueous surface. The effects of salt on the adsorption of sodium dodecylsulfate. // Bul Chem. Sol. Japan. 1971. 44. № 7. - P. 1767-1771.
41. Frinch J.A., Smith G.W. Dynamic surface tension of alkaline dodecylamine acetate solutions in oxide flotation. // Trans, Inst. Mining and Met. 1972. № 121. - P. 213-218.
42. Пат. 4186094 США, 210-221P. Apparatus for eliminating by flotation impurities in the form of solid particles contained in a liquid. - O.G., V. 90. № 5.
43. А.с. СССР 1026832, ВОЗД1/14. Флотационная машина / Власов В.Н., Мухин Ж.Г., Трегубов Б.Г. и др. - Б.И. № 25, 1983.
44. А.с. СССР 1143171, ВОЗД1/14. Флотационная машина вибрационного типа по а.с. № 1058624 / Любимов А.Н. - Б.И. № 8, 1985.

45. А.с. СССР 860867, ВОЗД1/14. Вибрационная флотационная машина / Федотов А.М., Денисов Г.А., Тетерникова В.И. и др. - Б.И. № 33, 1981.
46. Пат. 3140966 ФРГ, ВОЗД1/16. Verfahren und Flotationszelle zur Flotation von Kohle und Erz / Heintges S., Alizadeh A., Simonis W. - Auszuge aus den Offelegungsschriften, 1983, № 18.
47. А.с. СССР 1117085, ВОЗД1/14. Флотационная машина / Мещеряков Н.Ф., Иванов А.С., Классен В.И. и др. - Б.И. № 37, 1984.
48. А.с. СССР 1108078, СО2F3/24. Устройство для аэрации жидкости / Мещеряков Н.Ф., Шохин В.Н., Жуков В.В. и др. - Б.И. № 30, 1984.
49. Пат. 2354820 Франции, Procède et machine de flottation par dispersion d'un gas / Degner V.R., Colbert V.W. - Bulletin officiel de la propriété industrielle, 1977, N 7 (BO).
50. А.С. СССР 1212588, ВОЗД1/14. Аэратор пульпы / Ячушко Э.П. - Б.И., № 7, 1986.
51. Пат. 3211906 ФРГ, ВОЗД1/20. Injektor für Flotationsapparate / Schweiss P., Dorflinger H. - D. - Auszuge aus den Patentschriften, 1986. - № 46.
52. А.с. СССР 1119736. Флотационная установка // БИ №39, 1984
53. Пат. 270049 ФРГ. Flotationsanlage //А.А. 1980, №5.
54. Пат. 3758080 США. Machine for producing aerated products // OG, 1973, v. 914, №2.
55. Bauer M., Eigenberger G. Multiscale Modeling of Hydrodynamics, Mass Transfer and Reaction in Bubble Column Reactors // Chemical Engineering Science, 56. 2001. - P. 1067-1074.
56. Krasowska M., Krzan M., Malysa K. Bubble Collisions With Hydrophobic and Hydrophilic Surfaces in A-Terpineol Solution // Physicochemical Problems of Mineral Processing, 37. 2003. - P. 37-50.
57. Meloy T.P., Ferrara G., Preti U., Schena G. Locked Particle Standard Deviation for Two-Phase Systems // Powder Technology, 59. 1989. - P. 109-115.

58. Gibilaro L.G. Fluidization-Dynamics. The Formulation and Applications of a Predictive Theory for the Fluidized State. // University of L'Aquila, L'Aquila, Italy, 2001. - 232 p.
59. Ламб Г. Гидродинамика. - М.Л.: ОГИЗ, гос. изд. техн-теор. лит. 1947. - 928 с.
60. ANSYS Fluent "Theory Guide", Release 12.1 ANSYS, Inc. 2009.
61. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. 2-е изд., испр. - М.: Физматлит. 2001. - 320 с.
62. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. 1 - М.: Наука. Гл. ред. физ. мат. лит. 1987. - 464 с.
63. Рахматулин Х.А. Основы газодинамики взаимопроникающих движений сжимаемых сред. // Прикладная математика и механика. 1956. Т.20, № 2. - С. 184-195.
64. Nadooshan A.A. Numerical Simulation of Interfacial Flow with Volume of Fluid Method. // World Academy of Science, Engineering and Technology, v.19, 2008. - P. 39-42.
65. Alder B. J., Wainwright T. E. Studies in Molecular Dynamics II: Behaviour of a Small Number of Elastic Spheres. // J. Chem. Phys., 33:1439, 1960.
66. Juel A., Talib E. Oscillatory Kelvin – Helmholtz instability with large viscosity contrast // Manchester Centre for Nonlinear Dynamics and School of Mathematics, University of Manchester, M13 9PL Manchester, 2011. - 30 p.
67. Chapman S., Cowling T. G. The Mathematical Theory of Non-Uniform Gases // Cambridge University Press, Cambridge, England, 3rd edition, 1990. - 88 p.
68. Ding J., Gidaspow D. A Bubbling Fluidization Model Using Kinetic Theory of Granular Flow // AIChE J., 36(4). 1990. - P. 523-538.
69. Gidaspow D., Bezburuah R., Ding J. Hydrodynamics of Circulating Fluidized Beds, Kinetic Theory Approach // In Fluidization VII, Proceedings of the 7th Engineering Foundation Conference on Fluidization. 1992. - P. 75-82.
70. Drew D.A., Lahey R.T. In Particulate Two-Phase Flow // Butterworth-Heinemann, Boston. 1993, - P. 509-566.

71. Kolev N.I. Multiphase Flow Dynamics 2: Thermal and Mechanical Interactions. Springer, Berlin, Germany, 2nd edition, 2005 1994.
72. Wen C.-Y., Yu Y. H. Mechanics of Fluidization. Chem. Eng. Prog. Symp. Series, 62. 1966. - P. 100-111.
73. Schiller L., Naumann Z. // Z. Ver. Deutsch. Ing., 77:318, 1935.
74. Syamlal M. The Particle-Particle Drag Term in a Multiparticle Model of Fluidization. National Technical Information Service, Springfield, VA, 1987.
75. 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.
76. 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.
77. 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.
78. 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.
79. Скороходов В.Ф., Никитин Р.М., Степанникова А.С. Совершенствование технологии получения нефелинового концентрата. Вестник Кольского научного центра РАН. № 2. 2014. - С. 74-79.
80. 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. - М.: Горная книга. - С. 123-137.
81. 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. - Новосибирск, ИГД СО РАН. - С. 179-187.
82. Тихонов О.Н., Теория сепарационных процессов. Учебное пособие. Ч.1. Технический университет. СПб. 2003. - 102 с.
83. 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. - «Полиграфический центр «РИЭЛ». 2015. - С. 258-261.
84. 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.

85. 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. - С. 79-91.
86. 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.
87. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. - Л.: Химия. 1971. - 280 с.
88. Большев Л.Н., Пагурова В.И. Таблицы неполной гамма-функции. - М.: Вычислительная математика и математическая физика. 1964. - С. 977-978.
89. Янке Е., Эмде Ф., Лёш Ф. Специальные функции. Формулы. Графики. Таблицы. - М.: Наука. 1977. - 344 с.
90. 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.
91. Грушевицкий П. В. Уч. зап. ЛГУ, № 178, серия геолог., вып. 4 (1954).
92. Бокий Г.Б., Кристаллохимия. - М.: Недра. 1971. - 400 с.
93. Рабинович В.А., Хавин З.Я., Краткий химический справочник. - Л.: Химия. 1977. - 376 с.
94. Кузькин С.Ф., Гольман А.М. Флотация ионов и молекул. - М.: Недра. 1971. - 136 с.
95. Богданов О.С. Влияние вспенивателя на скорость подъема пузырьков во флотационной пульпе. Роль газов и реагентов в процессах флотации. - М.: Изд. АН СССР. 1950. - С. 601-604.

96. Городецкая А. Скорость поднятия пузырьков в воде и водных растворах при больших числах Рейнольдса. // Журнал физической химии. 1949. Т. XXIII, вып.1. - С. 71-77.
97. Рулев Н.И. Гидродинамика всплывающего пузырька. - Коллоидный журнал. Т. XII. 1980. Вып.2. - С. 252-263.
98. Файнерман В.Б., Сапиро В.С. Расчет динамического поверхностного натяжения молекулярных растворов поверхностно-активных веществ. Коллоидный журнал, 1973, XXXV, Выпуск 3. - С. 601-604.
99. 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.
100. 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.
101. 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. - С. 287-296.
102. 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.

103. 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.
104. 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.
105. 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.
106. 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.
107. 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.
108. 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.
109. 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.
110. Greenspan D. Molecular and particle modelling of laminar and turbulent flows // 5 Toh Tuck Link, Singapore 596224, 2005. - 168 p.
111. Фрик П.Г. Турбулентность: модели и подходы. Курс лекций. Перм.гос.техн.ун-т. Пермь, Ч.1 1998. 108 с., Ч.2. 1999. - 136 с.
112. 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.
113. 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.
114. Скороходов В.Ф., Витченко А.Н., Соложенкин П.М., Оценка способов диспергирования и режимов течения активированных газожидкостных смесей. III Конгресс обогатителей стран СНГ, Москва, 20-23 марта, 2001. Тезисы докл. М.: Альтекс. 2001. - С. 136-137.
115. Разумов К.А. Флотационный метод обогащения. Конспект лекций. - Горный институт им. Г.В.Плеханова, Ленинград. 1975. - 271 с.

116. Скороходов В.Ф., Никитин Р.М. Влияние способа подачи АВДВ на результат аэрирования флотационной пульпы. Научный вестник МГГУ №3(36) 2013. Москва. - С. 95-103.