

С.И. ЧЕРНЫХ

**СОЗДАНИЕ
ФЛОТАЦИОННЫХ МАШИН
ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ТИПА
И ОПЫТ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ
НА ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ ФАБРИКАХ**

Москва ЦНИИцветмет экономики и информации 1995

Черных С.И.

Создание флотационных машин пневматического типа и опыт их применения на обогатительных фабриках. - М.: ЦНИИЭИ-цветмет, 1995. -296 с.: ил. 171.

Рассмотрен зарубежный и отечественный опыт создания флотационных машин пневматического типа, приведены конструкции пневматических и пневмогидравлических аэраторов. Изложены основы теории аэрирования жидкостей и гидродинамических потоков в пневматических флотомашинах. Приведены конструкции чановых (колонных) флотомашин, их технические характеристики, методы расчета. Рассмотрена практика внедрения флотомашин пневматического типа на обогатительных фабриках цветной металлургии и на фабриках, перерабатывающих неметаллические полезные ископаемые.

Монография предназначена для инженерно-технических и научных специалистов, занимающихся вопросами конструирования флотомашин и проектированием обогатительных фабрик.

© Черных С.И., 1995

Введение

С развитием научно-технического прогресса в обогащении полезных ископаемых осваиваются новейшие технологические процессы, новое высокопроизводительное и более эффективное оборудование, позволяющие вовлекать в переработку ранее считавшиеся нерентабельными бедное и труднообогатимое рудное сырье и отходы производства.

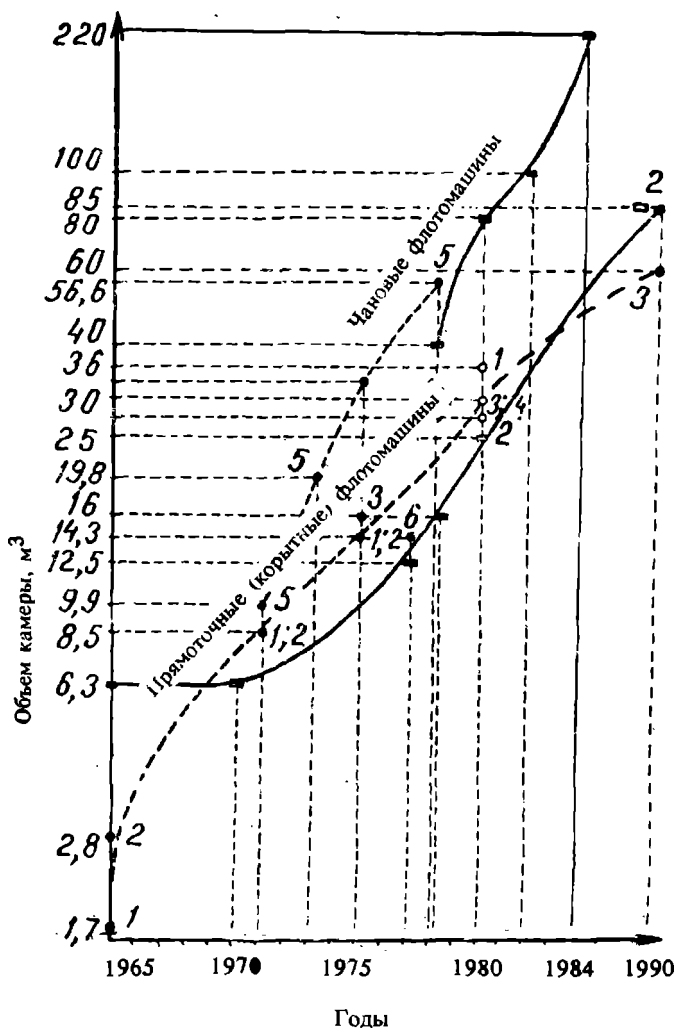
Вовлечение в эксплуатацию руд с низким содержанием металлов в качестве первоочередной задачи выдвигает увеличение производительности обогатительных фабрик. В настоящее время во многих странах мира введены в действие крупные обогатительные фабрики, мощность которых исчисляется десятками тысяч тонн руды в сутки. Уже не единичны фабрики производительностью 50-100 тыс. т руды в сутки. Опыт работы таких обогатительных фабрик показывает, что производительность флотационных отделений с увеличением количества секций, укомплектованных флотационными машинами традиционного образца с камерами малого объема, не соответствует производительности мельниц большого объема.

Учитывая, что основным процессом обогащения подавляющего большинства руд цветных металлов, а также других видов сырья является флотация, в промышленной реализации получил распространение принципиально новый подход, основанный на использовании оборудования большой единичной производительности. Как в зарубежной, так и в отечественной практике для осуществления процесса флотации с начала 70-х годов во многих странах мира стало актуальным создание флотационных машин с камерами большого объема. Начато использование флотационных машин с камерами объемом 12, 28, 36, 42, 56, 80 и 100 м³ (рисунок).

Промышленная практика использования этих флотационных машин опровергла утверждение некоторых ученых об оптимальном времени пребывания пульпы в камере флотомшины (0,2-0,5 мин), а также сложившиеся ранее представления о явлениях, происходящих в камере флотационной машины.

Следует отметить, что использование более экономичных и высокопроизводительных флотационных машин с камерами большого объема - одно из главных направлений реконструкции и технического перевооружения обогатительных фабрик.

Анализ исследований в области создания новых конструкций флотационных машин позволяет отметить, что их конструирование идет по пути повышения удельной производительности, уменьшения энергоем-



Динамика увеличения объемов камер флотационных машин:

1 - Денвер, США; 2 - Вемко-Фагергрэн; 3 - Оутокумпу, Финляндия; 4 - Замет, Польша;
5 - Максвелл, Канада; 6 - Аджитейр, США

Зарубежные: ● - выпускаемые серийно; ○ - в стадии разработки;

Отечественные: ■ - выпускаемые серийно; □ - в стадии разработки

кости, упрощения конструкций, экономии производственных площадей и осуществления оптимальных условий аэрации пульпы, то есть создания условий регулирования расхода воздуха для обеспечения требуемой

диспергированности и распределения пузырьков воздуха по всему сечению камеры.

При разработке флотационных машин с камерами большого объема всех типов (механических, пневмомеханических и пневматических) значительное внимание уделяется совершенствованию аэрирующих устройств, созданию условий повышения крупности флотируемых частиц и эффективности использования воздуха при флотации.

Почти все конструкции флотационных машин, как зарубежных, так и отечественных, основаны на одном принципе - циркуляции всей пульпы через импеллер, поэтому при конструировании машин большое внимание уделяется усовершенствованию конструкций импеллера. Разработаны и созданы весьма совершенные конструкции флотационных машин, удовлетворяющие как принципу обязательной циркуляции всего объема пульпы через импеллер, так и требованиям обработки грубо измельченной и тяжелой пульпы благодаря более интенсивному действию импеллера. Эти обстоятельства наряду с прочими усовершенствованиями конструкций механических флотомашин и послужили, видимо, причиной быстрого и широкого распространения в промышленности этого сравнительно сложного и дорогостоящего типа машин.

Ревизия указанного выше принципа "обязательной циркуляции всего объема пульпы через импеллер" и практика флотации выдвинули новые направления и идеи, получившие реализацию в конструировании пневмомеханических и механических флотомашин. Наметились явная тенденция к упрощению конструкций. Например, сделаны успешные попытки по ликвидации перегородок между камерами с созданием сплошной длинной ванны с расположенными вдоль нее импеллерами. Предприняты попытки уменьшить количество функций, выполняемых импеллером в обычной механической машине путем исключения принудительного транспортирования пульпы из камеры в камеру за счет всасывающего действия импеллера.

Все это способствовало значительному сокращению расхода электроэнергии в процессе флотации.

После первых сообщений периодической печати об эффективности увеличения глубины ванны аэролифтной машины начались исследования по созданию новых типов механических и пневмомеханических машин с глубокой камерой.

Прогресс в области конструирования механических и пневмомеханических флотомашин и то внимание, которое уделялось изготовителями и потребителями машинам этих типов, явились, видимо, причиной того, что сравнительно экономичные по расходу электроэнергии машины пневматического типа оказались практически вытесненными из про-

мышленного применения на флотационных обогатительных фабриках. В то же время весьма простые, дешевые и экономичные машины аэро-лифтного типа, успешно работавшие и работающие на некоторых зарубежных и отечественных фабриках, не подвергавшиеся до последнего времени значительному усовершенствованию, утратили свою популярность среди широких кругов обогатителей-производственников.

Появившиеся в конце 70-х годов сообщения канадских специалистов об успешном и эффективном применении глубоких пневматических флотационных машин колонного типа на ряде фабрик Канады вновь пробудили интерес к этому типу машин. Наибольший интерес проявлялся к пневмомеханическим машинам типа Максвелл с объемом камер до $56,6 \text{ м}^3$, успешно используемым в течение многих лет на медно-цинковой фабрике "Опемиска" в Канаде. В ряде стран появилось несколько конструкций противоточных пневматических машин, например, для флотации силвинита - во Франции, серных руд - в Польше, многоступенчатая колонна - в бывш. Чехословакии, аппарат Себоннет - в Японии.

Затем пневматические флотомашинны были внедрены на фабриках Чили, Франции, США и Китая.

В СССР научно-исследовательские работы по разработке конструкций пневматических машин чанового (колонного) типа характеризовались нестабильностью и проводились в отдельные периоды времени различными институтами, в том числе Госгорхимпроектом, Механобром, Институтом обогащения твердых горючих ископаемых (ИОТТ), Гинцветметом, Иркутским политехническим (ИрПИ), Государственным научно-исследовательским институтом горно-химического сырья (ГИГХС) и другими.

С 1970 г. в институте "Гинцветмет" начаты детальные исследования по разработке конструкций машин и отдельных узлов. Весь комплекс работ, охватывающий более чем 20-летний период, успешно закончился разработкой типоразмерного ряда машин и внедрением их на отдельных обогатительных фабриках цветной металлургии.

В монографии впервые достаточно полно обобщены итоги научно-исследовательских работ, выполненных в институте "Гинцветмет" и других отечественных институтах, а также зарубежная практика конструирования чановых (колонных) машин. Рассмотрены конструкции аэраторов различных типов, методика расчета и практика перфорации их, даны рекомендации по эксплуатации пневматических флотационных машин чанового (колонного) типа с камерами большого объема. Подробно освещена практика внедрения флотационных машин чанового (колонного) типа на обогатительных фабриках цветной метал-

лургии.

Выходящая в свет монография - это итог многолетней напряженной работы коллектива исследователей, конструкторов, производственников, освоивших новое поколение флотационных машин. Следует отметить, что это не справочник, в котором рассматриваются отдельные вопросы создания нового оборудования, а, скорее, детальный анализ и обобщение всех этапов создания оборудования, которые позволяют специалистам не только представить картину современного состояния и внедрения нового поколения флотационных машин с камерами большого объема при обогащении руд цветных металлов и других полезных ископаемых, но и использовать этот опыт в своей практической деятельности.

Приведен перечень литературных источников, насчитывающий более 150 наименований, текстовая часть иллюстрируется огромным количеством графического материала.

Подготавливая рукопись, автор преследовал одну цель - создать пособие как для теоретических исследований, так и для практической работы инженеров-обогащителей в области конструирования флотационных машин. Наиболее подробно рассмотрены конструкции нового поколения пневматических флотомашин с камерами большого объема, с пневматическими, пневмогидравлическими и гидравлическими аэраторами и вопросы изготовления их на месте (в механических мастерских обогащительных фабрик).

Автор выражает благодарность проф., докт.техн.наук, заслуженному деятелю науки и техники России В.Л.Кубасову, просмотревшему некоторые главы и сделавшему ценные замечания, а также ближайшим коллегам по работе и своим учителям: проф., докт.техн.наук, заслуженному деятелю науки и техники России С.И.Митрофанову, проф., докт.техн.наук В.И.Тюрниковой, проф., докт.техн.наук, чл.-корр. АН России В.И.Ревнивцеву, А.В.Троицкому, А.П.Пономареву, И.С.Когану, А.К.Кахарову, которые оказали большую помощь в организации исследований, изготовлении и практическом внедрении большеобъемных машин на обогащительных фабриках цветной металлургии.

Автор выражает признательность проф., докт.техн.наук Ю.Б.Рубинштейну, любезно предоставившему материалы по колонной флотации.

Большую помощь в составлении, редактировании и подготовке материалов к изданию оказали сотрудники ЦНИИцветмета экономики и информации Л.А.Давыдова, Л.И.Банденок, Е.И.Антофеева, Т.Д.Клочкова, Г.В.Терешенкова и Е.Е.Герасимова, за что автор им благодарен.

ГЛАВА 1. ФЛОТАЦИОННЫЕ ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ЧАНОВОГО (КОЛОННОГО) ТИПА

1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Чановые (колонные) флотационные машины для флотации различных полезных ископаемых в мировой практике появились 30 лет назад. Отдельные типы этих флотационных машин применялись в течение длительного времени для флотации фосфоритов, угля, серы, сильвинита и некоторых руд цветных металлов. Это позволяет подвести итоги опыта внедрения чановых (колонных) машин на обогатительных фабриках для последующей разработки направлений совершенствования их конструкций.

В институте "Гинцветмет" научно-исследовательские работы по созданию пневматических флотационных колонн проводились по инициативе заслуженного деятеля науки и техники России, проф., докт. техн. наук С.И. Митрофанова, докторов технических наук В.И. Тюрниковой и С.И. Черных.

В мировой практике развития пневматических флотационных машин чанового типа проблемы разработки, освоения и их эксплуатации находились под пристальным вниманием научно-технической общественности. Неоднократно эта проблема обсуждалась на научных семинарах и конференциях. В нашей стране этой теме были посвящены Всесоюзные школы передового опыта (гг. Учалы и Кентау, 1983, 1989 гг.), Всесоюзный научно-практический семинар (г. Иркутск, 1985 г.).

Доклады, посвященные созданию и испытаниям различных конструкций колонных аппаратов, были представлены на XIV и XV Международных конгрессах по обогащению полезных ископаемых в 1982 и 1985 гг., на 24-й, 25-й и 26-й ежегодных конференциях металлургов Канады. На 114-й и 115-й конференциях Американского общества горных инженеров (1985-1987 гг.) колонной флотации были посвящены специальные заседания. В 1988 г. в шт. Аризона (США) состоялся Международный симпозиум по колонной флотации; в 1991 г. - в Канаде.

О высокой интенсивности разработок в области колонной флотации свидетельствует и анализ патентных разработок ведущих стран мира (бывш. СССР, США, Великобритания, Франция, Германия, Япония). За период с 1970 по 1987 гг. выдано около 100 охраняемых документов, из них в нашей стране - 54, США - 18, Германии - 14.

На подавляющем большинстве обогатительных фабрик установлены флотационные машины импеллерного типа. В таких машинах

структура потоков жидкой и твердой фаз близка к идеальному перемешиванию, но, как известно из теории процессов разделения, не является оптимальной гидродинамической системой операций флотационной сепарации. Увеличение объема камер пневмомеханических и механических машин и сокращение их установочного числа усугубляют этот недостаток. Перемещение в аппаратах прямоточной конструкции также обуславливает снижение эффективности разделения. Установка импеллера снижает энергетический КПД флотационной машины, так как большая часть энергии расходуется на поддержание пульпы во взвешенном состоянии и не связана непосредственно с флотационным процессом. Интенсивное перемешивание способствует механическому выносу мелких частиц локальными восходящими потоками. Конструктивные особенности импеллерных машин затрудняют оперативное управление процессом. Указанных недостатков лишены флотационные машины пневматического типа, в частности колонные аппараты.

Характер движения частиц и пузырьков - важный фактор, от которого зависят вероятность образования флотокомплекса, степень минерализации, скорость флотации и энергоемкость процесса. При их противотоке обеспечиваются лучшие условия образования и сохранения флотокомплекса. Вероятность столкновения частицы с пузырьком и ее закрепления определяется, в частности, нормальной составляющей относительной скорости их движения, временем контакта и инерционными силами. Относительная скорость движения частиц и пузырьков в противотоке при скорости потока пульпы 2 см/с и средней крупности пузырьков 1,5-2,5 мм составляет примерно 10-12 см/с, что соответствует оптимальным условиям соударения, определенным в работах Ф.Дедека. Противоток пульпы и воздуха обуславливает снижение групповой скорости всплывания пузырьков, что удлиняет их пребывание в машине, повышает коэффициент использования воздуха и удельную производительность аппарата. В колонии в связи с отсутствием перемешивающих устройств и низкой турбулентностью потоков пульпы инерционные силы, разрушающие комплекс частица - пузырек, незначительны. Кроме того, в противотоке выше вероятность столкновения частиц с пузырьками вследствие большого аэрируемого объема камеры и длинного пути частиц и пузырьков при их движении навстречу друг другу по высоте машины. И, наконец, в колонне низка интенсивность продольного перемешивания пульпы. Все это свидетельствует о том, что скорость и селективность флотации в противотоке выше, чем при других направлениях движения потока пульпы и воздуха.

Повышение флотоактивности воздушных пузырьков связано с увеличением времени их кондиционирования, т.е. интервала между момен-

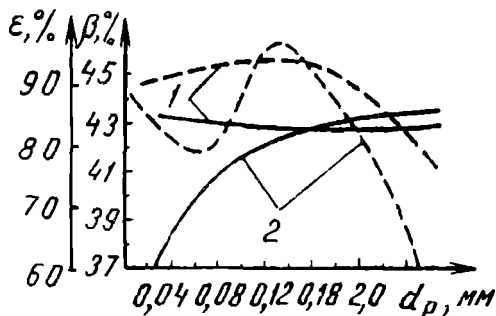
тами образования и минерализации пузырька. Оптимальные условия прилипания соответствуют длительности кондиционирования 5-20 с, за это время процесс самопроизвольной активации в результате деструктурирования поверхностных слоев пузырька успевает в основном завершиться. Вследствие значительной высоты противоточной колонны продолжительность пребывания в ней воздушных пузырьков составляет более 20 с, т.е. процесс минерализации в основном происходит при максимальной флотоактивности пузырьков.

К преимуществам противоточных машин относят также: низкий расход электроэнергии (в связи с отсутствием вращающихся деталей расход энергии определяется только мощностью привода воздуходувки); небольшие капитальные затраты; большой аэрируемый объем; возможность регулирования расхода и дисперсности воздуха, а также то, что площадь, необходимая для их размещения, в 3-5 раз меньше площади, занимаемой механическими машинами той же производительности. Следует отметить и повышение селективности флотации в колоннах вследствие большей, чем обычно, роли процессов вторичной концентрации, происходящих в зоне очистки и пенном слое, позволяющих получать высококачественные концентраты, снижать расход депрессоров и упрощать технологические схемы. Конструктивными отличиями колонных машин являются статичность, простота, компактность камеры, отсутствие вращающихся в абразивной среде деталей, эффективное использование производственных площадей и объемов.

Основная область использования колонных аппаратов - флотация тонкозернистых пульп. Отсутствие интенсивного перемешивания пульпы, очистка продукта в зоне, расположенной выше уровня подачи питания, большая высота пенного слоя - все это способствует получению тонкозернистого концентрата лучшего качества, чем в импеллерных машинах (рис. 1.1).

Многие исследователи отмечали, что крупные частицы в колонне флотируются хуже, чем в импеллерных машинах, вследствие меньшего времени пребывания этих частиц по сравнению со средним временем пребывания пульпы в камере. В пневматической машине в условиях слабой турбулентности вероятность закрепления и удержания частиц на пузырьках бывает выше, чем в импеллерных машинах, поэтому в некоторых случаях применение колонных машин и для флотации крупнозернистых материалов может оказаться целесообразным. Об этом свидетельствуют результаты исследований гранулометрического состава продуктов флотации в аппаратах "Флотэйр" и в колонных машинах с прямоточно-противоточным направлением движения частиц и пузырьков воздуха.

Рис. 1.1. Зависимость содержания β (сплошные линии) и извлечения ϵ (штриховые линии) Cr_2O_3 в концентрат от размера частиц d_p для колонной (кривые 1) и импеллерной (кривые 2) флотационных машин



Широкое применение колонных аппаратов сдерживается как объективными причинами (отсутствие надежных аэраторов и методов расчета параметров), так и консерватизмом технологов. Активизации практических исследований за рубежом в начале 80-х годов в области разработки и внедрения пневматических колонных машин способствовала информация о замене 13 перечисток концентрата на фабрике "Гаспе" (Канада) двумя операциями в таких машинах с улучшенными технологическими показателями. В последние годы разработка пневматических машин является одним из важных направлений совершенствования флотационного оборудования во многих странах мира.

В настоящее время в постоянной эксплуатации находятся чановые (колонные) флотационные машины конструкций ИОТТ, Гинцветмета и Армнипроцветмета. Из зарубежных пневматических аппаратов наиболее распространены колонны фирмы "Колэйн Флотейшн" (Канада), "Флотэйр" фирмы "Дейстер Концентрейтор" (США) и машины с циклонным аэратором "Давкра", производимые в Австралии и ЮАР.

В последние годы в промышленной эксплуатации на нескольких зарубежных фабриках по обогащению руд цветных металлов и угля находится пневматическая флотационная машина с отдельной камерой аэрации, разработанная учеными бывш. ФРГ и выпускаемая фирмой "Бергбау Форшунг".

1.2. КОНСТРУКЦИИ ЧАНОВЫХ (КОЛОННЫХ) АППАРАТОВ

Первой пневматической флотационной машиной колонного типа, широко применявшейся в промышленности, была машина Кэллоу, созданная еще в 1914 г. Подобно многокамерным механическим аппаратам, в ней было предусмотрено перекрестное движение пульпы и воздушных пузырьков. В 1915 г. конструкция, напоминающая колонну, была использована для флотации Т.М.Оуэном. Порцию материала в нее подавали в подпенный слой, а сжатый воздух (через специальные трубки

с резиновыми манжетами) - в нижнюю часть колонны. Флотацию осуществляли в циклическом режиме; для сuspendирования твердых частиц в придонной части колонны был установлен четырехлопастной импеллер; с целью поддержания постоянного уровня пульпы в камеру непрерывно подавали свежую воду.

Первая конструкция колонной флотационной машины с противотоком пульпы и воздуха была создана в 1919 г. М.Тауном и С.Флинном. Аппарат представлял собой цилиндр, в среднюю часть которого непрерывно поступала обработанная реагентом пульпа. Сквозь пористое днище (тканевый аэратор или аэратор с жесткими порами) вводился воздух под давлением. Хвосты разгружались по трубе из нижней части. Для поддержания постоянного уровня пульпы машина была снабжена системой клапанов, автоматически изменяющих интенсивность выгрузки хвостов. При испытаниях аппарата диам. 30 см на рудах различных типов была установлена его высокая эффективность. Промышленное применение колонных аппаратов сдерживалось осаждением крупных частиц и забивкой ими пор тканевого аэратора.

В нашей стране первая конструкция колонной флотационной машины была предложена И.П.Шилиным в 1939 г. Флотационная колонна, разработанная П.Бутиным и Р.Тремблем в 1961 г., стала первой из машин нового поколения, основанных на противоточном движении пульпы и воздуха. Принцип действия машины (рис. 1.2, а) заключается в следующем. Исходная пульпа после перемешивания с реагентами поступает в среднюю часть колонны, где смешивается со струей воды, подаваемой сверху, и встречается с восходящим потоком воздушных пузырьков, вводимых в нижней части машины.

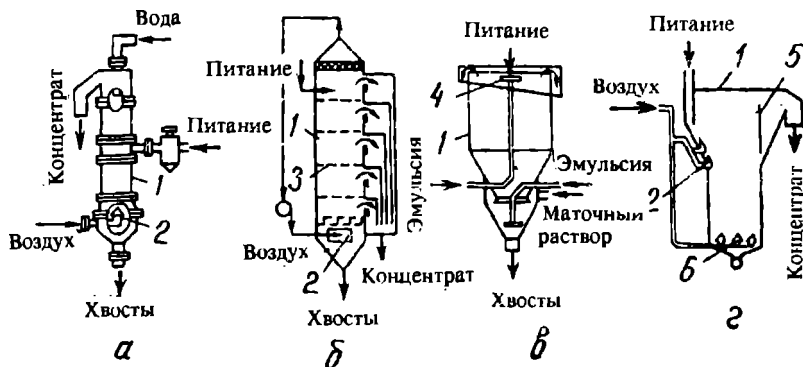


Рис. 1.2. Колонные аппараты, разработанные в Канаде (а), Чехословакии (б), Франции (в), Польше (г):

1 - камера; 2, 6 - диспергаторы воздуха; 3 - решетка; 4 - распределительная тарелка; 5 - сливной порог

Первые лабораторные опыты с железной рудой проводили в колонне диам. 50 мм, затем колонну диам. 0,3 м и высотой 8,8 м испытывали на фабрике "Шеффервилл" (Канада). Для оценки изменения содержания железа по высоте аппарата выполняли специальное опробование, позволившее установить, что основное изменение концентрации металла в камере происходит в зоне очистки и пенном слое. В дальнейшем колонну квадратного сечения со стороной 0,457 м и высотой 8,2 м испытывали на фабрике компании "Опемиска" (Канада). В нее подавали продукты основной, контрольной и перечистной флотаций сульфидных руд. Опыты, проведенные на концентрате основной флотации, выявили возможность получения в колонне концентратов высокого качества. При содержании меди в руде 10,7% в колонне получали концентрат и хвосты, содержащие соответственно 27,5 и 4,3% Cu, а в механической машине - соответственно 22 и 4,1% Cu.

Сравнение хвостов флотации, получаемых при грубом измельчении, показало, что флотационные колонны эффективнее работают на питании крупностью менее 0,15 мм (медные руды). При испытании колонны большого диаметра (0,915 м) полученные результаты были значительно хуже фабричных, что объяснялось плохой регулировкой уровня пульпы и расхода воздуха в машине, а также значительной турбулентностью потоков, затрудняющей достаточно полный переход флотируемых частиц в концентрат.

Положительные результаты испытаний противоточных машин в Канаде стимулировали создание и испытание новых конструкций чановых (колонных) аппаратов в других странах.

В бывш. Чехословакии разработана колонна, по принципу действия похожая на многоподовый аппарат кипящего слоя с решетками (рис. 1.2, б). Пульпу подают в верхний отсек колонны. Навстречу потоку пульпы, проходящей через решетку из отсека в отсек, поступает воздух. Отличительная особенность машины - фракционная флотация, позволяющая осуществить разные технологические схемы и многократное использование воздуха путем циркуляции его в колонне. Недостатки предложенной конструкции машины следующие: относительно крупное диспергирование воздуха с помощью механических решеток, возможность зарастания отверстий диспергатора нерастворимыми осадками, отсутствие равномерного периферийного съема пенного продукта и возможность попадания твердых частиц в воздуховодку.

Во Франции для флотации крупнозернистого силвинита разработана и испытана на заводе "Теодор" цилиндрикоконическая колонна диам. 2,1 м с высотой цилиндрической части 1,5 м (рис. 1.2, в). Исходная пульпа поступает на распределительную тарелку, смонтированную в

верхней части камеры. В нижнюю зону машины вводится эмульсия воздуха в маточном растворе, а несколько ниже - маточный раствор, обеспечивающий поддержание нужной скорости восходящего потока. Особенность машины - отсутствие диспергатора в камере и создание восходящего потока, снижающего скорость падения крупных частиц.

В Польше разработана противоточная машина KFP (рис. 1.2, з). Особенность машины - высокий пенный слой, отсутствие промывной воды. Крупнозернистая часть хвостов разгружается через выпускной клапан, а остальная - через наружный шиберный карман, обеспечивая регулировку уровня пульпы в камере (на рисунке не показаны). Питание в машину поступает через карман, в котором расположены аэраторы. Поток пульпы проходит над ними и поступает в камеру. Часть камеры между порогом и краем сливного желоба предназначена для самоочистки образующейся пены. Замена механических флотационных машин в перемешивающем цикле машинами KFP позволила повысить содержание серы в концентрате на 7-8% без снижения извлечения, что объясняется интенсификацией процессов вторичной концентрации в высоком пенном слое машины и отсутствием турбулентных потоков в камере, способствующих механическому выносу породы. Воздух в машину подается через парализованные плиты с порами диам. 30 и 40 мкм.

В США фирмой "Дейстер Концентрейтор" создано несколько оригинальных конструкций противоточных машин. Флотационная колонна Халлинсворта (рис. 1.3, а) имеет камеру прямоугольного сечения высотой от 1,5 до 8 м с расположенными горизонтально на разной высоте перфорированными резиновыми аэраторами. Под ложным перфорированным днищем в нижней части машины установлена перфорированная труба для подачи воды, необходимой для разгрузки хвостов (на рисунке не показана). В модифицированной конструкции этой машины аэрируется не пульпа, а дополнительный объем воды, который затем смешивается с пульпой (рис. 1.3, б). Воду и воздух через эжектор подают в нижнюю часть колонны, отделенную решеткой. В нижней части колонны аэрированная пульпа находится под несколько большим давлением, чем в остальном объеме машины. Так обеспечивается достаточно интенсивная аэрация. В машине предусмотрено специальное устройство для одновременного выпуска хвостов и поддержания необходимого уровня пульпы в камере. Хорошие результаты были получены при испытании на фосфатных рудах. Трудности эксплуатации машины связаны с износом эжекторов и заиливанием нижней части камеры.

Колонна Флотэйр (рис. 1.3, в) разделена двоянной перфорированной плитой на отделения аэрации и флотации. В дырчатую воронку в верхней части камеры поступает питание и аэрированная пропусканием

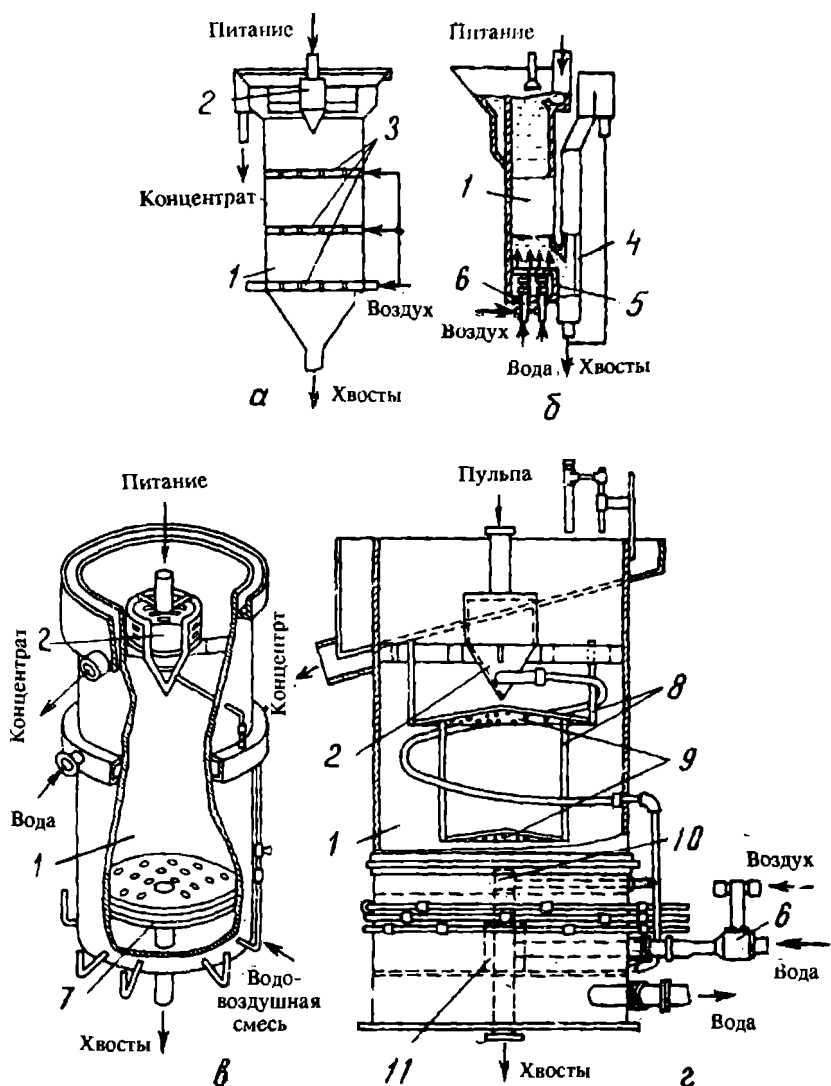


Рис. 1.3. Колонные аппараты фирмы "Дейстер Концентратор" (США): колонны Хэллинсворта (а, б) и Флотэйр (в, г);

1 - камера флотации; 2 - загрузочная воронка; 3 - диспергаторы воздуха; 4 - устройство для разгрузки хвостов; 5 - решетка; 6 - эжектор; 7, 9 - перфорированная плита; 8 - цилиндрическая обечайка; 10 - "пузырьковая" камера; 11 - центробежное распределительное устройство

через эжекторы вода. Аэрированная вода подается и под перфорированную плиту. Восходящие аэрированные потоки образуют на перфорированной плите кипящий слой из частиц. Часть из них флотируется, остальные движутся вниз навстречу всплывающим пузырькам. Для улучшения транспортировки нефлотированных частиц при недостаточной скорости восходящих потоков плита может иметь уклон к разгрузочному патрубку. Колонна имеет цилиндрическую форму, высоту 4-4,5 м, объем - от 1,13 до 19 м³. Она используется при флотации фосфоритов Флориды крупностью 0-1,18 мм, а также при флотации угля и медных руд.

Разработана модернизированная конструкция машины Флотэйр, в которой для предотвращения забивания эжекторов в отделении аэрации создают избыточное давление воздуха и воды. Диспергация воздуха в воде осуществляется в распылительных трубках специальной конструкции, соединяющих отделения аэрации и флотации (патент США 4450072). Для снижения степени разбавления пульпы водой при аэрации водовоздушной смесью и уменьшения энергозатрат в одной из конструкций флотационных машин Флотэйр воду с пенообразователем эжектируют потоком сжатого воздуха (под давлением около 130 кПа), который затем диспергируют в сопле Вентури (европ. патент 2084111).

В одной из последних разработок фирмы "Дейстер Концентратор" (рис. 1.3, г) для равномерной аэрации по сечению аппарата в нижней части его (под перфорированной плитой, на рисунке не показана) установлено центробежное устройство (патент США N 4617113), в котором происходит дополнительное диспергирование пузырьков. Размер отверстий в плите выбирают таким образом, чтобы минеральные частицы не попадали в нижнюю часть камеры (скорость восходящих водовоздушных потоков в отверстиях больше скорости осаждения самых крупных частиц).

Авторы конструкций подчеркивают, что диспергация воздуха происходит при движении водовоздушной смеси, а не в отверстиях перфорированной плиты, поэтому диаметр пузырьков не зависит от размера отверстий. Вода, не прошедшая в верхнюю часть камеры, перекачивается насосом через эжектор обратно в камеру, что позволяет значительно снизить потребление свежей воды. Потери воды компенсируются подачей ее под перфорированную плиту. Как и в предыдущих конструкциях машины Флотэйр, водовоздушную смесь подают не только в нижнюю часть аэратора, но и в зону подачи питания. Третьей точкой подачи водовоздушной смеси является так называемая "пузырьковая камера", расположенная над патрубком для разгрузки хвостов. Для оптимизации гидродинамических условий флотации камера снабжена двумя цилинд-

рическими коаксиальными обечайками и перфорированными горизонтальными перегородками.

На рис. 1.4, а приведена конструкция машины (а.с. 419255 СССР), состоящей из этажно расположенных камер, смонтированных на трубе питания. Последняя выполнена из секций, площадь сечения которых увеличивается от нижней к верхней, обеспечивая пропорциональное уменьшение рабочего объема камер. Труба питания такой конструкции является гидравлическим классификатором. Из каждой ее секции на флотацию поступают частицы определенного класса крупности, при этом в камерах создаются соответствующие скорости потоков пульпы благодаря изменению площади сечения камер. Интенсификация флотационного процесса в такой машине осуществляется за счет раздельной флотации в камерах частиц узких классов крупности. Недостатки рассматриваемой машины - сложность покамерной регулировки уровня пульпы и значительная высота. Этих недостатков лишен флотационный аппарат (см. рис. 1.4, б), состоящий из набора концентрически расположенных камер различного сечения (а.с. 478616 СССР).

Анализ влияния характера движения фаз на протекание процесса показал, что для улучшения флотиремости частиц различной крупности целесообразно в одной машине совмещать противоточное и прямоточное направления движения фаз. Переток флотируемой пульпы из камеры в камеру осуществляется с помощью кольцевых аэролифтных труб, расположенных между обечайками камер. Предложенная конструкция позволяет многократно направлять камерный продукт в зону минерализации, чередовать противоточное движение пульпы и воздуха с прямоточным, а увеличение размера сечений полостей аппарата в направлении движения камерных продуктов снижает скорости потоков, обуславливает увеличение времени пребывания частиц и улучшение условий минерализации труднофлотируемых классов (а.с. 1118413 СССР).

Для интенсификации процессов вторичной минерализации в пенном слое камера колонны (см. рис. 1.4, в) разделена на два отделения: пенное и минерализации, соединенных между собой патрубком. Регулирование расхода воздуха, подаваемого в диспергатор пенного отделения, и расхода воды для орошения пены позволяет управлять качеством и выходом концентрата и промпродукта (а.с. 271446 СССР). Опыт применения колонных машин при обогащении различных полезных ископаемых позволил выявить, что соотношения высот зон минерализации и очистки следует устанавливать с учетом флотоактивности минералов. Разработаны машины (а.с. 489530 СССР), снабженные направляющими для перемещения диспергаторов воздуха и устройства для распределения

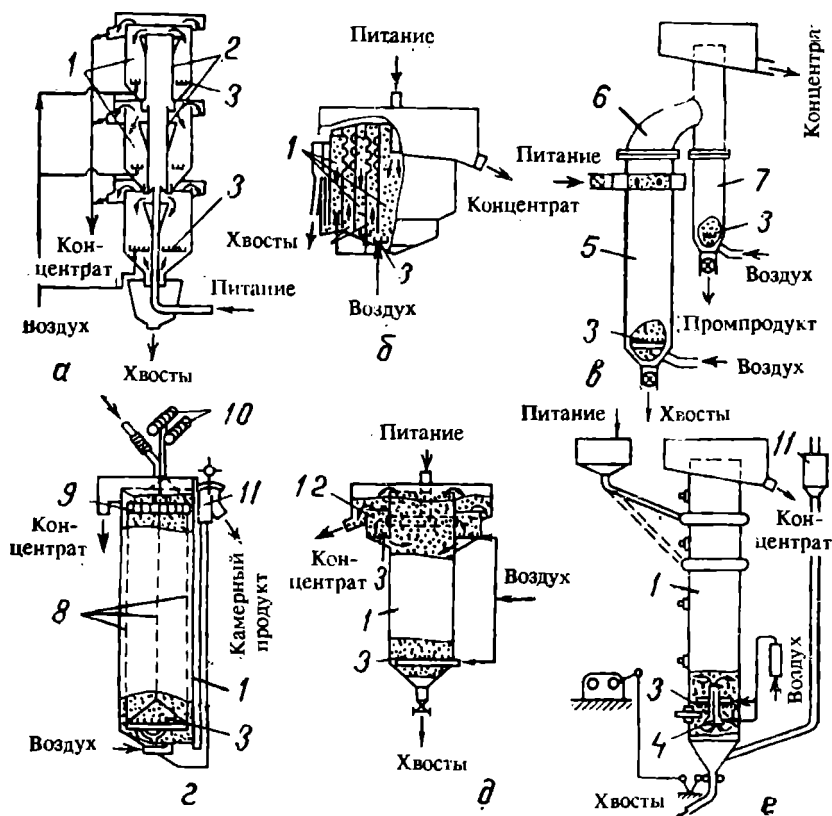


Рис. 1.4. Колонные аппараты различных конструкций (а, б, в, г, д, е), разработанные в ИОТТ:

1 - камера флотации; 2 - загрузочная труба; 3 - диспергатор воздуха; 4 - аэролитная труба; 5 - отделение минерализации; 6 - соединительный патрубок; 7 - пенное отделение; 8 - направляющие; 9 - устройство для распределения пульпы; 10 - привод; 11 - шиберный карман; 12 - камера пенной сепарации

пульпы (см. рис. 1.4, г). В зависимости от характеристики исходного питания и требований, предъявляемых к продуктам разделения, с помощью приводов диспергаторы и желоба перемещают по вертикальным направляющим до требуемого соотношения высот зон минерализации и очистки.

Для интенсификации флотации крупных классов разработана машина (см. рис. 1.4, д) (а.с. 478615 СССР), в которой совмещены процессы

пенной сепарации и флотации в противотоке: питание поступает на пенный слой камеры пенной сепарации для извлечения крупных и легкофлотируемых частиц и для предварительной аэрации пульпы, а камерный продукт - на флотацию в камеру аппарата. Недостаток машины - высокие потери ценного минерала, так как минерализованные пузырьки, скорость всплывания которых меньше скорости нисходящего потока, выносятся в хвосты. Для уменьшения потерь и создания циркуляционных потоков в зоне аэратора разработаны машины (см. рис. 1.4, е) с аэролифтом в нижней части камеры (а.с. 440161 СССР).

Для регулирования процесса предусмотрена возможность изменения длины аэролифта (рис. 1.5, а). В одной из конструкций пневматических машин (см. рис. 1.5, б) сочетаются прямоточное и противоточное движения фаз. Камера такой машины представляет собой цилиндроконический резервуар, в верхнюю часть которого вводится пульпа. В резервуаре расположена цилиндрическая обечайка с двойными перфорированными стенками. Высоту ее погружения можно регулировать, изменяя соотношение противоточных и прямоточных потоков. Воздух подается через перфорированные стенки цилиндрической части корпуса и двойного цилиндра (а.с. 1118413 СССР). Гидродинамические режимы флотации в прямоточных и противоточных секциях регулируют следующим образом. Камеру машины, состоящую из нескольких прямоточных и противоточных цилиндрических секций с диспергаторами, снабжают кольцеобразными элементами (на рис. 1.5, б не показаны) с патрубками для подвода воздуха и винтовой насадкой, установленной на внутренней поверхности прямоточной цилиндрической емкости, или диспергаторами. Кольцеобразные элементы из упругого материала устанавливаются внутри каждой емкости соосно с ней. Изменение давления воздуха, подаваемого через патрубки в кольцеобразные элементы, влияет на объем последних и живое сечение цилиндрических емкостей, что позволяет регулировать скорости потоков пульповоздушной смеси в цилиндрических емкостях. Это в свою очередь способствует созданию оптимальных гидродинамических режимов в каждой из емкостей камеры машины (прямоточных и противоточных) и возрастанию извлечения в концентрат труднофлотируемых зерен обогащаемого материала. В машине, изображенной на рис. 1.5, в (а.с. 1233946 СССР), для стабилизации процесса целесообразно с изменением расхода воздуха в камере регулировать уровень пульпы. Для этого предложено подавать воздух в шибберный карман, причем его расход должен быть пропорционален расходу воздуха в камере флотационной машины.

На рис. 1.6, а, приведена схема флотационной машины, загрузочное устройство которой выполнено в виде перемещаемого по высоте камеры

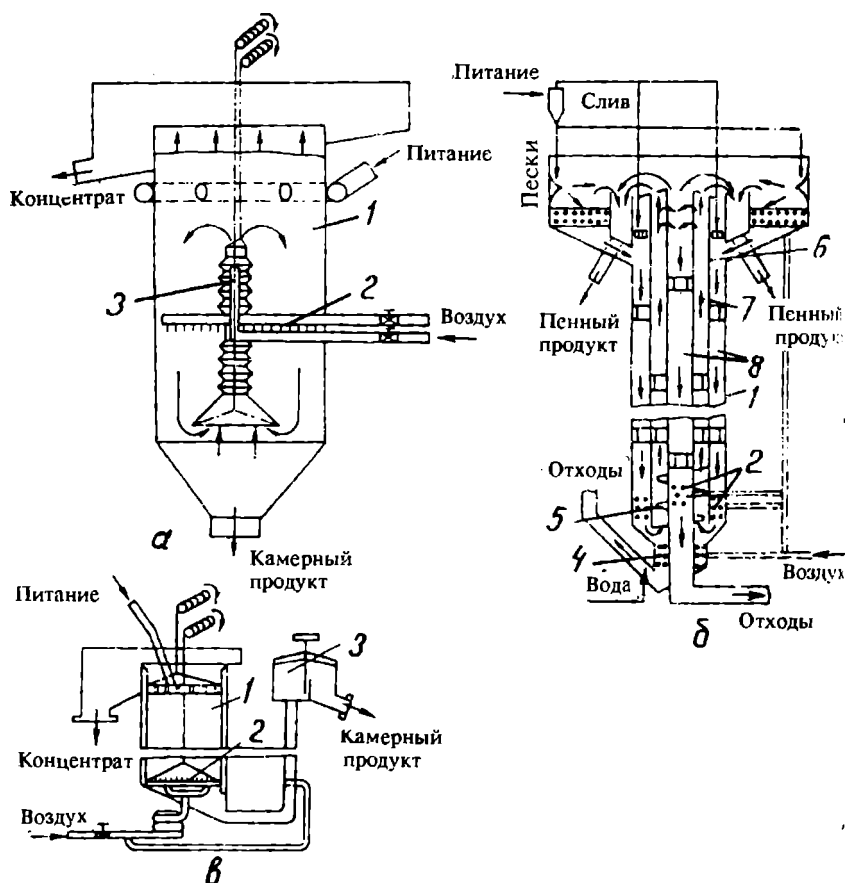


Рис. 1.5. Колонные аппараты различных конструкций (а, б, в), разработанные ИОТТ и ИрПИ:

1 - камера; 2, 4 - диспергаторы воздуха; 3 - аэраторы; 5 - винтовая насадка; 6 - цилиндрическая обечайка; 7 - прямоточная секция; 8 - противоточная секция; 9 - шибберный карман

аэролифта, снабженного кольцевыми желобами, на уровне которых в аэролифте имеются отверстия, при этом аэраторы установлены на днище кольцевых желобов (а.с. 1015917 СССР). В машине, изображенной на рис. 1.6, б (а.с. 984498 СССР), загрузочное устройство выполнено в виде жалюзийных элементов, образующих полый усеченный конус, меньшее основание которого направлено к разгрузочному приспособле-

ию. Элементы жалюзи большим основанием установлены к желобу для бора концентрата. В нижней части загрузочного приспособления предусмотрен подвод воды для возврата частиц в зону флотации.

К недостаткам конструкций обеих колонн следует отнести малый полезный объем, а также возникновение турбулентных потоков непосредственно около загрузочного устройства.

Для классификации исходного материала и равномерного распределения его по классам крупности в различных по высоте зонах колонны (рис. 1.6, в) загрузочное устройство предложено выполнять в виде системы коаксиально установленных труб, верхние срезы которых размещены в герметично закрытом цилиндре с тангенциальным патрубком для ввода питания (циклонное устройство), а нижние - на разных уровнях по высоте колонны (а.с. 520132 СССР). Разделение по крупности осуществляется в поле центробежных сил, создаваемом тангенциальной подачей питания. Классифицированный по крупности материал через коаксиально установленные трубы поступает в соответствующие зоны колонны (крупнозернистый материал ближе к пенному слою), что способствует увеличению скорости флотации крупных частиц. Для снижения кинетической энергии потока под трубами питания установлены отбойные козырьки, под которыми вмонтированы дополнительные аэраторы.

Комплекс работ по созданию и внедрению колонных машин конструкции Госгорхимпроекта выполнен на фабриках, обогащающих горно-

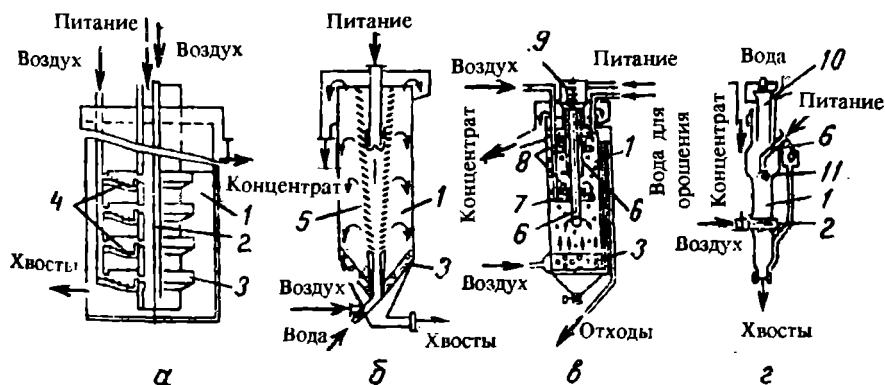


Рис. 1.6. Колонные аппараты, разработанные в Гиицветмете (а), Якутнипроалмазе (б), ИМГе (в) и Госгорхимпроекте (г):

1 - камера; 2 - аэролифт; 3 - кольцевой желоб; 4, 7 - диспергаторы воздуха; 5 - жалюзи; 6 - загрузочная труба; 8 - отбойный козырек; 9 - циклонное устройство; 10 - телескопическая труба; 11 - распределитель пульпы

химическое сырье. Опытные образцы машин были испытаны при обогащении фосфоритов на Подмосковном горно-химическом комбинате и на комбинате "Уралкалий" в операциях: основной и перечистой шламовой флотаций, основной флотации крупнозернистого и мелкозернистого сильвинита. В машине (рис. 1.6, г) исходную пульпу по загрузочной трубе вводят в расширенную часть колонны. Под трубой закреплен распределитель пульпы, выполненный в виде перевернутого конуса с вогнутым основанием. Пену выводят с помощью телескопической трубы, наружный диаметр которой близок к внутреннему диаметру колонны. Диаметр и высота машины равны соответственно 0,415 и 4,35 м; объем 0,58 м³. При обогащении фосфоритов крупностью 0-0,18 мм максимальная производительность машины составила 5 т/ч. Как показали испытания на калийных фабриках, колонна обеспечивает получение богатых концентратов при достаточно высоком извлечении ценного компонента.

Срок службы резиновых диспергаторов в колонной машине, установленной на калийной фабрике, оказался небольшим. В насыщенных растворах солей происходит их кристаллизация в отверстиях трубок, что снижает пропускную способность аэраторов. Эксплуатация пористых аэраторов в насыщенных растворах солей стала возможной только при применении подогрева и увлажнения воздуха острым паром. В поток воздуха вводят водяной пар (расход пара 0,15-0,25 кг/м³), а температуру паровоздушной смеси поддерживают на 30-40°С выше температуры пульпы. Положительные результаты, полученные при испытании колонны, позволили перейти к созданию промышленного образца, в котором были использованы некоторые конструктивные элементы машин пенной сепарации ФПС-16: установлены каскадный распределитель пульпы по ширине машины и криволинейный козырек, концентрирующий пузырьки в зоне поступления пульпы. Машина состоит из прямоугольного корпуса, разделенного перегородками на три отсека площадью 0,6 м² каждый; ее производительность 100-120 м³/ч; расход воздуха 60-70 м³/ч.

Интересна конструкция колонны (а.с. 867423 СССР) с системой клапанов, позволяющей пускать машины после технологических перерывов. Разгрузка камерного продукта и регулировка уровня пульпы в машине (рис. 1.7, а) осуществляются через клапанную коробку. Такая конструкция машины позволяет в период пуска отключать подачу питания и в течение 5-10 мин возвращать хвосты в аппарат, что благоприятно сказывается на ее дальнейшей работе; однако наличие системы клапанов повышает надежность работы машины. В камере флотационной пневматической машины (а.с. 722587 СССР) для улучшения

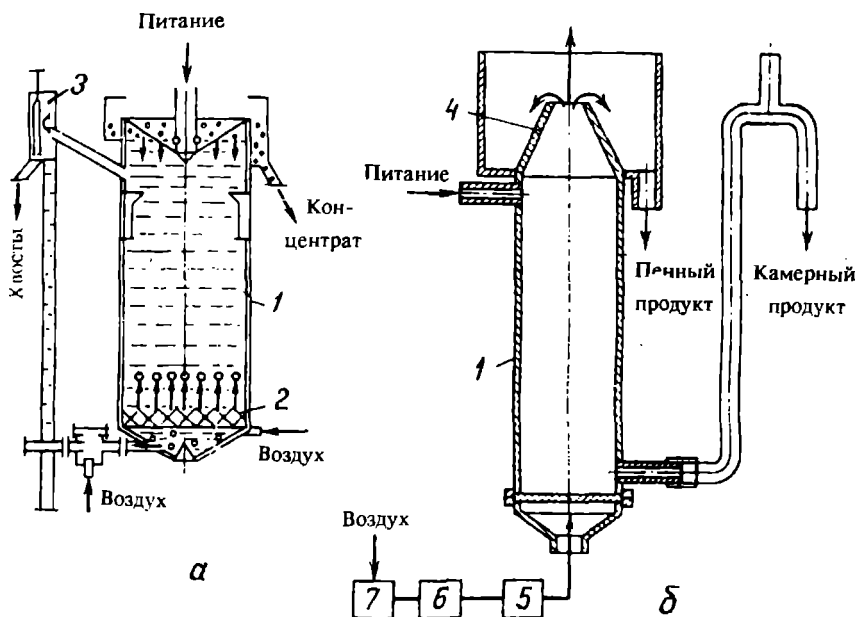


Рис. 1.7. Колонные аппараты, разработанные в ВНИПИгорцветмете (а) и ВНИИ-цветмете (б):

1 - камера; 2 - диспергаторы воздуха; 3 - шиберный карман с клапанной коробкой; 4 - конусная насадка; 5 - пульсатор; 6 - фильтр; 7 - компрессор

эмульгирования реагентов в верхней части трубок, размещенных между трубками подвода воздуха, делают два ряда отверстий для подачи реагентов. Отличительная особенность другой колонны (а.с. 451466 СССР), представленной на рис. 1.7, б, - наличие пульсатора для подачи сжатого воздуха и конусной насадки, обеспечивающих пульсирующий сьем пенного продукта. Флотокомплексы выносятся на границу раздела, которая расположена на 10-20 мм ниже верхней части конической насадки концентратора. Пенный продукт удаляют в результате кратковременного (0,1 мин) импульсного увеличения расхода воздуха в 2 раза при частоте 4 мин^{-1} и более. В пульсатор воздух, засасываемый компрессором, попадает через фильтр. Все перечисленные пневматические флотационные машины чанового (колонного) типа имеют противоточное движение потоков пульпы и воздуха и установленные внутри флотационной камеры аэраторы. К преимуществам этих машин можно отнести простоту конструкции и обслуживания; к недостаткам - отсутствие зон с различной гидродинамикой для более полного извлечения частиц, отличаю-

щихся по флотуемости. В камерах многозонных колонных машин для более полного извлечения флотируемых частиц разной флотоактивности выделены зоны с соответствующими гидродинамическими характеристиками.

В колонне, изображенной на рис. 1.8, *а* (патент 4066540 США), на равном расстоянии одна от другой расположены полки, разделяющие камеру на несколько зон. Каждая полка имеет открытые сквозные каналы, которые соединяют между собой соседние зоны и образуют непрерывные вертикальные проходы сложной конфигурации. В машине, изображенной на рис. 1.8, *б* (патент 4186087 США), зоны с различными гидродинамическими условиями образуются за счет установки в камере трубок диам. 4-5 см и длиной, составляющей 8-24% общей высоты колонны. На концах трубок установлены конусные насадки для захвата минерализованных пузырьков. Трубки с насадками образуют зону резкого снижения турбулентности движущихся потоков воздушных пузырьков и пульпы. Установка внутри флотационных камер различных обтекателей, несомненно, интенсифицирует процесс флотации, повышает извлечение частиц и улучшает качество концентрата, но, с другой

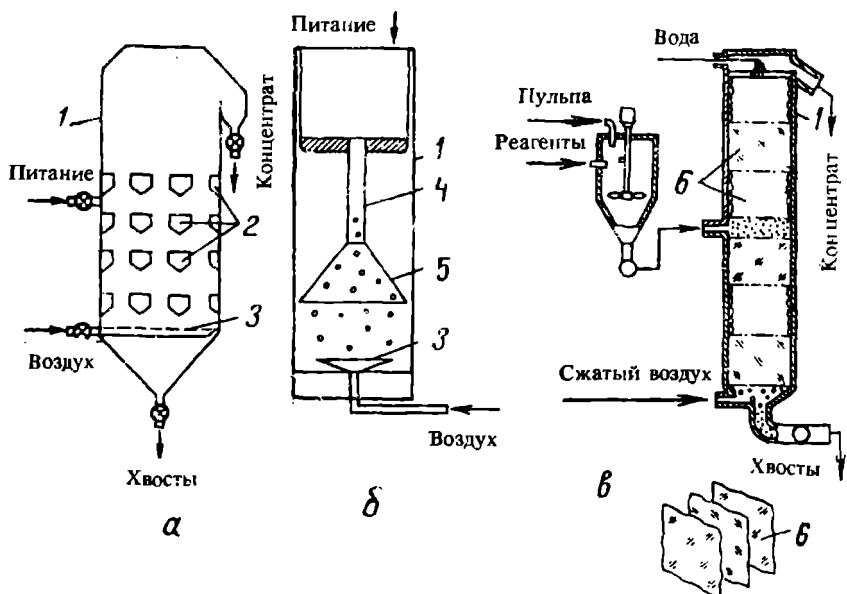


Рис. 1.8. Пневматические флотомашины колонного типа (*а, б, в*), разработанные США:

1 - камера; 2 - полки с каналами; 3 - диспергаторы воздуха; 4 - трубка; 5 - конусная насадка; 6 - пакет рифленых пластин

стороны, снижает эффективный объем камеры и производительность машины, кроме того, такие устройства не позволяют изменять гидродинамические условия при колебаниях характеристик питания.

В настоящее время для интенсификации флотации используют различные физические методы воздействия на пульпу: ультразвуковое, ядерное и радиоактивное облучения, магнитную обработку. Некоторые из них применяют в колонных аппаратах. Предложена колонна, которая снабжена гидроневматическим излучателем, установленным сосно с ней на дне (а.с. 597425 СССР). Форма излучателя соответствует форме колонны, а размеры ее соизмеримы с длинами звуковых волн, возбуждаемых излучателем, и кратны целому числу полуволн. При установке излучателя создаются условия для получения тонкодиспергированного воздуха. В качестве излучателя может быть применен пьезокерамический преобразователь с частотой колебаний около 1 МГц, который направляют выше аэратора (а.с. 588004 СССР). Наличие магнитной системы, расположенной с внешней стороны корпуса колонны в зоне минерализации пузырьков, позволяет агрегировать и извлекать в пенный продукт тонкие шламы магнитных минералов, например марганцевых, вольфрамовых (а.с. 440160 СССР). Эффективность процесса может быть повышена путем введения в пульпу частиц железного скрапа в качестве минерала-носителя.

Опыт работы колонных машин при обогащении различных полезных ископаемых позволил выявить их конструктивные и технологические особенности и найти оптимальные конструктивные решения основных узлов: диспергаторов воздуха, распределителей питания и разгрузки пульпы, стабилизаторов уровня пульпы в камере.

При создании на базе модельных образцов высокопроизводительных противоточных пневматических машин необходимо учитывать ряд факторов, от которых зависит эффективность работы машины. Установлено, что от размера поперечного сечения колонны зависят ее удельная производительность и необходимая продолжительность флотации. Для оценки влияния режима движения потоков пульпы необходимо определять интенсивность перемешивания в машине. Перемешивание обычно происходит во всех направлениях, однако, поскольку для колонной машины характерна направленность потока, можно ограничиться учетом интенсивности перемешивания только в продольном направлении. Необходимо отметить, что вследствие значительно большей интенсивности перемешивания в промышленных машинах (по сравнению с лабораторными) результаты разделения в них существенно отличаются. При исследовании интенсивности перемешивания в колонне установлено, что значение критерия Пекле, характеризующего степень неидеальности

потока в аппаратах, уменьшается с увеличением диаметра колонны и расхода воздуха и возрастает с повышением скорости потока. Сопоставление значений критерия Пекле, рассчитанных по результатам экспериментов в колоннах разного диаметра, с удельной производительностью каждого аппарата свидетельствует о корреляции между этими параметрами, а наличие экстремума - о существовании оптимальной интенсивности перемешивания в колонне.

Полученные результаты позволили сделать вывод о необходимости оптимизации гидродинамического режима в противоточных пневматических машинах. Проведенный анализ показал, что для этого в камерах большого сечения следует устанавливать успокоители. Испытаны успокоители различных конструкций: в виде горизонтальных решеток, сеток, цилиндров из проволоки и др. Наиболее эффективными оказались цилиндры диам. 5 см и высотой 6 см из проволоочной сетки с отверстиями 2 мм.

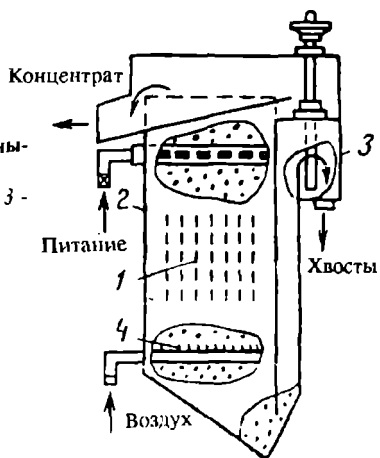
Установка перфорированных пластин в различных сечениях колонны (патент 4431531 США) позволяет увеличить время пребывания частиц в аппарате, а также интенсифицировать процесс флотации при движении частиц и пузырьков навстречу друг другу через отверстия в пластинах.

Использование колонны (рис. 1.8, в), заполненной рифлеными пластинами (аппарат Д.Янга), позволяет обеспечить более тесный контакт тонких частиц с пузырьками. Повышению извлечения шлама способствует также интенсивная микротурбулентность между нарифлениями, характерная глубина которых равна 3 мм, а угол наклона к горизонту - 45° . Смежные пакеты пластин установлены во взаимно перпендикулярных направлениях. Отсутствие макроциркуляции пульпы в насадочной колонне практически исключает механический вынос в пену частиц пустой породы, что совместно с большой высотой пенного слоя обуславливает возможность получения сверхчистых концентратов тонкозернистого материала в одну стадию. Одно из основных конструктивных преимуществ данного аппарата - исключение необходимости получения мелких пузырьков, так как дробление воздуха происходит при движении пузырьков по нарифлениям. Приведенная скорость пульпы в колонне составляет около 0,3 см/с, воздуха - 8-12 см/с, промывной воды - 0,1-0,15 см/с (патент 4592834 США).

Исследования, проведенные в ИОТТ, позволяют считать наиболее целесообразной установку в зоне минерализации колонны (рис. 1.9) вертикальных решетчатых успокоителей, разделяющих машину на ячейки (а.с. 483144 СССР). Оптимальное сечение ячейки определяют экспериментально. Образцы машины с такими успокоителями были

Рис. 1.9. Колонный аппарат с вертикальными успокоителями:

1 - решетчатые успокоители; 2 - камера; 3 - шиберный карман; 4 - диспергаторы воздуха



испытаны на Жилевской ОПОФ и медной фабрике Балхашского ГМК.

В Великобритании испытана колонна Лидс (рис. 1.10), ее особенность состоит в том, что в пене и под ней размещено несколько барьеров, каждый из них состоит из решетки, над щелями которой свободно установлены легкие нейлоновые стержни. При уменьшении интенсивности вертикального потока они препятствуют протеканию пульпы на нижний этаж, т.е. барьер действует как одноходовой клапан. Когда под стержнями собирается достаточно пузырьков, стержни раздвигаются и пропускают их вверх. Это позволяет повысить селективность флотации.

Противоточное движение пульпы и воздуха - характерный признак пневматических колонных аппаратов - используют и в машинах других типов. В Японии разработана машина Севонетт, принцип действия которой основан на сочетании противоточной флотации с механическим перемешиванием. В центр цилиндрической камеры помещают многоярусный узел аэрации и перемешивания. Каждый ярус представляет собой блок ротора и статора. Исходная пульпа поступает на верхний ярус через вертикальный цилиндрический колпак, засасывается ротором и выбрасывается по направляющим пластинам статора в объем камеры, где твердые частицы движутся навстречу поднимающимся вверх пузырькам. Для обеспечения равномерности аэрации по всему объему камеры под каждый ярус подают сжатый воздух. В скандинавских странах распространены пневмомеханические машины Сала (Швеция), работающие в режиме противотока пульпы и воздуха.

Несмотря на значительные преимущества, распространение в промышленности колонных машин и пенных сепараторов пока еще ограничено. Обусловлено это недостаточной надежностью аэраторов, выпол-

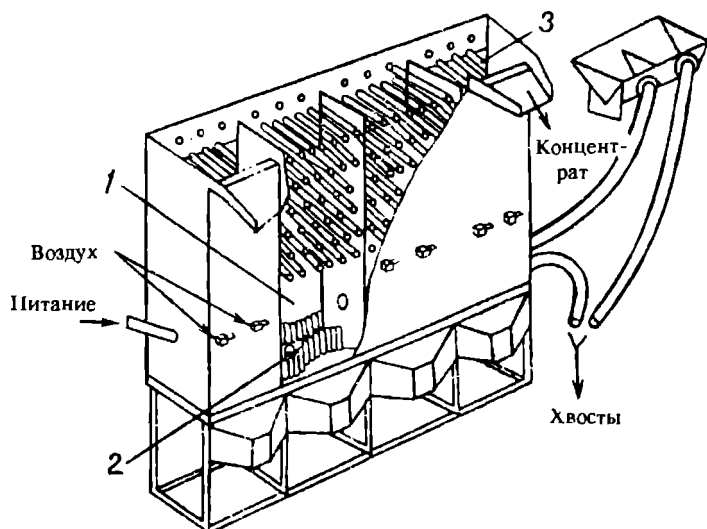


Рис. 1.10. Колонная флотомашина Лидс:

1 - камера; 2 - диспергаторы воздуха; 3 - нейлоновые стержни

ненных из перфорированных резиновых трубок. В последние годы разрабатывают машины, в которых процессы аэрации пузырьков и массопереноса разделены.

В бывш. ФРГ разработана машина (рис. 1.11, а) со специальным реактором для аэрации пульпы и минерализации пузырьков. В реакторе перпендикулярно к направлению потока пульпы размещены пористые трубки из полиэтилена с диаметром отверстий около 15 мкм. Поток пульпы проходит через аэратор со скоростью 2-6 м/с, при этом весь его объем равномерно заполняется пузырьками и образуются флотокомплексы. Флотация начинается после подачи пульповоздушной смеси в камеру, имеющую вид конуса с цилиндрической частью объемом 28 м^3 . По периметру конуса расположено 10 патрубков, соединенных с реакторами. Производительность одного реактора при флотации угля - $70 \text{ м}^3/\text{ч}$ пульпы. Данные, полученные при измерении расхода пульпы, используют для регулирования расхода воздуха. Новая машина работает на фабрике, обогащающей коксовые и газовые угли. Материал крупностью менее 0,1 мм подготавливается в трубопроводе, подводящем пульпу к флотационной машине. В каждую камеру поступает $500\text{-}900 \text{ м}^3/\text{ч}$ пульпы с концентрацией твердого 20-70 г/л. В питании флотации зельностью 30-35% содержится более 40% частиц крупностью менее 9 мкм. Золь-

ность концентрата и отходов соответственно 7-8 и 68-78%. Такие аппараты используют и при обогащении другого минерального сырья. Реактор может быть установлен как вне камеры разделения, так и внутри нее. В некоторых случаях пульповоздушную смесь подают тангенциально со скоростью 3-7 м/с, что обеспечивает реализацию принципа циклонной флотации и ускорение выноса мелких минерализованных пузырьков в пену.

Для обогащения тонких классов углей целесообразно заменить описанный выше реактор специальной аэрационной камерой, работающей по принципу эжектора (рис. 1.11, б).

Для интенсификации флотации тонких угольных шламов в бывш. ФРГ разработан аппарат струйной флотации, основанный на том, что поток пульпы после выхода из сопла захватывает воздух. Аэрированный поток при встрече с поверхностью пульпы проникает в нее. Для образования кольцевых струй с углом раскрытия около 30° используют специальные насадки. Насадки устанавливают перпендикулярно к поверхности жидкости или под углом к ней. Созданию струйного аппарата (рис. 1.11, в) предшествовали исследования по изучению зависимости расхода засасываемого воздуха от давления нагнетаемой пульпы, диаметра и числа сопел, а также от расстояния между соплом и поверхностью воды. Пульпа в виде вертикальной струи из конического сопла подается в верхнюю часть цилиндроконической камеры. Зона пузырькового конуса отделена цилиндрической обечайкой. Испытания опытного образца показали возможность получения из угля с зольностью 25,1% при его

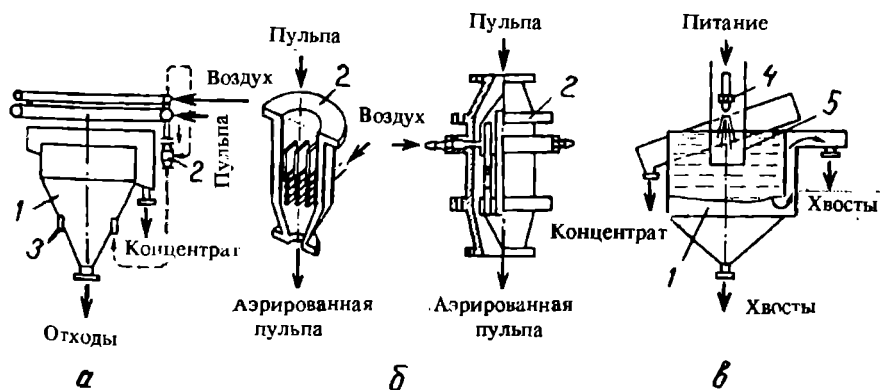


Рис. 1.11. Колонные (а, б) и струйные (в) аппараты, разработанные в ФРГ:
1 - камера разделения; 2 - аэрационный узел (реактор); 3 - патрубок; 4 - сопло; 5 - обечайка

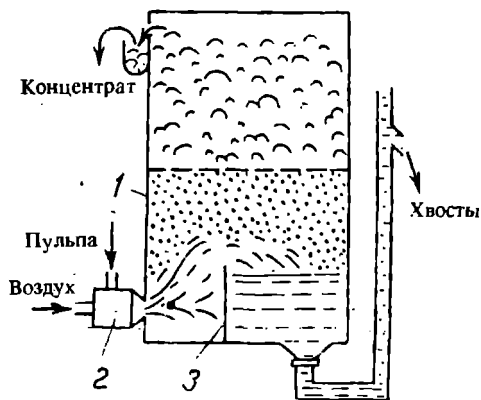


Рис. 1.12. Пневматическая машина Давкра:

1 - камера; 2 - циклонный аэрактор; 3 - отражательная перегородка

концентрации в исходной пульпе 40 г/л концентрата и отходов с зольностью соответственно 9,4 и 86,2% при извлечении угля 76,6%. Высокая удельная производительность аппарата - 2,42 т/(м³·ч) - в сочетании с хорошими результатами разделения свидетельствует о перспективности струйной флотации.

Наиболее широко в настоящее время применяют машину Давкра (рис. 1.12), разработанную в Австралии и предназначенную для флотации руд и угля. В нижней части камеры расположен циклонный аэрактор, в который под давлением вводятся пульпа и сжатый воздух (расход воздуха 0,6-1 м³ на 1 м³ пульпы). Аэрированный поток пульпы поступает в камеру, отражается от перегородки и направляется в зону деаэрации, расположенную за перегородкой. Срок службы аэраатора 2000-2500 ч.

Колонная машина Хайдрокем с оптимальной гидродинамикой имеет восемь импеллеров (рис. 1.13, а). Различие структуры потоков по высоте колонны, противоток пульпы и воздуха, высокий пенный слой позволяют сочетать в ней преимущества колонных и импеллерных флотомашин и обогащать частицы широкого диапазона крупности.

На фабрике "Артур Уайт" (Онтарио, Канада) установлены две колонны Хайдрокем диам. 1,7 м и высотой 3,7 м каждая, одна из них для основной флотации, а другая - для перерешетки. Пенный желоб в колонне расположен по периметру, либо два желоба установлены крестообразно по диаметрам камеры. В марте 1988 г. пущены в эксплуатацию еще две колонны идентичной конструкции, но высотой 6 м. В колонне установлено пять импеллеров производительностью 100 т/сут. В настоящее время три колонны работают в операции основной, а одна - контрольной флотации. Ведутся работы по оптимизации реагентного режима и схемы

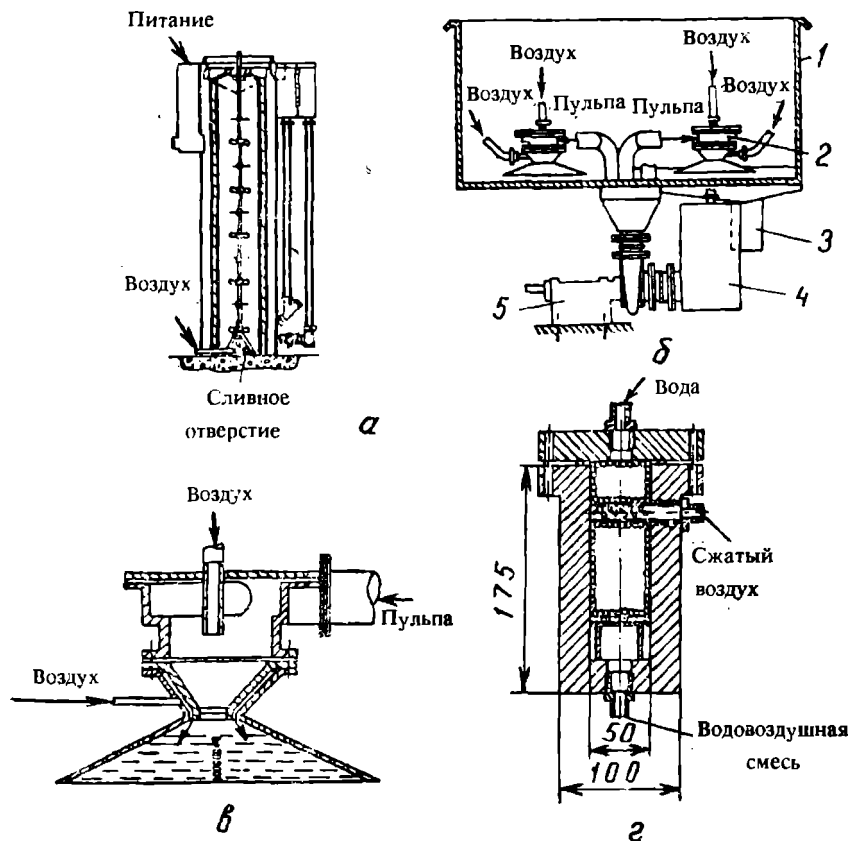


Рис. 1.13. Колонные флотомашины и пневмогидравлические аэраторы, разработанные в США:

а - колонна Хайдрокем; б - колонна Хейлпат-Миллер; 1 - камера; 2 - циклонный аэрагор; 3 - разгрузочный патрубок; 4 - зумпф; 5 - насос; в - циклонный аэрагор Хейлпат-Миллер; г - генератор пузырьков воздуха

флотации. Получен концентрат, содержащий 30 г/т золота при извлечении более 50%.

В США для обогащения угля сконструирована восьмикамерная флотационная машина Хейлпат-Миллер (патент 4613431 США) (рис. 1.13, б). Аэрация в камере осуществляется в отдельной емкости вследствие эжекции воздуха из атмосферы при вихревом движении пульпы, обеспечиваемом тангенциальной ее подачей через отверстие diam. 8-12 см под давлением около 200 кПа. В первых двух камерах предусмотрена

также подача в эти емкости дополнительного воздуха под давлением. Затем пульпа проходит через все камеры разделения, с обеих сторон которых установлен пенный желоб. Для дополнительного перемешивания пульпы с целью предотвращения седиментации крупных частиц межкамерные перегородки установлены таким образом, чтобы обеспечить многократное изменение направления движения потока. В аэрационные емкости первых двух камер поступает исходное питание, а в последующие камеры - пульпа, перекачиваемая из придонной части машины, что также увеличивает эффективность флотации крупных частиц (0,3-0,6 мм), оседающих на дно камеры. Из придонной зоны часть пульпы, содержащая крупнозернистую фракцию материала, поступает в зумпф. Под давлением, создаваемым насосом, пульпа из зумпфа распределяется между тремя циклонными аэраторами (третий аэратор на рисунке не показан) (рис. 1.13, а).

Для генерации мелких пузырьков в промышленных колонных флотационных машинах, разработанных в Горном бюро США, устанавливают камеры аэрации (внутренний диам. 5 см, длина 17 см), заполненные стеклянными шариками диам. 1 мм (рис. 1.13, б). Для создания необходимой аэрации в колонне диам. 1,8 м и высотой 12 м устанавливают 16 камер указанной конструкции; водовоздушную смесь распределяют через 107 форсунок, причем предусмотрена возможность замены неисправных форсунок и трубок без остановки процесса флотации. Средний размер пузырьков может изменяться от 0,2 до 4 мм в зависимости от давления воды и расхода пенообразователя. Разбавление пульпы водовоздушной смесью незначительно, так как поток воды через камеры аэрации составляет около 4% потока исходной пульпы.

Использование генератора пузырьков воздуха показало, что по сравнению с диспергатором из пористого стекла с размером пор 40-60 мкм генератор обеспечивает подачу пузырьков меньшего размера и более высокого газосодержания, а также снижение расхода пенообразователя. Для снижения крупности воздушных пузырьков целесообразно подавать пенообразователь в воздушную фазу перед диспергаторами воздуха. С этой целью может применяться ультразвуковой генератор аэрозолей.

В настоящее время колонные машины, конструкция которых разработана еще в 60-е годы, внедрены на ряде обогащательных фабрик Канады, США, Перу, Чили и других стран. В Канаде колонные флотомшины установлены на медно-молибденовых фабриках "Гибралтар", "Хайгмонт", "Гаспе", "Лорнекс", "Айленд", свинцово-цинковой фабрике "Полярис". В последнее время в Канаде созданы колонные машины квадратного сечения и разной высоты. Так, создана машина размером

0,9x0,9 м, состоящая из четырех колонн, имеющих размеры 45x45 см и разделенных перегородками, затем были сконструированы машины размером 1,8x1,8 м (16 колонн размером 45x45 см). Машина размером 1,8x1,8 м и высотой 13,6 м установлена в цикле пересортировки медного концентрата. При этом содержание меди в концентрате повысилось на 6% (с 16-18 до 22-24%). Практика работы канадских фабрик показала, что колонные машины наиболее эффективны для флотации тонких классов молибденовых, свинцово-цинковых и медно-молибденовых руд. Качество концентрата повышается на 2-3%. На полиметаллической фабрике "Флин Флон" при пересортировке медного концентрата в колонной машине достигнуто извлечение 80%, в то время как в механической машине - 70%. С положительными результатами внедрены колонные машины на фабриках "Чукикамата" и "Эль-Тенниенте" в Чили.

Значительные успехи достигнуты в Китае. За сравнительно короткий промежуток времени создан ряд пневматических колонных машин диаметром до 4 м, объемом 100 м³, производительностью до 2500 т в сутки преимущественно квадратного сечения (табл.1.1). Следует отметить, что основой этих работ послужили исследования и опыт внедрения пневматических машин на обогащательных фабриках России. Считается, что в колонных машинах, имеющих квадратное сечение, проще контролировать уровень пульпы и использовать пеногон, чем в машинах круглого сечения. Сконструированы машины комбинированного типа с круглым сечением в нижней части и квадратным - в верхней. Высота колонн колеблется в пределах 7-9 м в основной флотации, 6-8 м - в контрольной и 5-7 м - в пересортировочных операциях. Оптимальная высота колонны зависит от типа перерабатываемой руды. Для окисленных свинцово-цинковых руд оптимальная высота - 4,5 м.

Практика работы колонных машин на фабриках Китая показала, что они имеют явные преимущества для флотации тонких частиц крупностью -0,074 мм. При замене механических флотомашин колонными удельный расход электроэнергии снижается на 40-50%, достигается более высокая производительность на единицу производственной площади. Стоимость их в 2 раза меньше. Однако для достижения равного с импеллерными машинами извлечения время флотации в колонных машинах должно быть увеличено в 1,5-2 раза. Вместе с тем колонные машины обладают рядом недостатков: высокий расход сжатого воздуха, трудности в установке, разборке, пуске, управлении.

В последние годы в ряде стран отмечается распространение в циклах доводки молибденовых концентратов и пересортировки медных концентратов монокамерных пневматических машин Флотэйр. Первые колонные флотомашин Флотэйр с аэрацией водовоздушной смесью вместимостью

Таблица 1.1

Основные параметры колонных флогомашин, производимых в Китае

Параметры	Типоразмеры									
	600*	900*	1200*	1500*	1800*	2200	2600	3000	3500	4000
Диаметр, мм	600	900	1200	1500	1800	2200	2600	3000	3500	4000
Вместимость камер, м ³	0,85-2,0	1,9-4,4	3,4-7,9	7,0-14,0	10,0-20,0	15,2-30,4	21,0-24,0	28,0-56,0	38,5-77,0	50,0-100,0
Производительность по твердому, т/сут	30,0-50,0	75,0-120,0	135,0-220,0	210,0-250,0	300,0-500,0	450,0-750,0	630,0-1000,0	840,0-1400,0	1100,0-1900,0	1500,0-2500,0
Глубина подачи питания, мм	700-1100	750-1100	800-1200	800-1300	800-1350	850-1400	900-1450	900-1500	1050-1500	1100-1600
Способ пены	Односторонний					Двусторонний				
Мощность привода пеногона, кВт	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,8	0,8	1,1	1,1
Высота камер флотации, мм	3000-7000	3000-7000	3000-7000	3000-7000	4000-8000	4000-8000	4000-8000	4000-8000	1500-8500	1500-8500
* Флотомашины этих типоразмеров могут выпускаться без пеногонов со свободным переливом пены.										

камеры до 23 м³ применялись для флотации фосфоритов в 1979 г. Для аэрации воды под давлением не ниже 280 кПа использовали эжекторы. С 1986 г. освоен выпуск второго поколения колонн Флотэйр, в которых водовоздушная смесь образуется при эжектировании воды с пенообразователем струей сжатого воздуха (размер пузырьков около 50 мкм). Дополнительно воздух в камеру подается через пористые элементы (пузырьки крупнее 0,1 мм). Эжекция воды воздухом позволяет в 20 раз снизить расход воды на получение водовоздушной смеси по сравнению с водяным эжектором. Колонны Флотэйр второго поколения выпускаются высотой 6-15 м, вместимостью до 70 м³.

На фабриках Аризоны и Нью-Мексико (США) в операциях перемешивания медного концентрата установлено десять машин Флотэйр диам. 2,4 м и высотой 12,2-14,6 м. Скорость потока 3-8 м³/мин, содержание твердого в питании 15-28%, в пенный слой подается до 45 л/мин промывной воды. На одной из фабрик колонна заменила две механические камеры вместимостью 8,5 м³. Качество медного концентрата возросло на 3% при неизменном извлечении.

Максимальное извлечение достигается при соотношении расходов

воздуха через эжекторы и пористые диспергаторы 1:1. При флотации угольных шламов зольностью 26% и содержанием твердого 77 г/л в Пенсильвании в колонне Флотэйр диам. 2,4 м, высотой 5,2 м получен концентрат зольностью 6,3% (выход 85,2%, содержание твердого 300 г/л) и отходы зольностью 63% (15 г/л твердого); поток питания 4,28 м³/мин.

Машины Флотэйр диам. 0,76 и 2,4 м, высотой 7,3 м и 12,2 м в закрытом исполнении установлены в операции основной флотации молибденита инертным газом на фабриках в Аризоне и Юте соответственно и в перерешеточной операции. Замена механических флотомашинок на колонны позволила вдвое повысить качество молибденового концентрата. Имеются данные о промышленном применении колонн Флотэйр для перерешетки сподуменового и золотосодержащих концентратов.

В Швеции колонны Флотэйр диам. 0,76 м, высотой 7,3 м установлены в перерешетках свинцового и цинкового сульфидных концентратов, поток питания в операции 5-12 м³/ч, содержание твердого 42-43%, глубина пенного слоя 33-75 см, расход промывной воды 1,1-3,6 м³/ч, расход воздуха 31-35 м³/ч, расход воды в эжектор 2,6-3,4 л/мин.

На фабрике "Маунт Айза" (Австралия) в цикле перерешетки цинкового концентрата испытана колонная машина, в которой установлена труба диам. 10 см и высотой 1,2 м; к верхней части трубы подаются питание и воздух. Экономия воздуха достигается подачей питания в виде свободных струй через три отверстия диам. 5,5 мм. Скорость движения пульво-воздушной смеси в трубе - 10-30 см/с, продолжительность пребывания пульпы в трубе всего 3-11 с. В условиях интенсивного перемешивания происходит дробление пузырьков воздуха и закрепление на них минеральных частиц. Колонная машина имеет диам. 0,5 м и высоту 11 м. Нижний срез трубы опущен на 70 см в нижнюю часть колонны. Поток пульпы составлял 90 кг/мин, содержание твердого - 26%, расход воздуха - 100 л/мин, крупность питания - 78% класса -0,037 мм. Оптимальная толщина слоя пены - 30 см, расход промывной воды - 7-15 л/мин. На этой фабрике применение колонной машины позволило исключить четыре перерешетки концентрата при повышении извлечения металла.

Успешная эксплуатация машин колонного типа привела к усилению разработок машин новых конструкций. В США разработана машина колонного типа с вертикальной многорядной механической мешалкой, на валу которой установлены чередующиеся лопастные мешалки и диски, а на внутренней стороне колонны - четыре вертикальные пластины. Такая конструкция обеспечивает благоприятный режим для столкновения частиц с пузырьками воздуха и их последующее всплывание в пену.

ный слой. Пульпа, обработанная реагентами, подается в верхнюю часть колонны несколько ниже пенного слоя, а разгрузка хвостов производится через нижнюю часть колонны - нижний патрубок. При флотации в этой машине достигается лучшее качество концентрата при более высоком извлечении по сравнению с обычной механической машиной.

Разработана конструкция колонного флотоциклона с вращающимся потоком. Пульпа поступает тангенциально в верхнюю часть флотоциклона, в нижней, осевой, части имеется установка для поддержания высокого слоя пены. Флотоциклон представляет собой полый цилиндр с пористыми стенками, через которые подается сжатый воздух. В пристенной части возникает вращающийся поток пульпы, а в осевой - столб пены. Следует, однако, отметить, что эти аппараты испытаны лишь в лабораторных условиях.

Представляет интерес машина Бахр, состоящая из двух камер. В первой камере происходят аэрация пульпы и прикрепление минеральных частиц к воздушным пузырькам, во второй - сепарация нагруженных пузырьков воздуха. Аэрационная камера состоит из ряда пористых трубок, через которые поступает воздух под большим давлением. Идея создания такой флотомшины предусматривала сокращение расхода электроэнергии и повышение извлечения металла. Эволюция конструкций мелких пневматических машин колонного типа приведена на рис. 1.14, 1.15.

В заключение можно отметить, что в настоящее время все большее распространение получают пневматические машины колонного типа, позволяющие решить проблему извлечения тонких частиц минералов, сократить производственные площади, упростить технологические схемы, сократить расход электроэнергии во флотационном переделе и в целом повысить эффективность флотационного процесса.

Характеристика колонных пневматических флотационных машин, установленных на зарубежных обогатительных фабриках, дана в табл. 1.2.

В аппаратах статической флотации, созданных в бывшей НРБ, в качестве аэратора используют перфорированный барабан, на который надета пористая ткань (патент США 4407715). Материал поступает из питателя в верхнюю часть барабана и стекает слоем толщиной в несколько миллиметров. В процессе движения аэрированной пульпы по барабану интенсивно образуются флотокомплексы.

В качестве диспергатора воздуха во флотоциклонах используют пористые или перфорированные внутренние стенки камеры с диаметрами отверстий от 5 до 190 мкм. На крупность образующихся пузырьков основное влияние оказывают гидродинамические параметры камеры.

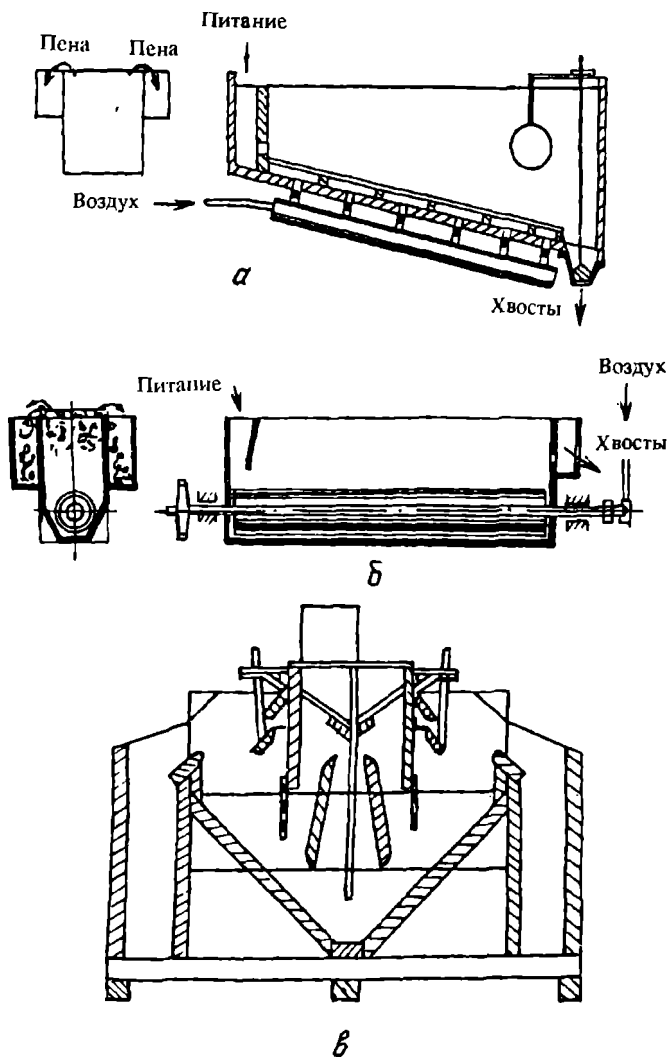


Рис. 1.14. Эволюция пневматических флотомашин:
мелкие: а - Келлоу; б - Макинтош; в - Саусвестерн

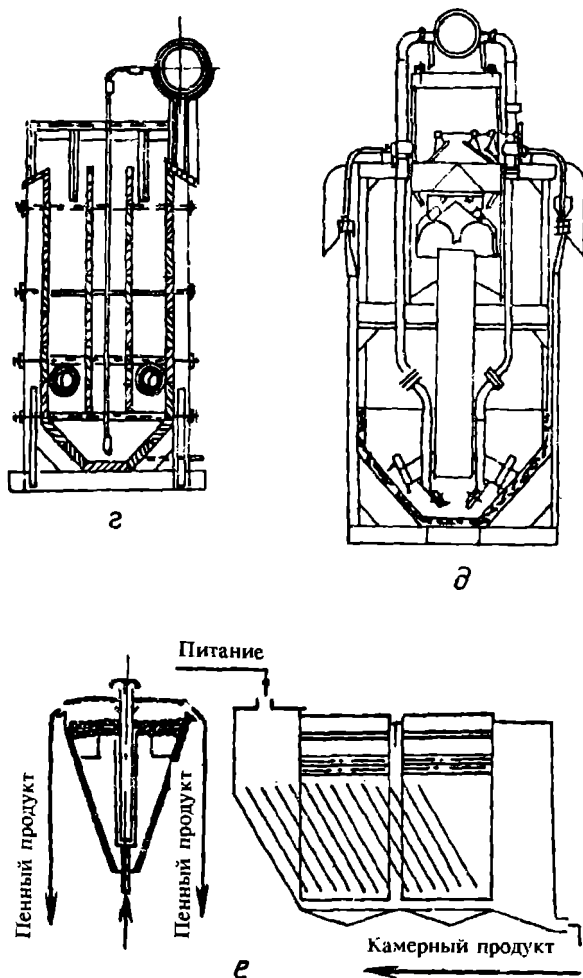


Рис. 1.14. Эволюция пневматических флотомашин:
 колонные, средней глубины: з - эрлифтная; д - эрлифтная с щелевыми аэраторами; е -
 пенной сепарации

К отдельному направлению конструирования аэраторов следует отнести создание пульсационных (вибрационных) пневматических флотационных машин (а.с. 860867, 869819, 933121, 994016, 1026832, 1052267, 1128985, 1142171 СССР). Принцип их действия основан на диспергировании воздуха при пульсациях его под давлением в камере

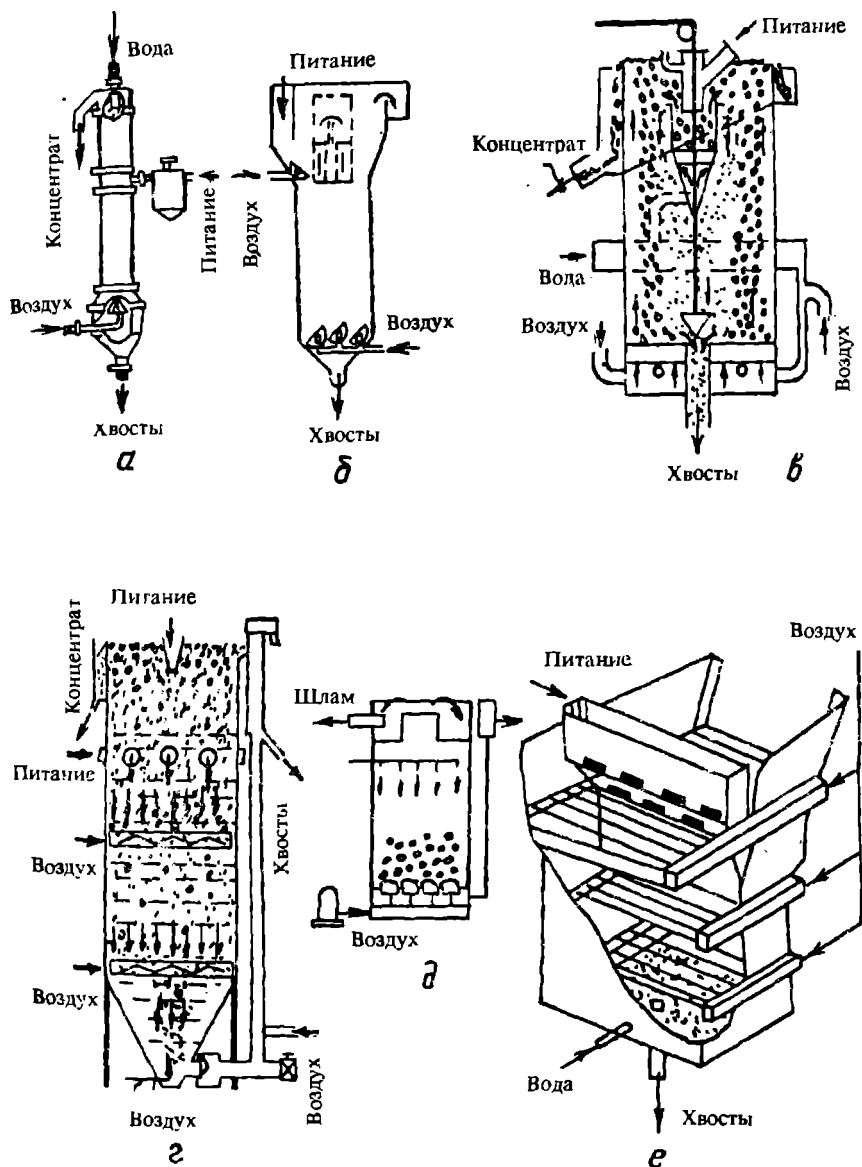


Рис. 1.15. Флотационные пневматические машины колонного типа:
 а - Бутина (Канада); б - КФП (Польша); в - Дейстер Концентратор (США); г - ФП (Ч)
 быш. ВНИИпрозолото; д - Гребнева; е - Халинворта (США).

Таблица 1.2

Характеристика колонных пневматических флотационных машин, установленных на зарубежных обогатительных фабриках

Страна, предприятие	Сырье (операция)	Фирма, параметры аппарата (способ аэрации)	Производительность по пульпе, м ³ /ч
Канада	Медные и медно-молибденовые руды (основная и перечистные флотации)	Колэзн флотейшен 0,45×0,45×12 м; 0,9×0,9×12 м; 1,8×1,8×12 м (через перфорированные или пористые материалы)	8 30 120
Мине Гаспе, Гекко, Брансуик, Гибралтар, Лорнекс, Хаймонт, Опемиска, Айленд Коппер, Бренда Шеффервилл, Поларис	Железные руды Свинцово-цинковые руды (перечистки концентратов)	Колэзн флотейшен, диам. 0,3 м Колэзн флотейшен, диам. 0,6 м, высота 10 м	Нет данных 10
ФРГ			
Вестерхолт	Уголь	МАН-ГХХ (в отдельной камере)	
Рур	Уголь	МАН-ГХХ (струйная)	500
Рур, Вестерхолт	Уголь	МАН-ГХХ, диам. 4,1 м, высота 4,6 м	550
Вестерхолт	Уголь	МАН-ГХХ, диам. 4,6 м, высота 5,1 м	800-1000
Рур	Свинцовые руды Уголь Апатит	Давкра, объем 2 м ³ (циклонная) Давкра МАН-ГХХ, объем камеры разделения 8,5 м ³	89 Нет данных 100
США			
Чино	Медно-молибденовые руды (молибденовая перечистная и контрольная флотации)	Колэзн флотейшен, диам. 0,4 м, высота 11,4 м, диам. 0,6 м, высота 11,6 м, диам. 0,3 м, высота 11,5 м Диам. 1,5 м, высота 12 м	12 100
Сан Мануэль	Медно-молибденовые руды (перечистная флотация коллективного концентрата)		
Пинто Валлей	Медно-молибденовые руды (молибденовый цикл, перечистная и контрольная флотации)	Колэзн флотейшен, диам. 0,6 м, высота 7,6 м (через тканевый аэратор)	Нет данных
Кипрус Сьеррита	Медно-молибденовые руды (молибденовая перечистная флотация)	Колэзн флотейшен, диам. 0,9 м, высота 15 м (через тканевый аэратор)	То же
Кипрус Сьеррита	Медно-молибденовая перечистная флотация	Диам. 2 м, высота 15 м Колэзн флотейшен, диам. 1,1 м, высота 11,1 м; диам. 1,8 м, высота 11,1 м (через аэратор из перфорированной резины)	”
Коппер Клифф	Медно-никелевые руды (перечистная флотация)		”

Продолжение табл.1.2

Страна, предприятие	Сырье (операция)	Фирма, параметры аппарата (способ аэрации)	Производительность по пульпе, м ³ /ч
Солт Лейк	Флюоритовые руды (основная и перечистная флотации)	ЮСБМ, диам. 6 см, высота 5,5 м; диам. 6 см, высота 4,2 м (генераторы пузырьков вне камер)	Нет данных
г.Питсбург	Уголь	Колэзн флотейшен, 0,46×0,46×12,2 м (через перфорированные трубки)	10
Шт.Монтана	Уголь	Дейстер Концентрейтор, объем 19 м ³	Нет данных
	Фосфориты	Дейстер Концентрейтор, пневматический или от эжектора)	То же
Шт. Флорида	Фосфориты	Дейстер Концентрейтор, диам. 4 м, высота 1,5 м (пневмогидравлический)	"
Австралия Риверсайд	Уголь (флотация тонких шламов)	Колэзн флотейшен диам. 1,7 м, высота 8 м (через тканевый аэратор и перфорированные трубки)	150
Либерия Бонг Майнинг	Железные руды	МАН-ГХХ, объем камеры разделения 8,5 м ³ (в отдельной камере)	Нет данных
Испания Магнетитас Наваррас	Магнетит	МАН-ГХХ, объем камеры разделения 8,5 м ³	15
Великобритания Индия	Уголь Графит (основная и перечистная флотации)	Дидс Колэзн флотейшен, диам. 0,25 м	Нет данных 5
Франция Теодор	Сильвинит	Минемет, диам. 2,1 м, высота 1,5 м (в отдельной камере)	Нет данных
Бразилия	Апатиты	МАН-ГХХ, диам. 4,5 м, высота 5,1 м	500
Чили Лос Бронзас	Медные руды (перечистная флотация)	Диам. 0,9 м, высота 12 м; диам. 0,45 м, высота 12 м (через тканевый аэратор)	Нет данных
Перу Куйон	Медно-молибденовые руды (перечистная флотация)	Колэзн флотейшен, диам. 1,8 м, высота 12,1 м (через тканевый аэратор)	То же
Папуа - Новая Гвинея Бугенвиль	Медные руды (основная и перечистная флотации)	Давкра, объем 5,7 м ³	"
Польша Болгария Медет	Серные руды Медные руды (основная флотация)	КФП, объем 5 м ³ ФП-40, объем 40 м ³	70 450

аэрации. Создаваемое этими пульсациями турбулентное движение пульпы усиливается при протекании жидкости через специальные решетки.

Дальнейшее развитие пневматической флотации связано с совершенствованием аэролифтных флотационных машин (а.с. 440161, 369932 СССР). В этих машинах зоны минерализации и сепарации также отделены друг от друга. Воздух подают через перфорированные пластины или щелевые аэраторы, а диспергирование пузырьков осуществляется в потоке пульповоздушной смеси переменного направления (сначала поднимающегося в аэролифте, а затем опускающегося). Для дополнительного диспергирования воздуха в аэролифте предусматривают сужение потока (а.с. 822904 СССР). Аэролифтное устройство флотационных машин рассматривают как пневматический аэратор, так как одна из его функций - диспергирование воздуха благодаря кинетической энергии всплывающих пузырьков и их минерализация.

1.3. СОЗДАНИЕ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ БОЛЬШЕОБЪЕМНЫХ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ФЛОТАЦИОННЫХ МАШИН

В институте "Гинцветмет" интенсивные работы по созданию глубоких флотационных пневматических машин были начаты в 70-е годы.

Поскольку эффективность работы флотационных машин во многом зависит от устройства и способа диспергирования воздуха в машине, а аэрация и дисперсный состав пузырьков влияют на скорость и селективность флотации, при разработке нового поколения флотационных пневматических машин чанового (колонного) типа с камерами большого объема было уделено особое внимание конструкциям аэрационных устройств.

В лабораторных и промышленных условиях на разных типах руд и в различных операциях флотации исследовали аэраторы из разнообразных материалов и различных конструкций. Для эксплуатации рекомендованы аэраторы из маслостойких резиновых трубок с перфорированными стенками, аэраторы газлифтного типа и решетчатые аэраторы с наложением пульсации.

Газлифтные и решетчатые аэраторы предназначены для работ в условиях агрессивных сред, грубых помолов и высоких плотностей пульпы в различных операциях флотации.

Определены оптимальные значения параметров процесса: соотношение расхода пульпы и воздуха (0,5-3,0); скорость потока пульпы (0,7-4,0 см/с); высота пенного слоя; уровень ввода питания; размеры камер.

Проведенные исследования позволили разработать конструкции нового поколения глубоких флотационных пневматических машин чанового

вого (колонного) типа с большим объемом камер.

При выборе и обосновании геометрической формы новых флотационных пневматических машин с камерами большого объема учитывалось, что в большинстве конструкций флотационных машин, имеющих прямоугольную форму, процесс флотации протекает в цилиндрическом объеме, в связи с этим часть пульпы находится вне аэрации.

Исходя из вышеизложенного, предпочтение отдавалось конструированию корпусов цилиндрической формы с точки зрения рационального использования объема камеры, а также простоты изготовления и рационального расхода металла.

Исследования аэрационных характеристик нового поколения флотационных пневматических машин показали, что наибольшее влияние на диспергируемость воздуха оказывают концентрация вспенивателя, pH среды, конструкция аэратора и расход воздуха.

Важное значение в повышении эффективности работы глубоких флотационных пневматических машин имеет правильный выбор направления в них потока пульпы по отношению к направлению движения пузырьков. Изменение направления движения фаз от прямотока к противотоку приводит к увеличению значений газосодержания в 1,5-2,0 раза, что связано с различной скоростью движения пузырьков. Соответственно увеличиваются "живое сечение" газовой фазы и время минерализа-

ции воздушных пузырьков, которое при противотоке в 2-3 раза выше, чем при прямотоке. Экспериментально определены скорости всплывания пузырьков в чистой воде в лабораторных условиях.

На специально сконструированной установке (рис. 1.16) изучали кинетику всплывания пузырьков и другие параметры процесса флотации в глубокой флотационной пневматической лабораторной машине и в промышлен-

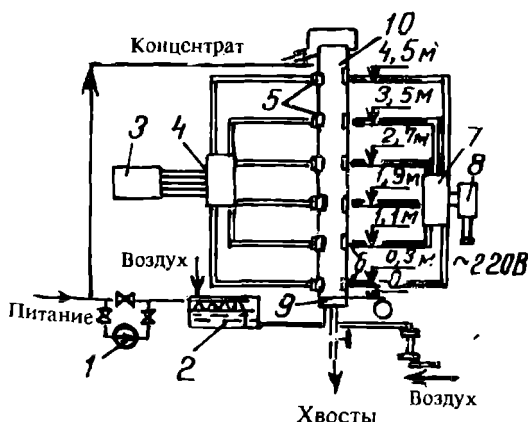


Рис. 1.16. Схема установки для изучения кинетики всплывания пузырьков и других параметров в глубокой флотационной пневматической машине:

1 - насос; 2 - резервуар; 3 - записывающий прибор ЭПП-9; 4 - фотокомпенсационный усилитель; 5 - фотоэлементы; 6 - источник света; 7 - блок подстроечных резисторов; 8 - стабилизатор напряжения; 9 - дроссирующая диафрагма; 10 - колонная флотомашина

ных условиях во флотомашинах с объемом камер 40 и 100 м³.

Проведенные исследования позволили разработать конструкции глубоких флотационных пневматических машин нового поколения с камерами большого объема (от 10 до 220 м³) (табл. 1.3), изготавливаемых Усольским заводом горного оборудования.

Работа машин основана на принципе противоточного и прямоточного движения пульпы и воздуха. Машина представляет собой выполненную из листовой стали, бетона, дерева и других материалов глубокую цилиндрическую камеру с коническим основанием - днищем (сечение его может быть круглым, эллиптическим, прямоугольным и др.).

В дальнейшем конструкции данных машин совершенствовались с целью создания универсальной флотомшины для использования в различных операциях флотации.

Исследования влияния направления движения пульпы и пузырьков воздуха в камере на результаты флотации показали, что для улучшения флотации целесообразно совмещение в одной камере противоточного и прямоточного направлений движения фаз. Этот принцип учтен при разработке флотационной пневматической машины ФП-80 с использованием газлифтного аэратора (рис. 1.17).

Разработаны конструкции машин, оснащенных трубчатыми аэраторами в виде объемной решетки (рис. 1.18, а), трубчатым аэратором в виде двухзаходной спирали (рис. 1.18, б), что обеспечивает поддержание заданного фракционного состава пузырьков в процессе флотации, а также конструкции машин, оснащенных аэраторами с утолщенной трубкой в виде катушки (рис. 1.18, в), что обеспечивает долговечность в работе и возможность использования флотомшины с аэратором данной конструкции в циклах межциклового флотации.

Разработаны оригинальные конструкции каскадной и пульсационной флотационных машин (рис. 1.19, 1.20), действующих по принципу пневматической машины и обеспечивающих те же технологические показатели при традиционной высоте аппарата. Особенность каскадной флотационной машины заключается в способе контактирования пульпы с воздухом. Пульпа подается через патрубок, воздух всасывается через верхнее отверстие. За счет расширения потока пульпы после ее прохождения через эжектор создается разрежение, под действием которого происходит всасывание воздуха, и пульпа в транспортирующей трубе насыщается пузырьками воздуха. Благодаря высокой интенсивности перемешивания происходит быстрое захватывание частиц и обеспечивается высокое их извлечение при очень малой продолжительности нахождения пульпы во флотокамере.

Основные достоинства конструкции данной флотомшины состоят в

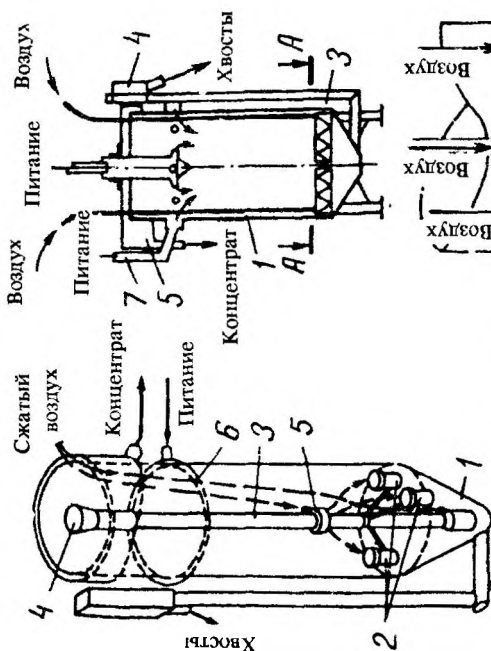


Рис. 3.17. Схема пневматической флотомашини ФП-80 с азаратором газлифтного типа:

1 - центральный азаратор; 2 - периферические азараторы; 3 - центральная эрлифтная труба; 4 - отражательный колпак; 5 - воздушный коллектор; 6 - питающее устройство

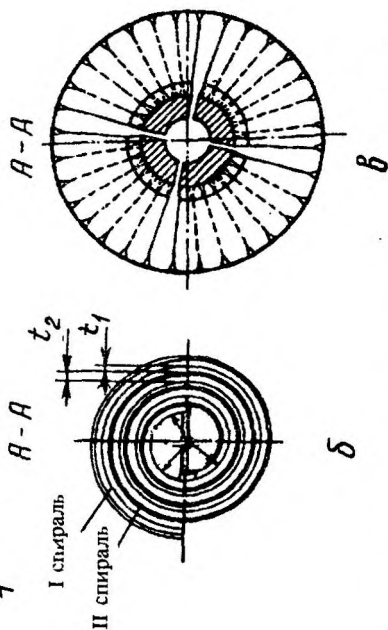
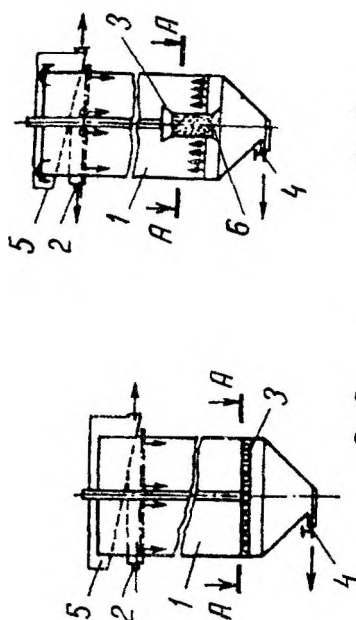


Рис. 1.18. Новые конструкции флотационных пневматических машин чанового (колонного) типа: а - азаратор в виде обменной решетки; б - азаратор трубчатый, с двухзаходной спиралью; в - азаратор в виде утолщенных трубок; 1 - основная камера; 2 - распределитель питания; 3 - диспергатор воздуха; 4 - разгрузочный карман; 5 - пенный желоб

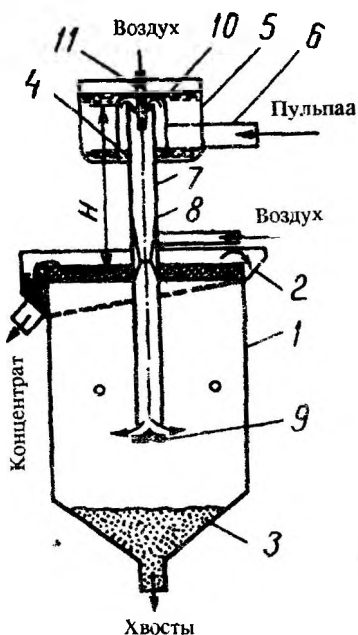


Рис. 1.19. Каскадная флотационная пневматическая машина ФП-220:

1 - корпус; 2 - желоб; 3 - разгрузочное устройство; 4 - труба; 5 - коллектор; 6 - пульпоподводящая труба; 7 - пульповоздушный коллектор; 8 - эжектор; 9 - отбойник; 10 - колпак; 11 - воздухоподсасывающая труба; 12 - воздуховод для принудительной подачи воздуха

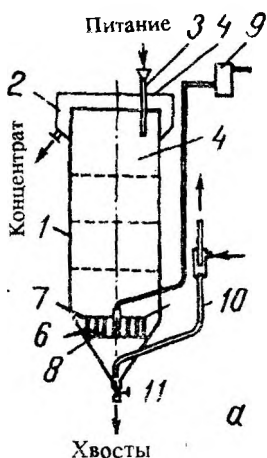


Рис. 1.20. Флотационная пневматическая пульсационная машина:

а - разрез; б - диспергатор в изометрии; 1 - камера; 2 - желоб; 3 - загрузочное устройство; 4 - перфорированные перегородки; 5 - диспергатор воздуха; 6 - концентрические пустотелые кольца; 7 - радиальные переемы; 8 - нижние кромки колец; 9 - пульсатор; 10 - разгрузка камерного продукта; 11 - полная разгрузка камерного продукта при освобождении машины

Таблица 1.3

Техническая характеристика флотационных пневматических машин колонного типа, разработанных институтом "Гинцветмет"

Показатели	ФП-1	ФП-2,5	ФП-6,3	ФП-10	ФП-25	ФП-40	ФП-80	ФП-100	ФП-220
Объем камеры, м ³	1	2,5	6,3	10	25	40	80	100	220
Полезный объем камеры, м ³	0,75	2,2	5,3	7	20	30	65	85	180
Производительность по потоку пульпы, м ³ /мин:									
противоток	0,3	0,7	2,1	3	6	10	15	18	35
прямоток	0,5	1	3	4,5	9	15	22	27	52
Размеры камеры, м:									
диаметр	0,6	0,8	1,3	2	3,4	3,4	3,4	3,4	4,5
высота	5	5	5	5,2	3,7	4,9	11	12	16
Максимальный расход воздуха на одну камеру (технологический и транспортный), м ³ /мин	0,9	1,3	3,2	7,5	10	15	30	40	50
Избыточное давление воздуха на входе в аэратор, МПа	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,18	0,22	0,3
Мощность, затрачиваемая на подачу в одну камеру максимального расхода воздуха, кВт	2,6	3,8	9,3	21,8	29	43,5	67	88	
Площадь пола, занимаемая одной камерой машины (без пенных желобов и площадок обслуживания), м ²	0,28	0,5	1,33	3,1	9,1	9,1	9,1	9,1	15,9
Масса камеры, т	0,6	0,8	1,4	3,1	5,8	7,2	12	14	26

том, что она не требует установки воздухоудвки или компрессора при минимальных затратах на обслуживание из-за отсутствия в машине диспергирующих устройств. Процесс флотации стабилен и прост в управлении. В настоящее время усовершенствованы конструкции машин с газлифтными аэраторами с регулированием гранулометрического состава минерализованных пузырьков, производительности и со струйным аэратором (рис. 1.21).

Разработана и внедрена флотационная пневматическая машина с прямоточно-противоточным режимом работы в закрытом исполнении для использования при флотации в среде азота и других газов (рис. 1.22).

На базе данных разработок и результатов промышленных испытаний на Жирекенской обогатительной фабрике внедрены впервые в отечественной и мировой практике в цикле коллективной медно-молибденовой флотации и перечистки коллективного концентрата флотационные пневматические машины ФП-10 и ФП-80. Промышленные испытания флотомашины ФП-80 выявили ее эффективность по сравнению с механическими и пневмомеханическими машинами и подтвердили целесообразность установки машин данного типа на флотационных фабриках.

Т а б л и ц а 1.4

Практика применения флотационных пневматических машин чанового (колонного) типа, разработанных институтом "Гинцветмет" на отечественных предприятиях

Предприятия	Типоразмер	Перерабатываемое сырье и место установки	Полученный эффект
Приморская обогатительная фабрика	ФП-10 ФП-6,3 ФП-1 ФП-40	Вольфрамовые руды, основная, контрольная и перечистная шеелитовые флотации и флотация сульфидов	Прирост извлечения - 0,7%
Сорский молибденовый комбинат	ФП-40	Молибдено-медные руды, основная и контрольная флотации	Снижение расхода электроэнергии, повышение качества молибденового концентрата
Чорух-Дайронская обогатительная фабрика	ФП-10	Молибдено-медно-вольфрамовые руды, контрольная флотация и дофлотация ценных минералов из отвальных хвостов	Прирост извлечения благородных металлов - 3%, меди - 0,3%, молибдена - 0,15%
Текелйский свинцово-цинковый комбинат	ФП-40	Свинцово-цинково-баритовые руды, контрольная флотация и дофлотация цинка и барита из отвальных хвостов	Прирост извлечения цинка - 1,5%, барита - 2%
Комбинат "Ачполиметалл": обогатительная фабрика	ФП-40 ФП-25 ФП-60	Свинцово-цинково-баритовые руды, основная, контрольная флотации и дофлотация цинка и барита из отвальных хвостов	Прирост извлечения цинка - 1,7%, барита - 1,5-2,2%
Участок дофлотации хвостов	ФП-40 ФП-10	Дофлотация барита из лежалых хвостов ранее перерабатываемых руд по схеме: основная, контрольная и перечистная флотации	Доизвлечение барита - 30-32%

Продолжение табл.1.4

Предприятия	Типоразмер	Перерабатываемое сырье и место установки	Полученный эффект
Ангренская золотоизвлекательная фабрика	ФП-80 ФП-100	Золотосодержащие руды, основная, контрольная флотации и дофлотация благородных металлов из хвостов сорбционного выщелачивания	Прирост извлечения золота - 1,4%, серебра - 2%, снижение расхода электроэнергии на 3 млн. кВт/год
Устарасайская висмутовая фабрика	ФП-40	Висмутовые руды, основная, контрольная флотации и увеличение фронта флотации к действующей схеме	Прирост извлечения висмута - 5-10%
Опытное производство ПО "Узбекзолото"	ФП-40 ФП-10	Золотосодержащие руды, основная, контрольная флотации и бактериальное выщелачивание	Повышение качества золотого концентрата и прирост извлечения золота - 1,92%
Ключевская золотоизвлекательная фабрика	ФП-40	Золотосодержащие руды, основная и контрольная флотации	Снижение расхода электроэнергии
Актозская обогатительная фабрика	ФП-1	Редкоземельные руды, контрольная флотация	Повышение качества концентрата и прирост извлечения - 1,2%
Талнахская обогатительная фабрика	ФП-80	Медно-никелевые руды, основная и перемешная флотации	Снижение потерь никеля в медном концентрате
Жирекенский горно-обогатительный комбинат	ФП-6,3 ФП-10 ФП-80	Молибдено-медные руды, основная, контрольная, перемешная флотации и доводка молибденового концентрата	Снижение расхода электроэнергии - 10 млн. кВт/год, повышение качества концентрата, снижение капитальных затрат

Продолжение табл.1.4

Предприятие	Типоразмер	Перерабатываемое сырье и место установки	Полученный эффект
Кировобадский опытный завод	ФП-6,3 ФП-1	Алунитовые руды, основная, контрольная и перечистная флотации	Повышение качества концентрата - 8% и прирост извлечения - 8,3%
Липецкий тракторный завод	ФП-10	Очистка сточных вод от красок и масел	
Омский тракторный завод	ФП-10	Очистка сточных вод от красок и масел	
Гинцветмет (стенд)	ФП-2,5	Отработка аэрогидродинамических параметров	
Надеждинский металлургический завод	ФП-220	Дофлотация кобальта и серы из хвостов автоклавного выщелачивания	Прирост извлечения кобальта - 0,5%, серы - 3%
Джезказганский горно-металлургический комбинат	ФП-40	Медные руды, основная и контрольная флотации	Повышение качества медного концентрата - 10%
Медетская обогатительная фабрика (НРБ)	ФП-40	Медные руды, основная флотация и дофлотация хвостов, после контрольной флотации и хвостов перечистой флотации	Повышение извлечения меди - 0,3%
Тырныауский вольфрам-молибденовый комбинат	ФП-25	Молибдено-медно-вольфрамовые руды, перечистная флотация коллективного медно-молибденового концентрата	Повышение качества концентрата - 2% и прирост извлечения молибдена - 1,5%

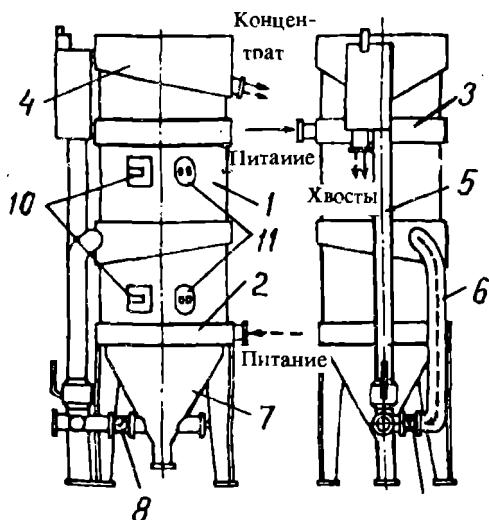


Рис. 1.22. Усовершенствованная прямоточно-противоточная флотационная пневматическая машина ФП-100:

----- работа машины в режиме противотока; - - - - работа машины в режиме прямотока; 1 - камера; 2 - нижнее загрузочное устройство (прямоточное); 3 - верхнее загрузочное устройство (противоточное); 4 - пенный желоб; 5 - эрлифт; 6 - прямоточное хвостовое разгрузочное устройство; 7 - конус; 8, 9 - задвижки; 10 - люк ремонтный; 11 - люк воздухоподвода и отвода конденсата

Эти флотационные машины имеют эксплуатационные и экономические преимущества перед широко распространенными флотомашинами. При идентичных технологических показателях металлоемкость меньше в 2-3 раза, площадь установки - в 2 раза, потребление электроэнергии - в 1,5-2,0 раза, качество концентратов на 2-3% выше. Извлечение ценных металлов повышается на 0,3-3,0%. Опыт эксплуатации флотомашин чанового (колонного) типа открывает перспективу использования большеобъемных пневматических флотационных машин при обогащении полезных ископаемых и очистке вод различных производств (табл.1.4).

ГЛАВА 2. ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ АЭРАТОРЫ

2.1. КОНСТРУКЦИИ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ АЭРАТОРОВ

Разработка и широкое внедрение большеобъемных флотационных пневматических машин для обогащения руд цветных, редких, благородных, черных металлов, других полезных ископаемых во многом зависят от выбора рациональной конструкции аэрационного узла, так как воздух является основным рабочим элементом флотационной системы, а процессы аэрации определяют технологические и конструктивные параметры машин.

В качестве критерия оценки работы любого пневматического аэратора можно принять возможность создания во флотационной камере условий оптимальной аэрации, под которой понимается совокупность следующих факторов: необходимая степень аэрации (насыщение пульпы воздухом) и поддержание твердой фазы пульпы во взвешенном состоянии; высокая дисперсность воздушной фазы (во многом зависящая от конструкции диспергатора воздуха); равномерное распределение воздушной фазы по всему сечению камеры; наиболее полная реализация явлений выделения газа из раствора; возможность широкого регулирования размера пузырьков, скорости всплывания частиц и пузырьков; обеспечение аэродинамического режима в камере для успешного образования флотокомплекса.

Существующие конструкции пневматических аэраторов можно подразделить на три типа в зависимости от крупности пузырьков, получаемых при пропускании воздуха сквозь пористые перегородки: для аэрирования мелкими (диам. 0,1-0,5 мм), средними (диам. 0,5-0,3 мм) и крупными (диам. 3 мм) пузырьками воздуха.

К первому типу относятся аэраторы керамические, тканевые, пластиковые, металлокерамические, титановые и др.; ко второму типу -

аэраторы из эластичных перфорированных материалов (резины, полиуретана); к третьему типу - аэраторы в виде открытых перфорированных (неэластичных) труб, сопел, колец и дисков.

Испытания различных материалов позволили выбрать для изготовления аэраторов трубки из эластичных материалов с перфорированными стенками. Такие аэраторы имеют ровную пропускную способность по всей поверхности, обладают начальным сопротивлением, препятствующим проникновению пульпы (жидкости) и тонких частиц вовнутрь после отключения воздуха, износостойкостью при работе в агрессивных и абразивных средах.

Большое значение имеют свойства эластичного материала при изготовлении эффективных и надежных аэраторов. Исследования работы трубок из различных материалов по твердости показали, что при одном и том же давлении газопроницаемость аэраторов уменьшается при переходе от мягкого материала к более твердому, а с ростом давления при одном и том же расходе воздуха дисперсность пузырьков увеличивается.

При массовом всплывании пузырьков воздуха возможны следующие аэрогидродинамические режимы: барботажный, барботажно-струйный, струйный и подвижной пены. Возникновение того или иного режима зависит от конструктивных и технологических факторов. Барботажный режим возникает при истечении воздуха через воздухораспределительные устройства одиночными пузырьками. В этом случае крупность пузырьков зависит от размера пор и отверстий, через которые они выходят. Пузырьки воздуха, образующиеся на перфорированной сетке с множеством пор, имеют ту же крупность, что и пузырьки, истекающие из одиночного отверстия (поры). При скорости выхода из пор, превышающей скорость всплывания пузырьков, возникает барботажно-струйный режим. Над отверстием образуется факел (струя) воздуха, от которого отделяются крупные пузыри, дробящиеся затем на более мелкие. В этом случае крупность пузырьков уже не зависит от диаметра отверстий, а целиком определяется гидроаэродинамической обстановкой в барботажном слое.

Струйный режим возникает при небольшой глубине барботируемого слоя жидкости. При больших скоростях выхода воздуха барботажный слой нестабилен, и часть воздуха проскакивает через жидкость в виде струек, окруженных газовой воздушной смесью.

При большой глубине слоя (столба) жидкости и высокой интенсивности аэрации возникает режим подвижной пены. Барботажный слой в этом случае сильно турбулизован и внешне похож на пену. В отличие от истинной пены при прекращении подачи воздуха в жидкость оседание подвижной пены происходит сравнительно быстро.

Наблюдения показывают, что мелкопузырчатые аэраторы работают в барботажном режиме. Размер пузырьков определяется размером пор (отверстий) аэраторов.

Среднепузырчатые аэраторы работают в барботажном - струйном режиме. Размеры пузырьков зависят от расхода воздуха, проходящего на одну пору (отверстие). Образующиеся пузырьки воздуха неустойчивы и, всплыв на 15-20 см, начинают дробиться на более мелкие (основная масса поднимающихся пузырьков вне зависимости от диаметра отверстий имеет размеры 3-5 мм).

Мелкопузырчатые аэраторы

Широко распространенными типами пористых аэраторов являются керамические пластины (30х30 см, толщиной до 4 см) и трубы, изготавливаемые из дробленого шамота, связанного смесью жидкого стекла с мелкой шамотной пылью, или из кварцевого песка и кокса, связанных бакелитовой смолой.

В отечественной практике чаще всего применяются керамические аэраторы. Серьезным недостатком керамических аэраторов является зарастание их пор, которое приводит к ухудшению распределения воздуха в машине. По мнению некоторых исследователей, наибольшее засорение происходит с внутренней стороны и обусловлено наличием пыли, окалина и ржавчины в продуваемом воздухе. Чтобы преодолеть сопротивление в аэраторах, необходимо увеличивать напор (давление) воздуха в сети и соответственно расход электроэнергии (через 4-5 мес работы аэраторов потери напора в них возрастают в 1,2-2 раза, а через 6-8 мес их необходимо менять).

Изысканию способов регенерации керамических аэраторов посвящены многие работы. Однако предлагаемые и применяющиеся методы очистки и обжига трубчатых аэраторов с последующей промывкой лишь несколько восстанавливают их газопроницаемость, да и то на сравнительно короткий срок. Поэтому для увеличения срока службы керамических аэраторов принимаются меры, способствующие замедлению засорения. Аэраторы делают двухслойными и меньшей толщины или с более крупными порами. Воздух, подводимый к ним, предварительно очищают от пыли.

Несмотря на столь серьезные недостатки, трубчатые аэраторы из твердых материалов до сего времени остаются в нашей стране основным типом пористого аэратора, а также достаточно широко применяются за рубежом. Это объясняется тем, что керамические аэраторы обеспечивают хорошее диспергирование воздуха и сравнительно высокую эффективность его использования.

Многочисленные исследования велись в целях устранения недостатков керамических аэраторов. Трудности их монтажа в значительной степени преодолены применением купольных аэраторов.

Конструкция купольных аэраторов довольно проста (рис. 2.1, а). Стенки и крышка цилиндра выполнены из той же пористой массы, что и сам аэратор. В нижней части цилиндр открыт и прижимается к опорной пластине. Воздухопроницаемость в месте соединения цилиндра с опорной пластиной достигается установкой резиновой прокладки. Воздух подается в аэратор из воздуховода через тело крепежного болта и, просачиваясь, выходит через пористую поверхность наружу. Куполы обычно устанавливаются на горизонтальном воздуховоде (коллекторе), расположенном в нижней части на стыке цилиндрической и керамической частей машины, с расстояниями между центрами 200-250 мм. Средний расход воздуха на один купол 160 л/мин. Испытания купольных аэраторов показали, что они работают только верхней своей частью и воздух не продувается через боковые стенки даже при значительном увеличении его расхода на один купол. Поэтому эффективной поверхностью этих аэраторов является горизонтальная поверхность (площадь боковых стенок в расчет не принимают). Именно этим и можно объяснить тенденцию к применению грибовидных и дисковых аэраторов.

Грибовидный аэратор имеет форму шляпки гриба (рис. 2.1, б), а

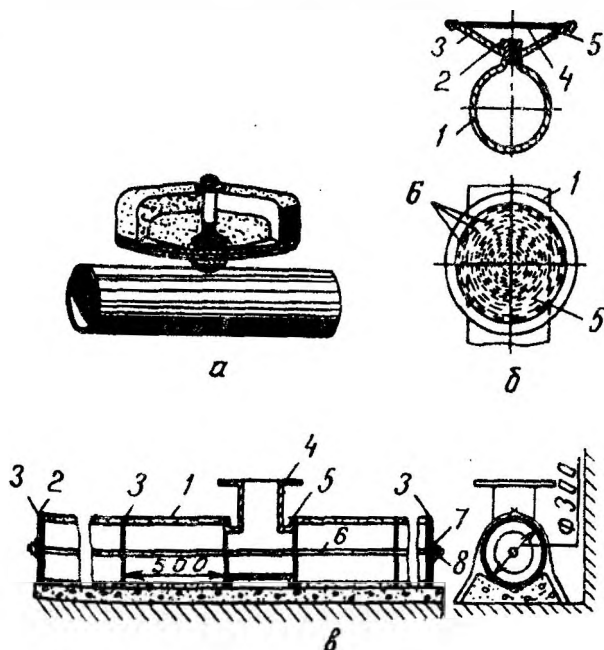


Рис. 2.1. Керамические аэраторы:

а - купольный; б - грибовидный; 1 - труба; 2 - полый болт; 3 - поддерживающая воронка; 4 - металлическая опорная плита с центральным отверстием; 5 - перфорированная диафрагма из эластичного материала; 6 - щелевидные отверстия; в - аэратор в виде пористой трубы

дисковый представляет собой круглую керамическую пластину с отверстием в центре, конструкция крепления грибовидного и дискового аэраторов та же, что и у купольного.

К достоинствам купольных грибовидных и дисковых аэраторов следует отнести легкость замены, большую механическую прочность, потребность в малом количестве стояков. Недостатками их являются постепенное засорение пор, как и у керамических трубчатых аэраторов, и необходимость опорожнения камеры (машины) при их замене, хотя времени на саму замену требуется мало.

Следует отметить, что купольные, грибовидные и дисковые аэраторы запатентованы главным образом в Англии. В США, для того чтобы избежать трудностей при монтаже плоских аэраторов, впервые были применены пористые керамические трубы диам. до 100 мм.

В производственных условиях испытаны конструкции пневматических аэраторов с использованием керамических труб диам. 300 мм. Аэратор состоит из одной или нескольких труб (в зависимости от размера машины), уложенных в нижней части машины (рис. 2.1, а). Пористая труба состоит из секций 1 (длиной 500 мм каждая), соединенных между собой резиновыми кольцевыми прокладками 3. Концы трубы герметизируются заглушкой 2, имеющей в центре отверстия для прохода натяжного стержня. Уплотняют стыки и крепят секции аэратора натяжным стержнем 6, который имеет на концах резьбу и натяжные гайки 8. Отверстия для прохода стержня герметизируются резиновыми прокладками и шайбами 7. Воздух в аэратор подается по стояку, который присоединен к тройнику 4. К тройнику приварены фланцы 5, соответствующие размерам пористой трубы.

Монтаж аэратора этого типа значительно проще по сравнению с предыдущими типами аэраторов - крепление отдельных секций и уплотнение стыков производится только натяжением стержня, благодаря чему можно быстро демонтировать и вновь смонтировать аэратор (например, для регенерации отдельных пористых элементов). Другим преимуществом такого аэратора является его значительная прочность, так как круглая труба, напряженная с торцов, имеет большую жесткость при продольных изгибах, чем лоток прямоугольного сечения, связанный жестко с конструкцией днища машины. Аэраторы из пористых керамических труб успешно эксплуатируются в течение нескольких лет. При использовании керамических труб малого диаметра их располагают в виде решеток по сечению машины, присоединяя 40-100 трубок к общему коллектору. Такие конструкции нашли широкое применение за рубежом.

Анализ достоинств и недостатков керамических аэраторов определил

интерес исследователей к другим пористым материалам. В США и ФРГ в конструкциях аэраторов используют пористые пластины. Чаше других применяются так называемые "сарановые трубки", представляющие собой стальной каркас в виде цилиндрической сетки, снаружи обтянутой пористым пластиком. В другой конструкции аэраторов пористый пластик с помощью прижимной рамки крепится к коробу на болтах. Испытания более 30 образцов пористых пластиков, проведенные в ФРГ, свидетельствуют о том, что лучшие образцы их обеспечивают столь же высокую эффективность, как и пористая керамика, но имеют в 5-10 раз меньшее сопротивление.

В отечественной практике также были сделаны попытки применения аэраторов с использованием пористой пластмассы. На Курьяновской станции аэрации были испытаны трубчатые аэраторы из мелкопористого полиэтилена. Результаты испытаний показали, что эффективность этих аэраторов незначительно (на 4-6%) выше эффективности керамических пластин.

Сделаны попытки использовать для аэраторов различного рода синтетические ткани. Тканевый аэратор в виде тарелки, сверху обтянутый тканью и прикрепленный к тарелке металлическим хомутом (рис. 2.2, а), предложен американской фирмой "Инфилко". Крепление отдельных тарельчатых аэраторов к горизонтальному воздуховоду выполняется с помощью резьбовых соединений. Недостатком конструкции тарельча-

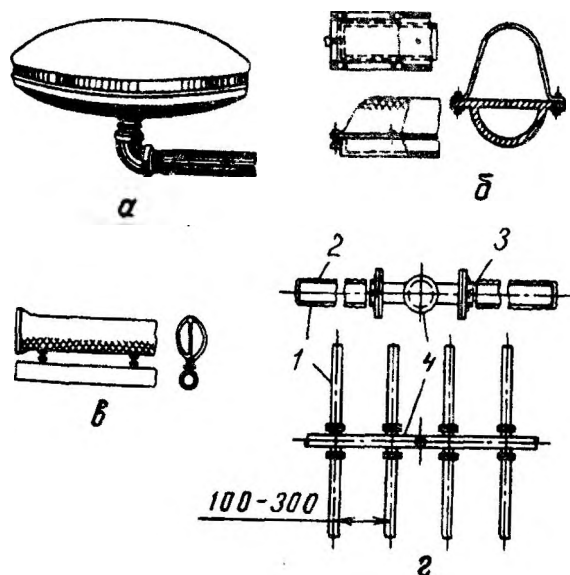


Рис. 2.2. Тканевые аэраторы:

а - тарельчатый аэратор фирмы "Инфилко"; б - горизонтальная и в - вертикальная рамки фирмы "Чикаго компани"; г - решетчатый аэратор конструкции института ВОДГЕО

того аэратора является невозможность его замены без опорожнения машины.

Конструкции тканевых аэраторов в виде вертикальной и горизонтальной рамок (рис. 2.2, б, в) разработаны и предложены фирмой "Чикаго компани". Зпатентованы два варианта конструктивного решения. В первом варианте два тканевых полотнища по периметру крепятся металлической рамкой. Воздух подается в пространство между полотнищами. Во время эксплуатации ткань раздувается, при этом в верхней части создается зона выхода пузырьков воздуха. При отключении подачи воздуха тканевые полотнища сжимаются, предотвращая попадание воды и твердых частичек в аэратор. Во втором варианте конструкции аэратора ткань обтягивает металлический короб, к которому она прикреплена прижимной рамкой. Аэраторы обоих типов крепятся в виде решеток к горизонтальной распределительной трубе, соединенной с имеющим устройство для подъема стояком.

В институтах ВОДГЕО и "Гинцветмет" разработаны и испытаны несколько конструкций тканевых аэраторов с использованием отечественных материалов. Рамный тканевый аэратор состоит из рамы, собранной из перфорированных металлических труб. На раму натянут чехол из синтетической ткани. Чехол прикреплен к торцам рамы хомутами. К одному подающему стояку присоединены две рамы. Крупномасштабные испытания выявили недостатки этой конструкции: значительная выталкивающая сила (0,75 т на одну раму), которая приводит к усложнению и большой массе конструкции.

Тарельчатые тканевые аэраторы, аналогичные аэраторам фирмы "Инфилко", могут быть рекомендованы для флотомашин различных объемов (производительности), а также в тех случаях, когда по тем или иным причинам требуется рассредоточенная подача воздуха в машины.

Решетчатый тканевый аэратор (рис. 2.2, г) состоит из коллектора 4, к которому с помощью фланцев под прямым углом присоединены перфорированные трубки 1, на трубки натянуты чехлы из капроновой ткани 2, прикрепленные к трубкам хомутами 3.

На Киршском нефтеперерабатывающем заводе были успешно проведены полупроизводственные испытания решетчатого аэратора с трубками из уголков, на которые ткань наклеена эпоксидной смолой. Опыт изготовления этих аэраторов показывает, что их недостатком является большая трудность наклейки ткани на уголки.

Очевидно, наиболее целесообразным следует считать применение тканевых чехлов, надеваемых на перфорированные трубки. Тканевые аэраторы обладают многими преимуществами по сравнению с керамическими. Одним из достоинств тканевых аэраторов является их полная

регенерация при промывке. Следует также отметить, что ткани относительно дешевы: лучшая из отечественных тканей - капроновая ткань арт. 56007 в 5 раз дешевле керамических трубок. К достоинствам решетчатых аэраторов следует отнести возможность их расположения на любой глубине, что позволяет использовать их в системах низконапорной аэрации, а также возможность варьирования ширины аэрированной зоны, количества и расположения пористых трубок.

Среднепузырчатые аэраторы

Присущий всем мелкопористым аэраторам недостаток - засорение пор (и связанный с ним рост сопротивления) - привел к поискам более совершенных конструктивных решений. В настоящее время существует значительное количество различных аэраторов, создающих пузырьки среднего размера. Созданы аэраторы, у которых газопроницаемость через отверстия в несколько раз больше, чем в мелкопузырчатых аэраторах. В аэраторах с большими отверстиями значительно снижаются потери напора при продувке воздуха, но необходима строгая горизонтальность труб. В противном случае воздух выходит только через часть отверстий.

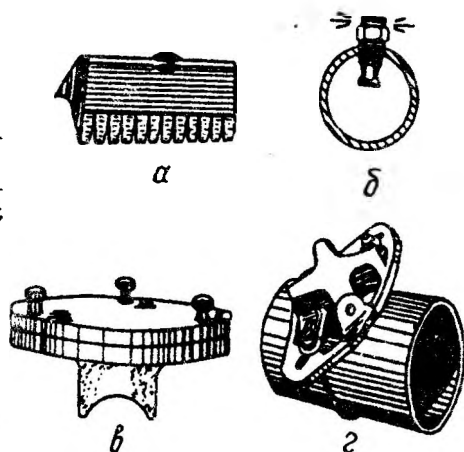
В первой конструкции такого аэратора перфорированные трубы с диам. отверстий 3-4 мм укладывали в виде решеток, отверстия располагали в два ряда вдоль каждой трубы (под углом 45° к вертикали). Иногда вместо отверстий в трубах делают прорезы. Опыт эксплуатации стальных перфорированных труб показал, что через короткий срок отверстия зарастают ржавчиной и подача воздуха уменьшается.

В США применяются медные трубы. Фирмой "Америкен велл воркс аврора" предложен незарастающий аэратор, устанавливаемый на горизонтальной трубе, в которой предварительно сделаны отверстия. Воздух из отверстий попадает под сплошной купол аэратора и затем выходит через щели между зубцами (рис. 2.3, а). В случае засорения верхней части щели начинает работать нижележащий ее участок.

Аэратор фирмы "Линк белт" (США) состоит из цилиндрического корпуса, ввинчиваемого в отверстие на горизонтальной распределительной воздушной трубе. На боковой поверхности корпуса - четыре вертикальных ряда отверстий диам. 3-5 мм, по три отверстия в каждом ряду. Корпус аэратора может быть укреплен на трубе с помощью хомута. В корпус сверху заворачивается регулировочный винт, который может закрывать верхнее отверстие в каждом вертикальном ряду, оставляя открытыми 8 или 4 отверстия. После поворота до желаемого положения регулировочный винт закрепляют контргайкой, чтобы не допустить засорения горизонтальной воздушной распределительной трубы взвешен-

Рис. 2.3. Металлические аэраторы:

а - щелевой (гребневой); *б* - купольный с седельчатым клапаном;
в - тарельчатый; *г* - спарджер



ными частицами. В корпус аэратора перед закручиванием регулировочного винта вставляют металлический шар, служащий обратным клапаном. Такая конструкция позволяет регулировать в зависимости от местных условий как количество подаваемого воздуха, так и величину сопротивления при прохождении воздуха через аэратор.

В США и Франции применяются купольные аэраторы с седельчатым клапаном. При работе аэраторов клапан открывается, и воздух выходит через кольцевую щель (рис. 2.3, б). При отключении подачи воздуха клапан под тяжестью собственной массы закрывается, предотвращая попадание пульпы в воздухопровод.

Аналогичный принцип работы заложен в аэратор тарельчатого типа (рис. 2.3, в), который представляет собой круглую металлическую пластину - тарелку, передвигающуюся по направляющим болтам. Тарелка свободно лежит в седлообразном корпусе. Под давлением воздуха тарелка поднимается, образуя кольцевое пространство, через которое воздух поступает в камеру. Регулировочными болтами ограничивается максимальная величина щели. Испытания показали, что эти аэраторы работают надежно только в режиме среднепузырчатой аэрации, когда величина кольцевой щели составляет 5-10 мм.

В США применяют среднепузырчатые аэраторы-спарджеры, завоевывающие все большую популярность. Обычно они устанавливаются с помощью хомутов на горизонтальных распределительных воздухопроводах, в которых имеются отверстия. Выходящий из отверстия воздух попадает в корпус спарджера, где он разделяется на четыре потока и выходит в виде пузырьков из боковых отверстий (рис. 2.3, г).

Аэраторы, создающие пузырьки среднего размера, работают в барботажно-струйном режиме. В этих условиях размер пузырьков является функцией расхода воздуха и не зависит от диаметра отверстия. Становится очевидным, что создание различных модификаций среднепузырчатых аэраторов, применяемых за рубежом, является данью конкурентной борьбы отдельных фирм. Последний вывод хорошо иллюстрируется совпадением для различных среднепузырчатых аэраторов характеристик эффективности использования воздуха, полученных разными авторами. Поэтому основное внимание было направлено на создание среднепузырчатых аэраторов, простых и надежных в работе, полностью исключающих возможность зарастания или поломки.

Созданы аэраторы, воздух в которых подается через открытые снизу трубы (Франция и ФРГ) или через ряд сопел (Великобритания). Неоспоримыми преимуществами среднепузырчатых аэраторов являются их практическая незасоряемость и снижение затрат на изготовление по сравнению с мелкопузырчатыми. К недостаткам следует отнести присущее всем среднепузырчатым аэраторам сравнительно невысокое использование воздуха.

В Швеции созданы низконапорные аэраторы системы Инка, по принципу действия несколько отличающиеся от существующих пневматических аэраторов. В основе их конструкции реализована гипотеза о неравномерности скорости адсорбции. При этом считают, что основное количество воздуха переходит в пульпу в момент, когда образуются пузырьки и когда они лопаются на поверхности жидкости (пульпы). Исходя из этого, целесообразно значительно увеличить расход воздуха и уменьшить погружение аэратора. В этом случае важную роль начинает играть интенсивная циркуляция, способствующая турбулентному перемешиванию и интенсивному обновлению поверхности контакта фаз.

Аэраторы Инка экономичнее обычных типов аэраторов, так как расход электроэнергии составляет $0,4 \text{ кВт/м}^3$. Данные других зарубежных авторов свидетельствуют о том, что эффективность аэрации с применением аэраторов Инка мало отличается от эффективности аэрации других среднепузырчатых аэраторов. Недостаток плоской перфорированной пластины или проволочной сетки (рис. 2.4, а) состоит в том, что с прекращением подачи воздуха (газа) под решетку мелкие частицы проваливаются через отверстия. Этого можно избежать, применяя спаренные перфорированные пластины (рис. 2.4, б), у которых отверстия сдвинуты друг относительно друга. Такая воздухораспределительная решетка пригодна для промышленных установок, поскольку она обладает преимуществами отдельной пластины - простотой расчета и конструктивного выполнения в сочетании с хорошим газораспределением.

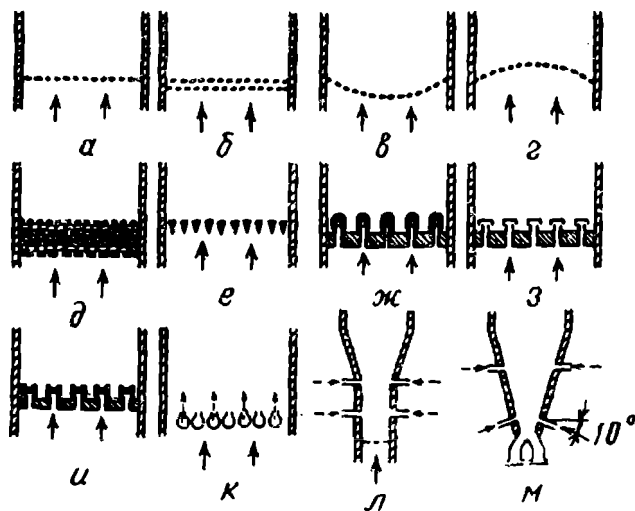


Рис. 2.4. Конструкции газораспределительных (диспергирующих) устройств:

а - одинарная перфорированная пластина; *б* - то же, спаренная; *в, г* - то же, вогнутая или выпуклая; *д* - многослойная неподвижная засыпка; *е* - колосниковая решетка; *ж* - сопла; *з* - колпачки; *и* - многослойные фильтры; *к* - трубчатая решетка; *л, м* - безрешетные конструкции с боковыми смесительными соплами

При больших диаметрах флотомашин применяют сводчатые воздухохораспределители (рис. 2.4, *в, г*). Они выдерживают большие нагрузки. Газораспределитель (диспергатор) типа "г" может обеспечить хорошее контактирование только тогда, когда отверстия по периферии будут иметь большие размеры, чем в центральной части, что вызывает конструктивные осложнения при изготовлении.

Впрочем, для любой перфорированной пластины сочетание требований хорошего газораспределения и низкого сопротивления обуславливает необходимость тщательного расчета и неравномерного по площади расположения отверстий при изготовлении. Когда требуется более тонкая диспергация воздуха, используют более плотный слой гранулированного материала, заключенный между двумя перфорированными пластинами (рис. 2.4, *д*), который является хорошим распределителем. Устройство, состоящее из щелей между колосниками (рис. 2.4, *е*), имеет те же характеристики, что и плоская перфорированная пластина, но несколько меньшую равномерность воздухохораспределения. Сопла и колпачки (рис. 2.4, *ж, з*) применяют для предотвращения попадания твердых частиц в газопровод. Несмотря на усложненность конструкции, они не обеспечивают лучшего воздухохораспределения по сравнению с

типами "б" и "д". Многослойные пластинчатые перфорированные перегородки (рис. 2.4, и) обеспечивают лучшее распределение воздуха по сравнению с типами "ж" и "з". Однако при их применении могут потребоваться особые меры предосторожности, чтобы избежать забивания (зарастания) материалом входных отверстий воздухо-распределителя. Иногда для улучшения гидроаэродинамики потока воздух (газ) вводится через сопла, расположенные в боковых стенках (рис. 2.4, л, м).

Трубчатые аэраторы

Практический интерес представляют аэраторы трубчатые щелевые и из металлических стержней с тканевой прокладкой (рис. 2.5), а также рассеивающие струйные аэраторы (рис. 2.6), представляющие собой стальную перфорированную трубу с металлической обоймой со щелями. Обойма заполнена мелкой галькой или дробью из нержавеющей стали. Площадь щелевых отверстий решетчатого дна обоймы составляет 40-50% его площади. Выход воздуха (пульпо-воздушной смеси) в виде вертикальных струй обеспечивает эффективное смешение воздуха с пульпой.

Трубчатые рассеивающие аэраторы могут иметь различное расположение сопел для выпуска воздуха в пульпу. Они обладают минимальным аэрогидродинамическим сопротивлением, и в них не наблюдается зарастания сопел. На рис. 2.7 и 2.8 показаны аэраторы фирмы "Нокиа" (Финляндия). Действие аэратора основывается на пористом полиэтилене марки NOPOL, разработанном этой фирмой. Сжатый воздух подается в воду через аэратор, в связи с чем синтетическим материалом NOPOL

осуществляется распыление воздуха на мелкие пузырьки, обеспечивающие эффективное растворение кислорода в воде. Для мелкопузырчатых аэраторов используется специальный двухслойный пористый материал, уменьшающий опасность внутреннего зараста-

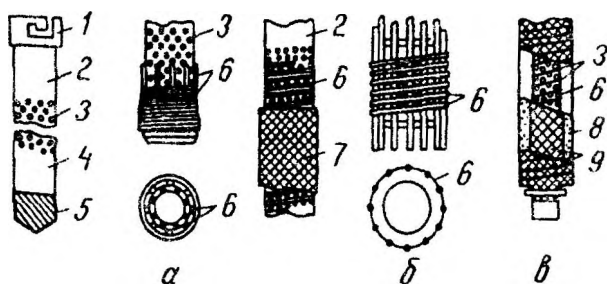


Рис. 2.5. Аэраторы трубчатые металлические:

а - сетчатый; б - стальной перфорированный; в - гравийно-песчаный; 1 - замок; 2 - перфорированный каркас аэратора; 3 - перфорированная труба; 4 - отстойник; 5 - пробка; 6 - проволока каркаса и намотки; 7 - сетка; 8 - металлическая корзина; 9 - крупный песок и гравий

ния аэраторов. Интервалы по уходу удлиняются благодаря улучшенным диспергирующим свойствам аэраторов. Аэраторы NOPOL, поставляемые фирмой "Нокиа", надежны и используются очень широко.

На рис. 2.9 показано диспергирующее устройство, выполненное в виде замкнутого контура, состоящего из системы воздухоподводящих труб 6 с двумя распределительными муфтами 5 и диспергирующего приспособления. Последнее состоит из металлического стержня 2 крестообразного сечения, оканчивающегося наконечником 3 с резьбой. На стержень нанизывается необходимое количество колец 1 из плотного войлока (может быть использован и другой пористый материал, в том числе и керамика), внутренняя поверхность колец делится крестообразным стержнем на четыре полости или секции, в которые через распределительные муфты контура нагнетается воздух. Гайки, наворачивающиеся на резьбовые наконечники стержня, служат для сжатия колец через уплотнительный узел 4. Поступающий в диспергатор воздух равномерно распределяется по четырем внутренним секциям, откуда в виде мельчайших пузырьков выходит в камеру. Стрелками показано направление движения воз-

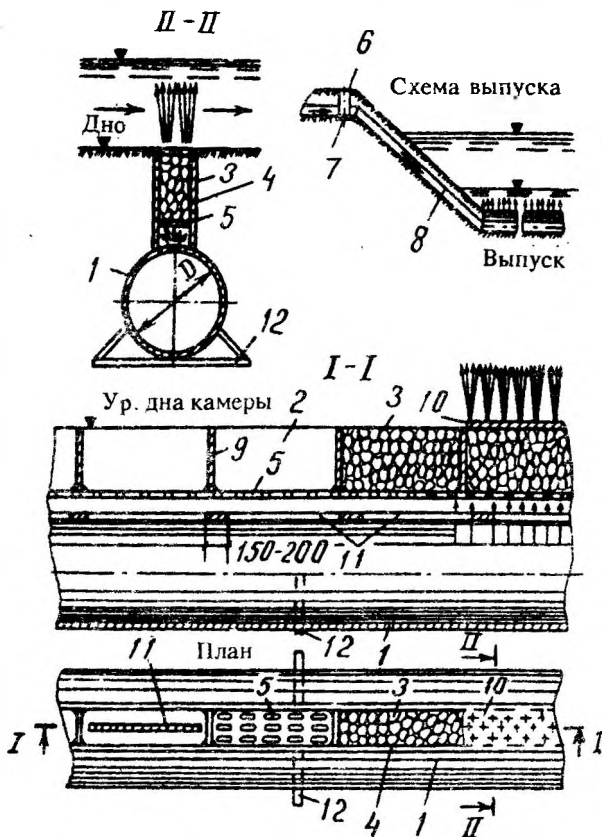


Рис. 2.6. Рассеивающий струйный аэратор:

1 - труба; 2 - обойма выпусков; 3 - гравийная засыпка; 4 - стенка обоймы; 5 - решетчатое дно обоймы; 6 - подвод воздуха; 7 - решетка; 8 - воздухопровод; 9 - поперечные стенки обоймы; 10 - крышка обоймы с отверстиями; 11 - щели в трубе; 12 - опорные поперечные трубы

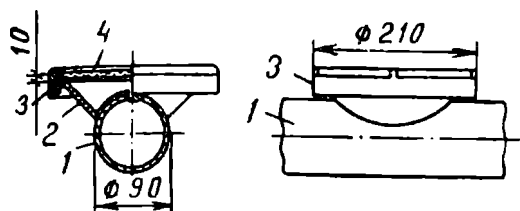
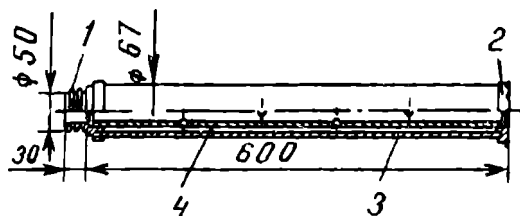


Рис. 2.7. Тарельчатый аэратор фирмы "Нокиа":

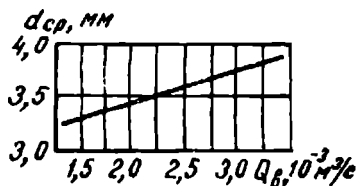
1 - воздухопровод; 2 - пластмассовый корпус; 3 - зажимное кольцо; 4 - пористая пластина (диск)



a

Рис. 2.8. Трубчатый аэратор фирмы "Нокиа":

a - общий вид; 1 - штуцер; 2 - заглушка; 3 - пористая труба; 4 - металлическая перфорированная труба; *b* - зависимость среднего диаметра пузырька (d_{cp}) от расхода воздуха (Q_a) через аэратор



b

духа в камере машины. Непрерывное и интенсивное выделение воздуха по всему периметру диспергатора образует устойчивую подушку из воздушных пузырьков по всей его рабочей поверхности. Это предохраняет кольца диспергатора от истирания. Регулирование гранулометрического состава диспергированного воздуха осуществляется установкой дополнительного количества пористых колец и более полного сжатия их стяжными гайками. Диапазон регулировки практически неограничен. В промышленных образцах с камерами 1000х1000 мм каждая камера снабжается диспергирующим устройством, набранным из 12-15 отдельных диспергаторов, рабочая длина которых 940-960 мм, сечение 30 мм. Интенсивное и эффективное диспергирование воздуха достигается при давлении 0,01-0,03 МПа. Это означает, что диспергаторы могут снабжаться воздухом от обычных высокопроизводительных низконапорных возду-

На рис. 2.10 показан аэратор из пористого полиэтилена, состоящий из 20 диспергирующих элементов 1, каждый из которых включает 15-16 пористых полиэтиленовых цилиндров высотой 50-60 мм, с наружным диам. 25 мм и толщиной стенки 4 мм; диам. пор 5-30 мкм. Диспергирующие элементы соединены между собой двумя коллекторами 2, распределяющими воздух по рабочим элементам. Каждый коллектор набирается из 20 пористых полиэтиленовых цилиндров высотой около 50 мм, с наружным диам. 50 мм и толщиной стенки 4 мм; диам. пор 5-30 мкм.

66

ный запас прочности, аэраторы из полиэтилена могут в процессе работы периодически продуваться воздухом при повышенном давлении, что увеличивает продолжительность их эксплуатации и они могут регенерироваться с помощью ультразвука. Аэраторы из полиэтилена могут быть изготовлены механической службой любого горно-обогатительного комбината.

В отечественных флотационных пневматических машинах с камерами большого объема используются шайбовые и трубчатые аэраторы из различных эластичных материалов. Шайбовый аэратор предназначен для запуска заполненной пульпой машины в эксплуатацию путем взмучивания сжатым воздухом твердого осадка (песков), образовавшегося в ней в результате перерыва в работе, низкого давления или недостатка воздуха в основном трубчатом аэраторе и нарушений режима технологического процесса. Аэратор представляет собой систему резиновых шайб (колец), позволяющих вводить в пульпу воздух высокого давления и одновременно предотвращать ее проникновение в воздуховод.

Шайбовые аэраторы (табл. 2.1) устанавливаются внизу конического днища машины (рис. 2.11, 2.12). Аэратор (см. рис. 2.11) состоит из воздушной трубы 1 (заканчивающейся заглушкой 2), в конце которой под прямым углом вварен короткий патрубок 3 с четырьмя прямоугольными проре-

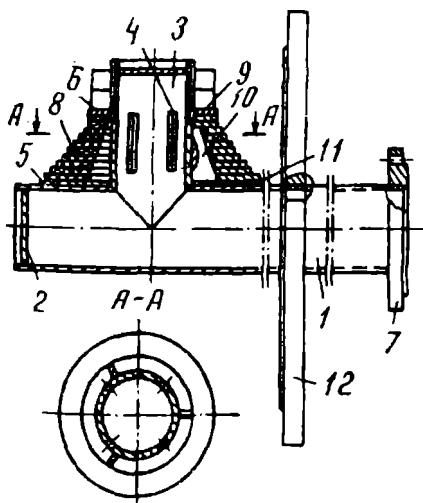


Рис. 2.11. Аэратор шайбовый (вспомогательный)

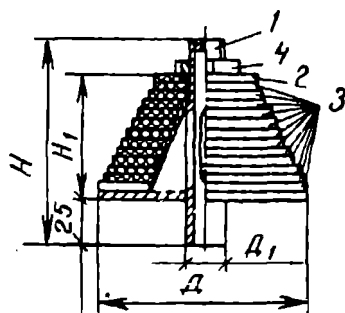


Рис. 2.12. Аэратор шайбовый из набора листовой резины (расчетная схема):

1 - патрубок; 2 - диск; 3 - шайбы; 4 - гайка

Таблица 2.1

Техническая характеристика шайбовых аэраторов, используемых в большеобъемных флотационных пневматических машинах

Производительность, м ³ /ч	Размеры, мм				Количество шайб, шт.	Масса, кг
	Д	Д ₁	Н	Н ₁		
7	125	27	115	68	12	1,25
15	140	32	135	85	15	2,00

зями 4, равномерно размещенными по его окружности. На патрубок надето плоское кольцо 5. На конце патрубка имеется резьба, на которую навинчивается гайка 6 с контргайкой. Через фланец 7 воздухоподсоединяется к магистрали воздуха. На патрубок надевается набор резиновых шайб (колец) 8, уменьшающихся по диаметру, прижатых сверху стальной шайбой 9 и зафиксированных гайками 6. Вращению резиновых колец вокруг оси препятствуют шпоночные пластины 10, приваренные к патрубку и кольцу 11. Воздух высокого давления, проходя через прорези патрубка, преодолевает упругое сопротивление резиновых шайб проходит в машину, взмучивает осадок и перемешивает пульпу. Степень сжатия резиновых шайб (колец) регулируется затяжкой гаек в зависимости от давления воздуха в воздушной магистрали и столба пульпы в машине. Расход воздуха регулируется зазором между шайбами с помощью гайки, а также уменьшением или увеличением давления воздуха на входе в аэратор. Аэраторы этой конструкции надежны в эксплуатации и долговечны. Срок службы их 3 года.

Кольцевой аэратор

Кольцевой аэратор (рис. 2.13) представляет собой сварную конструкцию и состоит из каркаса 1 с центральным коллектором 2, на котором установлены конденсатный 3 и подводящий 4 патрубки. На каркасе равномерно установлены диспергирующие элементы из резиновых колец 5.

Диспергирующий элемент кольцевого аэратора (рис. 2.14) содержит перфорированную трубку 1 и систему эластичных клапанов, выполненных в виде колец 2 и 3 треугольного трапецидального сечения с глухими прорезями 5 в радиальном направлении в боковых поверхностях 7. Кольца устанавливаются поочередно на наружной поверхности стакана 9 с отверстиями 4 и взаимодействуют между собой боковыми поверхностями 7, причем кольца треугольного сечения 2 установлены в промежутке 6 между отверстиями 4, а кольца трапецидального сечения 3 - против отверстий 4, образуя полость для доступа воздуха к прорезям 5. Диспергатор включает также неподвижную 11 и подвижную 8 шайбы и прижимную гайку 10.

На рис. 2.15 приведены данные по газопроницаемости диспергирую-

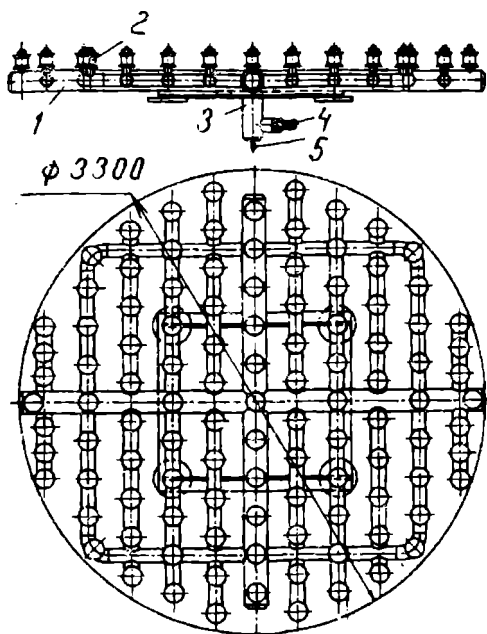


Рис. 2.13. Кольцевой аэратор флотомашин ФП-40 и ФП-80

щего элемента из набора резиновых колец в зависимости от давления на входе в аэратор. Расход воздуха и его дисперсность зависят от степени сжатия колец, давления сжатого воздуха на входе в аэратор и глубины погружения аэратора во флотационную машину.

Степень сжатия колец (C) определяется по формуле: $C = (l - l_1) / l$, где l , l_1 - линейные размеры несжатых и сжатых колец соответственно, мм.

Рабочее давление кольцевых аэраторов при погружении на глубину 8 м составляет 0,09-0,13 МПа. Эти аэраторы по сравнению с аэраторами из резиновых трубок потребляют меньше электроэнергии при снижении

дисперсности воздушных пузырьков. Аэраторы из резиновых колец обеспечивают высокую эксплуатационную надежность работы флотомашин, а срок службы резиновых колец составляет 11-12 тыс.ч.

Принципиальная схема одного звена промышленного образца кольцевого пневматического аэратора дана на рис. 2.16.

Кольцевые аэраторы могут работать без повреждений и при высоком давлении воздуха (более 0,2-0,3 МПа). В этом случае кольца увеличиваются в диаметре, образуют зазор между боковыми поверхностями и обеспечивают увеличение расхода воздуха. В данном режиме аэратор может быть использован для взмучивания и перемешивания пульпы во флотомашине, а также в аппаратах для очистки сточных вод и др.

Полиэтиленовые аэраторы с заданным размером пор по конструкции отличаются от аэраторов из резиновых колец тем, что вместо резиновых колец устанавливается цилиндр из пористого полиэтилена с заданной пористостью.

Особенностью аэраторов из пористого полиэтилена является очень высокая газопроницаемость при низком давлении. Рабочее давление

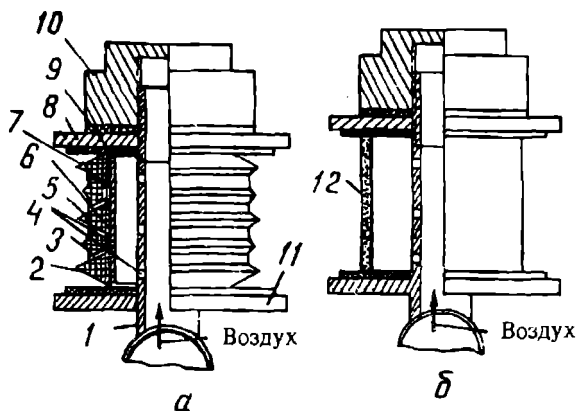


Рис. 2.14. Диспергирующие элементы аэратора:

a - кольцевого; *б* - полиэтиленового

при погружении на глубину 8 м составляет 0,08-0,12 МПа. Они позволяют получать равномерную аэрацию и высокую дисперсность воздушных пузырьков при большом расходе воздуха и низком потреблении энергии. Однако из-за отсутствия в порах клапанного эффекта на их работу влияет прекращение подачи воздуха, так как в это время происходит дренирование пульпы внутрь элемента, в результате чего аэраторы, находящиеся в пульпе, следует для предупреждения попадания в них пульпы (воды) и тонкодисперсных шламов поддерживать постоянно в режиме эксплуатации. Во избежание заиливания поверхности элементы аэратора должны периодически (1-2 раза в сут) кратковременно (в течение 0,5 мин) продуваться воздухом, поступающим в диспергаторы под давлением выше рабочего на 25-30%.

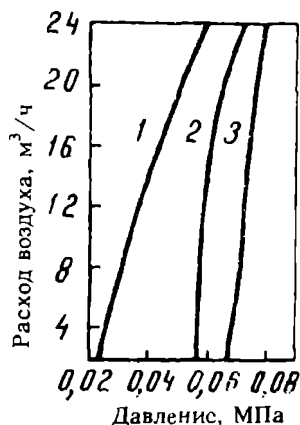


Рис. 2.15. Зависимость расхода воздуха от давления в кольцевом аэраторе при различной степени износа колец:

1 - 0; 2 - 0,028; 3 - 0,045

Институтом "Гинцветмет" совместно с ВНИКТИРП освоено промышленное производство резиновых трубчатых и кольцевых аэраторов. Производство аэраторов из полиэтилена с заданной пористостью освоено Гинцветметом совместно с БелКТИГХ.

Внедрение в большеобъемных флотационных пневматических машинах новых аэраторов - трубчатых, кольцевых и полиэтиленовых

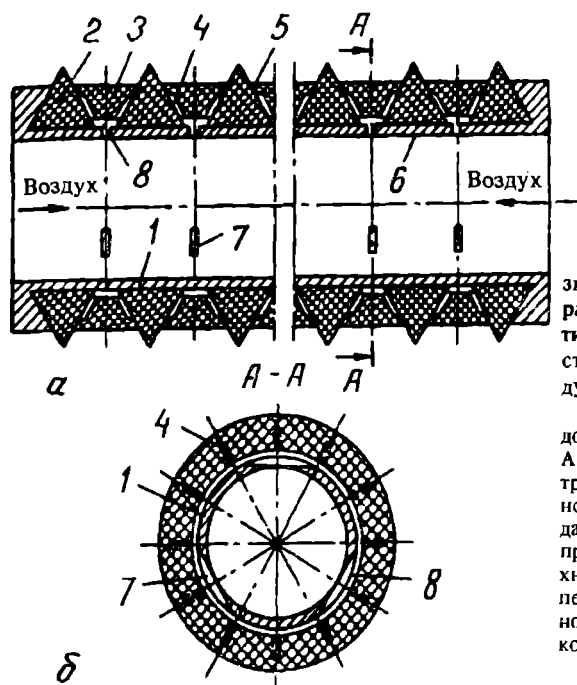


Рис. 2.16. Схема одного звена промышленного образца кольцевого пневматического аэратора с двусторонним подводом воздуха:

а - общий вид; *б* - продольный разрез сечения А-А; 1 - перфорированная труба; 2 - кольцо треугольное; 3 - кольцо трапецидального сечения; 4 - глухие прорези; 5 - боковые поверхности; 6 - стенка трубы перфорированной поверхности; 7 - перфорации; 8 - кольцевая полость

заданной пористостью - на обогатительных фабриках позволило стабилизировать работу флотомашин, повысить извлечение ценных минералов и качество концентратов.

Саморегулирующийся аэратор

Этот тип аэратора (рис. 2.17) состоит из гофрированного сильфона 1, штуцера 2. Во внутренних гофрах 3 сильфона находятся отверстия 4. Между внешними гофрами 5 с кольцевым зазором 6 к внутренним гофрам установлены эластичные кольцевые элементы 7 с поперечным сечением в виде трапеции, обеспечивающие плотное прилегание верхних и нижних граней к боковой поверхности сильфона. Верхние и нижние грани элементов 7 выполнены с криволинейными профилированными канавками 8, причем верхние и нижние канавки - в зеркальном изображении, т.е. изогнуты в противоположном направлении по отношению друг к другу. Аэратор работает следующим образом. Сжатый воздух поступает через штуцер и сильфон и выходит через отверстие в кольцевой зазор. Под давлением сжатого воздуха расстояние между гофрами сильфона увеличивается и воздух между боковой поверхностью внеш-

них гофров и криволинейных канавок эластичных элементов в виде тонких струй поступает в окружающую жидкость, дробясь на мелкие пузырьки.

Благодаря множеству компактных, противоположно закрученных и выходящих с большой скоростью струй воздуха вокруг аэратора развивается высокая турбулентность потока, в результате которой происходит вторичное дробление воздуха и образуется облачко пузырьков, сравнимых по размеру с пузырьками тонкодиспергируемого воздуха. Преимуществами данного аэратора являются повышение эффективности использования за счет улучшения условий распределения газа в жидкость и его диспергирование путем саморегулирования в зависимости от давления целевых каналов для истечения газа; простота регенерации, осуществляемой за счет кратковременной подачи газа под давлением, превышающим рабочее.

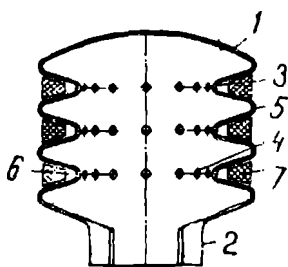


Рис. 2.17. Саморегулирующий аэратор

Аэратор защищен авторским свидетельством 1462714.

Трубчатые аэраторы из резиновых трубок

Внедрение большесъемных флотационных пневматических машин чанового типа во многом зависит от совершенствования конструкции аэрационного узла, который должен обеспечить возможность регулирования степени аэрации пульпы, необходимую дисперсность пузырьков газа, равномерное распределение их по всему сечению камеры машины, достаточную надежность непрерывной длительной работы флотомашин.

В машинах данного типа применяются преимущественно трубчатые аэраторы. Трубчатый аэратор представляет собой сварную конструкцию из труб и состоит из каркаса 1 с центральным коллектором 2, на котором установлены подводящий 3 и конденсатный 4 патрубки. На каркасе равномерно распределены штуцеры 5, на которые устанавливаются и закрепляются манжетами 6 диспергирующие элементы из перфорированных резиновых трубок 7 (рис. 2.18).

Аэратор работает следующим образом. При подаче сжатого воздуха в центральный коллектор он равномерно распределяется по всем диспергирующим элементам. Отверстия в резиновых трубках раскрываются, и происходит диспергирование воздуха в пульпе. Расход воздуха через такие аэраторы определяется давлением на входе, размером диспергирующих элементов, их количеством, а также размером пор на дисперга-

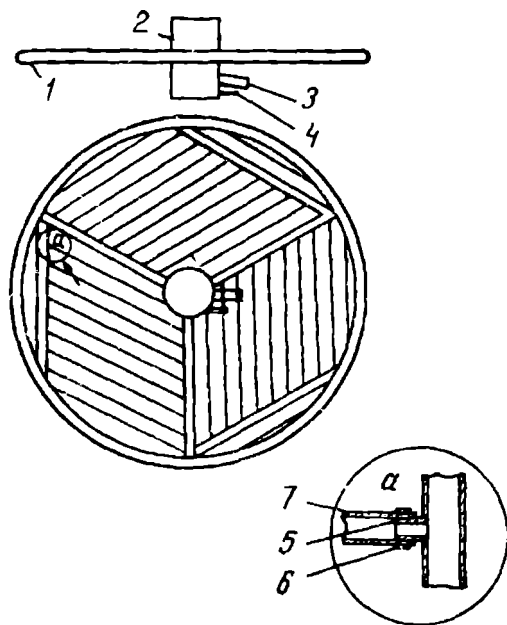


Рис. 2.18. Трубчатый (эластичный) аэратор

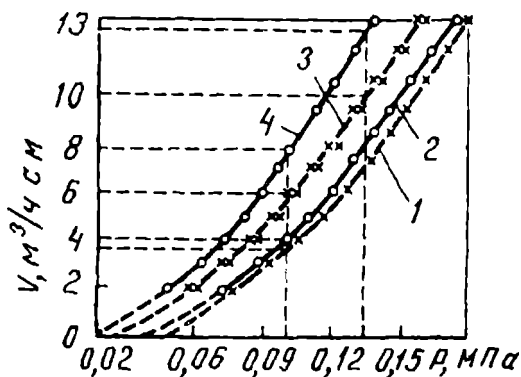


Рис. 2.19. Газопроницаемость перфорированной резиновой трубки размером 25x5 мм в зависимости от давления на входе в аэратор (P) и от режима перфорации:

1 - игла N 12 - 9 шт. не насквозь (2 раза) - 60 отв/см²;
 2 - игла N 10 - 10 шт. не насквозь (2 раза) - 70; 3 - игла N 12 - 9 шт. насквозь - 58; 4 - игла N 10 - 10 шт. насквозь (1 раз) - 70 отв/см²

торе. На рис. 2.19 приведена газопроницаемость резиновых трубок размером 25x5 мм (ГОСТ 5496-78) с различными режимами перфорации.

При прекращении подачи воздуха в аэратор поры на диспергирующем элементе закрываются и предотвращают попадание пульпы в каркас аэратора. Такие трубчатые аэраторы обеспечивают равномерность аэрации, дисперсность воздушных пузырьков и надежность в работе. Они нечувствительны к прекращению подачи воздуха, могут применяться в любой операции флотации. Рабочее давление на входе в аэратор в зависимости от глубины погружения во флотомашину составляет 0,14-0,25 МПа.

Трубчатый (эластичный) аэратор с параллельной волнообразной укладкой диспергирующих элементов в виде объемной решетки, применяемый в отечественных флотационных

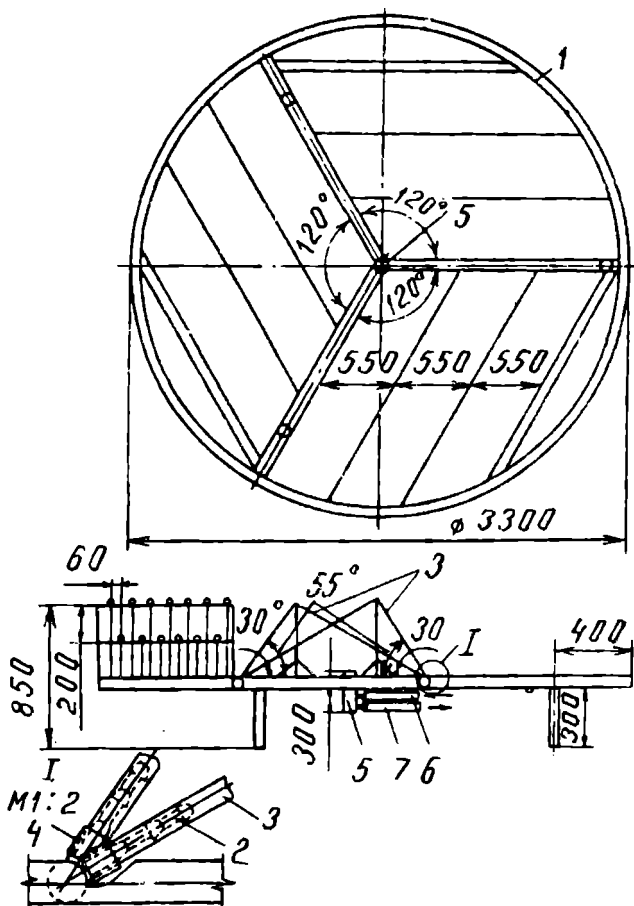


Рис. 2.20. Трубчатый (эластичный) аэратор с параллельной волнообразной укладкой диспергирующих элементов в виде объемной решетки

пневматических машинах с камерами больших и малых объемов 40, 80 и 100 м³ (ФП-40, ФП-80 и ФП-100); 1,0, 2,5 и 6,3 м³ (ФП-1, ФП-2,5 и ФП-6,3), приведен на рис. 2.20. Аэратор состоит из металлического каркаса (воздушного коллектора), выполненного в виде кольца 1 с тремя секциями ромбической формы. На каркасе установлены ниппеля (штуцеры) 2, на которые одевают (эластичные) резиновые перфорированные трубки 3 и крепят с помощью резиновых шайб 4. К центральной воздухоподводящей трубке 5 с помощью гибкого шланга 6 подводится сжатый

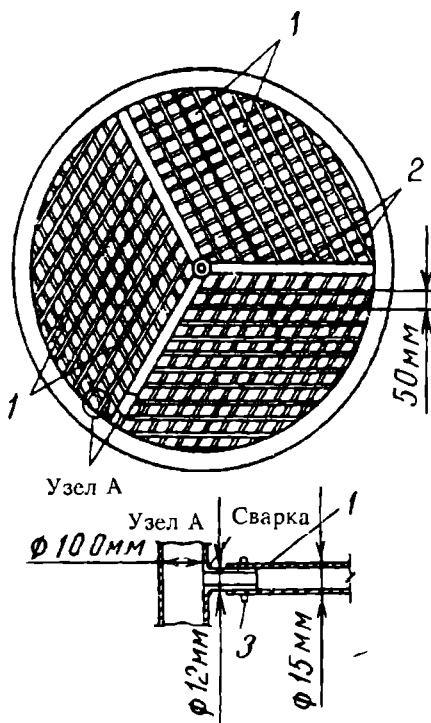


Рис. 2.21. Трубчатый (эластичный) аэратор с перекрестной укладкой диспергирующих элементов:

1 - перфорированная трубка диам. 15 мм;
2 - трубка диам. 100 мм; 3 - хомут

воздух, а отвод конденсата и других агентов, попадающих с неочищенным воздухом, - через гибкий шланг 7.

На рис. 2.21 приведен трубчатый (эластичный) аэратор с перекрестной горизонтальной укладкой диспергирующих элементов. Перед укладкой трубок на аэратор их нужно калибровать и сортировать по газопроницаемости (производительности и сопротивлению). В процессе эксплуатации трубчатых аэраторов происходит старение резины, она становится тверже, теряет эластичность, что вызывает необходимость увеличения давления воздуха для раскрытия пор. Старение резины связано с воздействием на нее горячего воздуха, подаваемого воздуходувками, и различных реагентов, находящихся в пульпе.

Лучше других при испытаниях оказались трубчатые аэраторы из вакуумной рези-

новой трубки (ГОСТ 3990-76), однако несовершенство техники перфорирования трубок приводило к их разрывам по линиям перфорации. Были проверены различные пористые материалы, включая пористую нержавеющую сталь ПНС-8, керамику, полиэтилен, различные фильтровальные ткани и др. Все они забивались (зарастали) в течение 15 дней. К недостаткам первоначальной конструкции трубчатых аэраторов относилось то, что общая длина трубок на один аэратор машины ФП-80 составляла 480 м. Это затрудняло монтаж трубок на каркас аэратора, а также наблюдение за их работой в процессе эксплуатации.

Окончательно выбраны перфорированные эластичные (резиновые) трубки, в которых каждая пора является миниатюрным обратным клапаном, открывающимся только при определенном давлении воздуха.

При прекращении подачи воздуха поры закрываются, предотвращая попадание пульпы в аэратор и воздухопроводную систему.

Промышленные испытания новых конструкций аэраторов из трубок большого диаметра были проведены при сокращении общей длины в 2-3 раза. Были испытаны силиконовые трубки размером 15х4 мм, вакуумные - размером 16х5 мм, рукава напорные с тканевой оплеткой и двумя кордами, а в настоящее время проводятся испытания резиновых трубок размером 25х5 мм.

При изготовлении аэратора из трубок с внутренним диам. 15-25 мм и толщиной стенки 4-6 мм проходные отверстия (поры) должны иметь диам. 0,5-3 мм. Расстояние (шаг) между центрами отверстий по окружности находится в зависимости от диаметра трубок в пределах от 4 до 8 мм, вдоль оси трубок - также от 4 до 8 мм. Отверстия располагаются на трубках в шахматном порядке (рис. 2.22).

Автором установлена зависимость процента пористости аэратора от расстояния между центрами отверстий и диаметра самих отверстий. Согласно этим данным, при $l = 2,5d$ площадь отверстий (пористость) составит 25%, при $l = 3,5d$ - 17,5%, при $l = 4d$ - 8,8%, при $l = 5d$ - 6,3%. При прокалывании отверстий следует принимать расстояние: $l = 2,5 - 5d$.

В зависимости от материала используемых эластичных трубок и способа обработки расположение щелей на трубке аэратора может быть:

поясное простое, когда щели расположены по окружности трубки; на поверхности аэратора образуется два пояса: щелевой и связи (рис. 2.23, а); оси щелей верхнего пояса совпадают с осями нижнего;

поясное в шахматном порядке, когда щели нижнего пояса расположены в промежутках щелей верхнего пояса (рис. 2.23, б);

поясное в шахматном порядке без поясов связи с щелями крупного и мелкого сечения (рис. 2.23, в, г).

Наименьший процент пористости получается при простом поясном расположении щелей (отверстий), а наибольший - при расположении щелей в шахматном порядке без поясов связи. Расположение и размеры проходных щелей прямоугольной формы на трубчатом аэраторе показаны на рис. 2.24. Пористость щелевых (трубчатых) аэраторов зависит от размера (длины и ширины) и

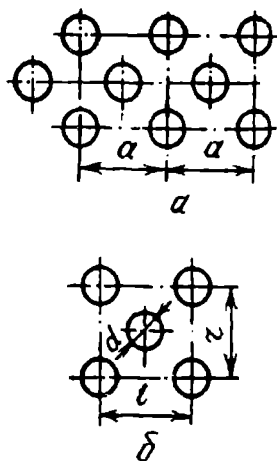


Рис. 2.22. Расположение круглых проходных отверстий на трубчатом аэраторе в зависимости от их диаметра:

а - в шахматном порядке;
б - деталь разбивки

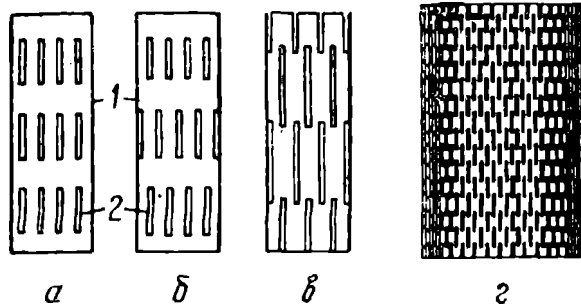


Рис. 2.23. Расположение щелевых отверстий на трубчатом аэраторе:

а - поясное простое;
б - поясное в шахматном порядке; *в*, *г* - поясное в шахматном порядке без поясов связи; 1 - пояс связи; 2 - щелевой пояс

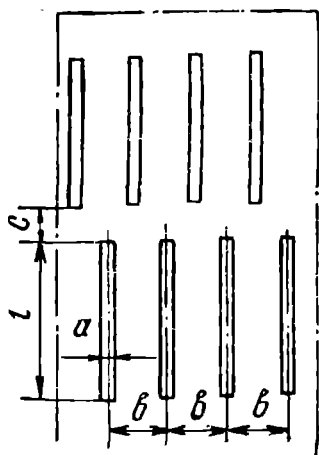


Рис. 2.24. Расположение и размеры проходных щелей прямоугольной формы на трубчатом аэраторе:

а - ширина щели; *б* - расстояние между осями щелей; *с* - расстояние между щелевыми поясами; 1 - ширина щелевого пояса

количества щелей, приходящихся на поверхность, а также расположения их на каркасе. В применяемых щелевых аэраторах он колеблется в весьма широких пределах (от 6 до 40%). Выбор ширины щели зависит от назначения аэратора и источника использования сжатого воздуха (низконапорная воздуходувка, компрессор). Ширина щелей может быть произвольной, равной 3-10 мм и более. Эти рекомендации базируются на экспериментальных исследованиях, согласно которым ширина щели должна быть в 2 раза меньше, чем диаметр наименьших частиц, находящихся в пульпе (машина). Расстояние между осями щелей (шаг) рекомендуется в 10 раз больше ширины щели *а*; длина щели может быть произвольной величиной (обычно находится в пределах от 0,1 до 8,0 мм). При таких нормах коэффициент пористости аэратора получается, однако,

весьма низким, составляя всего 7-10%.

На основании проведенных исследований и промышленных испытаний для типового ряда машин ФП-10, ФП-40, ФП-80 и ФП-100 рекомендуются трубчатые аэраторы описанных выше конструкций, которые обеспечивают более длительный срок службы. В настоящее время в качестве эластичных трубок (аэраторов) используют силиконовые и полиуретановые трубки и напорные рукава с двойной кордовой проклад-

кой (ГОСТ 18698-73). Следует отметить, что при использовании в качестве трубчатых аэраторов эластичных трубок с перфорацией срок их службы увеличивается в 4-5 раз.

Одной из главных характеристик, влияющих на экономичность пневматических флотомашин, является сопротивление аэратора при продувке воздухом. Поэтому ко всем трубчатым аэраторам предъявляются следующие требования: минимальные и одинаковые размеры пор и возможно меньшее сопротивление при продувке через них воздуха.

При увеличении диаметра пор снижается их сопротивление, но увеличиваются размеры пузырьков. В зависимости от эластичности резины и гидростатического давления пульпы размер пор в трубчатых аэраторах составляет 0,5-3,0 мм.

Зависимость расхода воздуха в аэраторе от давления приведена на рис. 2.25. С повышением давления средний эквивалентный диаметр пузырька сначала увеличивается, достигая максимума, а затем уменьшается до определенного минимума. У мягких трубок этот максимум соответствует давлению ~80 кПа (рис. 2.26, кривые 4, 5, 6), у жестких ~100 кПа (рис. 2.26, кривые 1, 2, 3). Из рисунка видно, что с увеличением концентрации вспенивателя размер пузырьков уменьшается.

При использовании в качестве трубчатых аэраторов эластичных трубок с соблюдением перфорации срок их службы увеличивается в 3-4 раза и составляет 8 мес, превышая срок службы чугунных импеллеров.

Практика эксплуатации этих аэраторов показала, что эластичные (резиновые) перфорированные трубки устойчиво работают в большеобъемных флотационных машинах пневматического типа, при этом обеспечиваются получение сравнительно равномерных пузырьков диаметром 0,3-1,5 мм и оптимальное количество пор (отверстий). С учетом механической прочности и максимальной аэрирующей способности аэратора для трубок с внутренним диам. от 8 до 12 мм оптимальное количество пор составляет 35-40 на 1 см² длины аэратора. Для больших размеров трубок количество пор увеличивается до 60 на 1 см² длины аэратора. С увеличением диаметра и толщины стенок трубок (5-8 мм) возрастает давление

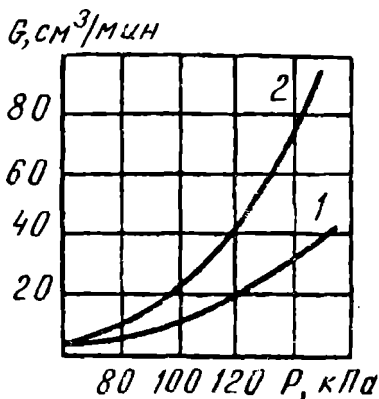


Рис. 2.25. Зависимость расхода воздуха (G) от давления (P) в резиновом трубчатом аэраторе через одно отверстие:

1 - для мягкой трубки; 2 - для жесткой трубки

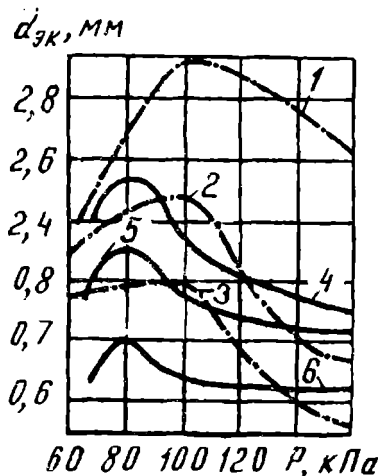


Рис. 2.26. Зависимость среднего эквивалентного диаметра пузырька ($d_{эк}$) от давления воздуха (P) внутри трубчатого аэратора при различной концентрации вспенивателя (0; 4,6; 8,2 мг/л):

1-3 - для жестких трубок; 4-6 - для мягких трубок

от 140 до 160 кПа и обеспечивается равномерность аэрации по длине аэратора. Срок службы аэратора зависит от качества резины, а также от среды, в которой она работает, и колеблется от 3 до 10 мес. Хорошо себя зарекомендовали напорные рукава с двухкордовой тканевой прокладкой, масло-бензиностойкие резиновые, а также полиуретановые трубки.

2.2. ПЕРФОРИРОВАНИЕ ТРУБОК, МЕТОДИКА СБОРКИ И ПРОВЕРКИ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ АЭРАТОРОВ

Перфорацию эластичных трубок, устанавливаемых на трубчатых аэраторах, осуществляют на перфорационной машине МП-1 (рис. 2.27). Конец трубки, подлежащей перфорации, срезается под углом $10-45^\circ$ и вставляется между направляющими и протяжными роликами. Затем включается электродвигатель, который через редуктор приводит в рабочее состояние каретку с иглодержателем, после чего осуществляется перфорация трубки. Требуемый шаг между отверстиями при перфорации резиновых трубок определяется изменением диаметра протяжного барабана и установкой игл на иглодержателе с соответствующим шагом.

Машина МП-1 позволяет перфориовать (прокалывать) трубки с использованием круглых игл диам. 0,5-3,0 мм и плоских (типа лопаточек) с шириной отверстий от 0,25 мм и более. Длина щели зависит от ширины используемой иглы и достигает 6 мм. От количества и размеров отверстий (пор) на трубке зависит пористость аэратора, которую принято выражать в процентах (под пористостью аэратора следует понимать

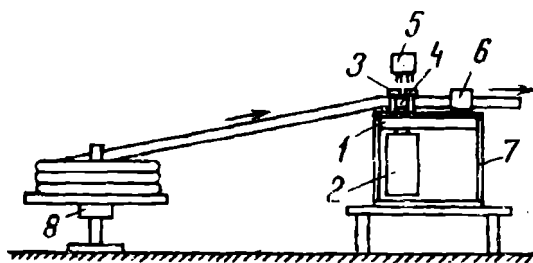


Рис. 2.27. Схема перфорирования эластичных трубок пневматических аэраторов:

1 - редуктор; 2 - двигатель; 3 - направляющие ролики; 4 - протяжные ролики; 5 - иглодержатель; 6 - ведущий ролик; 7 - опорная рама; 8 - поддерживающая стойка

отношение суммарной поверхности проходных отверстий к общей площади аэратора).

Проходные отверстия (поры) на трубках располагаются в шахматном порядке. Обычно расстояние между центрами отверстий по окружности в зависимости от диаметра трубок составляет 2-5 мм, вдоль оси трубок - 2-4 мм. В табл. 2.2 приведены режим перфорирования и параметры перфорированных резиновых трубок для флотационных машин типа ФП.

В настоящее время прошли промышленные испытания на некоторых обогащательных фабриках и рекомендуются к установке на трубчатых аэраторах несколько новых типов (эластичных) резиновых трубок и напорных рукавов с различными кордами и без кордов (рис. 2.28).

Длина аэратора и диаметр перфорированных эластичных трубок определяются в зависимости от расхода воздуха, необходимого для поддержания твердой фазы пульпы во взвешенном состоянии, и обеспечения насыщения пульпы воздухом. Схема нанесения перфорации на резиновые трубки приведена на рис. 2.29.

Трудности, встречающиеся при эксплуатации трубчатых аэраторов, сводятся к разрыву трубок по линиям перфорации (рис. 2.30). Это в основном объясняется заводским браком в трубках при изготовлении и

Таблица 2.2

Режим перфорирования и параметры перфорированных резиновых трубок для флотационных машин типа ФП

Внутренний диаметр трубки, мм	Толщина стенки трубки, мм	Диаметр ведущего ролика, мм	Высота иглодержателя, мм	Число игл в иглодержателе, шт.	Диаметр иглы, мм	Расстояние между порами, не менее, мм	
						вдоль оси трубки	по окружности трубки
25	5	80	40	10	1	3,5	3*
16	4	80	28	7	1	3,5	3*

* Допускаются на трубках неперфорированные две зоны вдоль оси трубки шириной не более 18 мм. В зависимости от толщины стенок трубок и применяемой воздушной с целью снижения энергзатрат на раскрытие пор используются иглы большего диаметра - 2-3 мм, которые подбираются опытным путем.

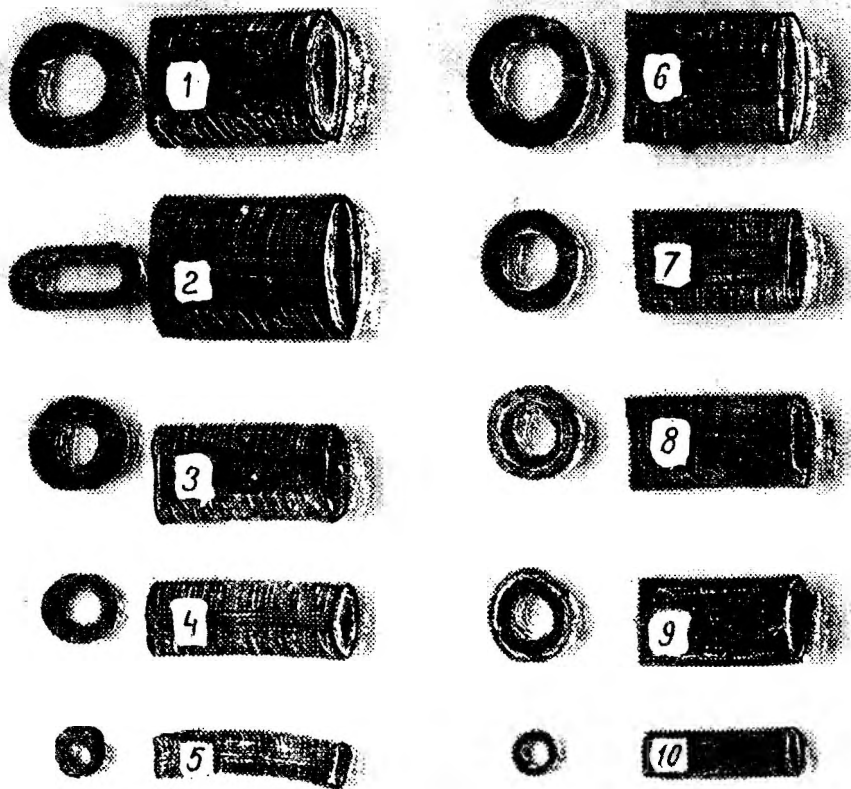


Рис. 2.28. Новые типы резиновых трубок для трубчатых пневматических азраторов:

1 - трубка черная, резина МБС 25х6; 2 - трубка черная, резина МБС овальной формы 25х4; 3 - трубка черная, резина МБС 16х5; 4 - трубка черная, резина 1кш-12х3; 5 - трубка черная, резина 1кш-6х3; 6 - рукав напорный 25х6; 7 - шланг напорный с двумя внутренними кордами 20х5; 8 - шланг напорный с одним кордом 15х7; 9 - шланг напорный 16х5; 10 - трубка черная техническая 8х2

неквалифицированном обслуживании машины для перфорации.

Автором впервые проведены исследования и даны рекомендации по разбивке проходных отверстий на трубчатых азраторах в зависимости от их диаметра и толщины стенки. При перфорации эластичных трубчатых азраторов, предназначенных для диспергации воздуха во флотомашинах пневматического типа с различным объемом камер, рекомендуется пользоваться данными, приведенными в табл. 2.2.

Перфорированные трубки проверяют на газопроницаемость, которая при давлении 0,1 МПа для образцов длиной 1,7 м должна составлять

Рис. 2.29. Схема расчета перфорированных трубок трубчатого азэратора и нанесения перфораций:

d - диаметр трубки; d_1 - диаметр перфорированного отверстия (поры); l - длина одного трубчатого элемента азэратора

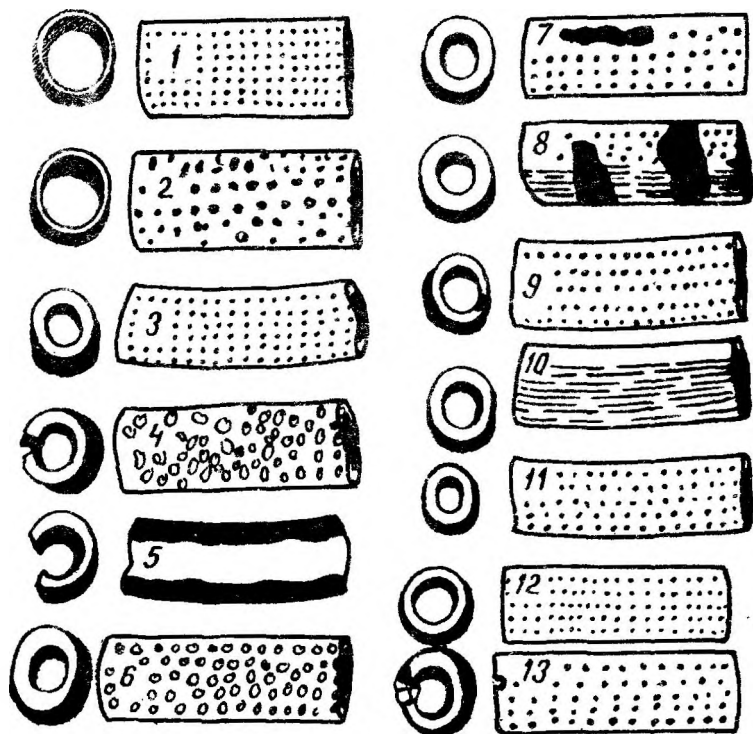
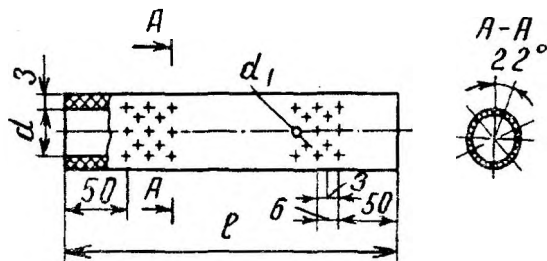


Рис. 2.30. Поведение трубчатых азэраторов в процессе работы:

1 - трубка перед заполнением флотомашинной пульпы; 2 - сплошная цементация поверхности пор трубки, опущенной в пульпу без подачи в нее воздуха; 3 - трубка перед заполнением флотомашинной пульпой; 4 - застывание отдельных пор с поверхности трубок; 5 - внутренняя поверхность чистая (разрезная пополам трубка); 6 - воронкообразование на поверхности в месте крепления (фиксации) диспергирующих элементов; 7 - порыв по линии перфорации; 8 - механический износ трубки по линии перфорации; 9 - порыв по линии перфорации (малый шаг 1 мм); 10 - застывание пор на поверхности; 11 - трубка силиконовая перед заполнением флотомашинной пульпой; 12 - износ отдельных пор силиконовой трубки

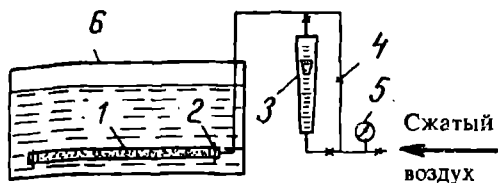


Рис. 2.31. Схема испытаний перфорированных трубок на газопроницаемость и разрыв:

1 - перфорированная трубка; 2 - штуцер; 3 - ротаметр; 4 - воздухопровод; 5 - манометр; 6 - емкость

0,2-0,45 м³/мин и 0,05-0,15 м³/мин для трубок размером 25х5 и 16х5 мм соответственно. Перфорированные образцы трубок в течение 10-15 мин испытываются на разрыв при давлении, в 2-2,5 раза выше рабочего давления (рис. 2.31). Комплектование трубчатых аэраторов осуществляется трубками одного типоразмера и одинаковой газопроницаемости. Допустимое отклонение по газопроницаемости перфорированных трубок для одной флотомашины не больше 10%.

Сборка и проверка аэраторов включает промывку каркаса аэратора, установку диспергирующих элементов, опрессовку каркаса аэратора, испытания на надежность, равномерность аэрации и определение расходных характеристик. Для этих целей используется стенд, схема которого приведена на рис. 2.32. Стенд состоит из цилиндрического резервуара 5 diam. 1500 и высотой 1400 мм, изготовленного из листовой стали, на котором установлены ротаметр 1, ресивер (масловлагоуловитель) 2 с манометрами 3, расходомером 4 и запорной арматурой 6, 9, 10, 11. Соединение узлов между собой и с аэратором 7 осуществляется с помощью гибких рукавов 8. Ресивер предназначен для независимой подачи воздуха в аэратор и ротаметр, а также для улавливания влаги, масла и пыли из сжатого воздуха, которые периодически удаляются из ресивера через вентиль 6. Дренажный вентиль 12 служит для опорожнения резервуара стенда для смены воды, его очистки и других целей, связанных с обслуживанием аэраторов.

Промывке подвергаются аэраторы, вновь изготовленные и бывшие в эксплуатации. При этом удаляются скрап, ржавчина (окалина) и минеральные частицы, попавшие в каркас. Для промывки каркас аэратора устанавливают в опорожненный резервуар стенда при открытом дренажном вентиле и с помощью гибкого рукава через штуцеры аэратора последовательно подают чистую воду, которая со взвешенными частицами удаляется из каркаса через конденсатный штуцер аэратора в резервуар стенда и далее в дренаж. Промывают каждую секцию аэратора до появления чистой воды, вытекающей из конденсатного штуцера.

На каркасе аэратора устанавливают конденсатный и подводящий гибкие рукава. Аэратор через подводящий гибкий рукав соединяют с

воздухораспре-
длителем
стенда и произ-
водят установ-
ку диспергиру-
ющих элемен-
тов на промы-
тый (чистый)
каркас аэра-
тора. В зависи-
мости от типа
аэратора уста-
новка диспер-
гирующих эле-
ментов имеет
свои особен-
ности, которые
необходимо
учитывать при
сборке.

Трубчатый
аэра-
тор
(см. рис. 2.18)
оснащается
перфориро-
ванными труб-
ками из рези-
ны или
других пори-
стых (перфори-
рованных) ма-
териалов. Для
этого отрезают
аэрирующие

элементы длиной, равной расстоянию между основаниями штуцеров, находящихся в одном секторе. Угол между плоскостью среза и осью аэрирующего элемента должен составлять $\sim 60^\circ$, а отверстия перфорации большого диаметра должны быть сверху при установке элемента на аэратор. Рекомендуется размещать отрезанные элементы по секторам поочередно, что обеспечивает равномерную аэрацию по сечению камеры флотомашины. На концы отрезанных элементов одеваются кольца шириной 25-30 мм из резиновой неперфорированной трубки соответ-

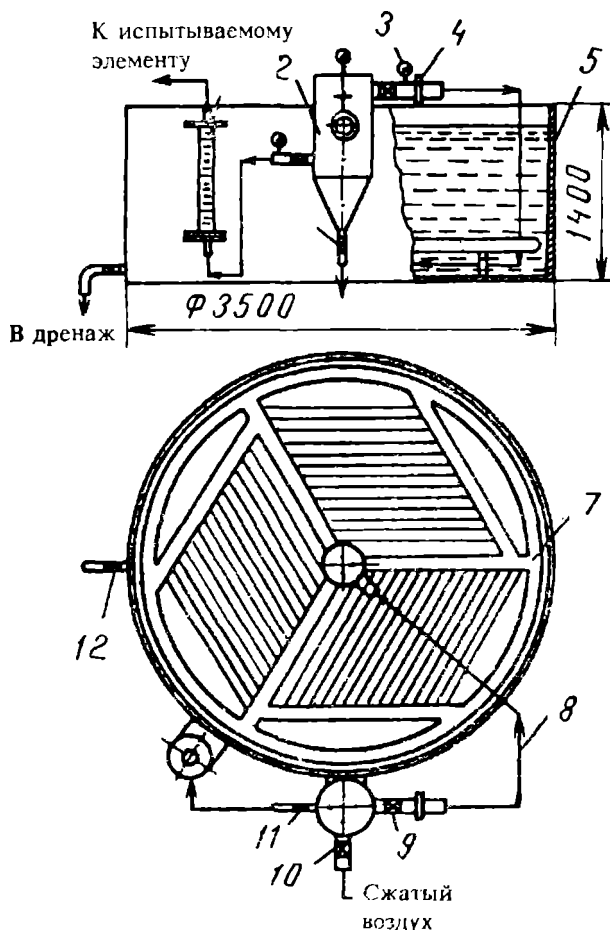


Рис. 2.32. Стенд для испытания аэраторов

вующего размера. Расстояние одетых колец от концов диспергирующего элемента должно составлять 90-110 мм. Диспергирующий элемент устанавливают на штуцеры аэратора. После опрессовки резиновые кольца, одетые на диспергирующий элемент, сдвигают к основанию штуцера, что позволяет надежно закрепить диспергирующий элемент на штуцере каркаса. При обнаружении дефектов на ершах штуцеров ставятся дополнительные крепления (проволочные хомуты).

Кольцевой аэратор (см. рис. 2.13) оснащается резиновыми кольцами треугольного и трапециевидного сечения, цилиндрами из пористого полиэтилена, титана и других пористых материалов. На цилиндрический стакан одеваются кольца треугольного и трапециевидного сечения так, чтобы снизу, сверху и в середине находилось кольцо треугольного сечения, а между ними против отверстий в стакане два кольца трапециевидного сечения. Стакан с кольцами устанавливается на неподвижную шайбу. Сверху колец накладываются уплотнительная прокладка и подвижная (прижимная) шайба, которая гайкой прижимается к резиновым кольцам, обеспечивая герметичность. В зависимости от прижимного усилия, создаваемого гайкой, регулируются расход воздуха и его дисперсность.

При установке элементов аэратора из пористого полиэтилена и титана необходимы уплотнительные прокладки между неподвижной шайбой и пористым элементом, а также между пористым элементом и подвижной шайбой. При этом затягивание прижимной гайки из пористого полиэтилена производят осторожно, так как полиэтилен обладает пластической деформацией при небольших усилиях. Аэратор с установленными аэрирующими элементами помещают в резервуар стенда и подвергают опрессовке для обнаружения сквозных отверстий в каркасе аэратора и неплотностей в местах соединения гибких рукавов со штуцерами, наличие которых при эксплуатации приводит к нарушению (неравномерности) аэрации по сечению камеры флотомашины и к быстрому износу каркаса под совместным действием кислорода воздуха, воды и твердых частиц, еще в большей степени нарушающие аэрацию и работу флотомашин.

Для опрессовки аэратора закрывают вентиль на конденсатном рукаве аэратора и подают сжатый воздух через вентиль от ресивера в аэратор при давлении 0,05-0,1 МПа, закрывают дренажный вентиль стенда, подают воду в резервуар до уровня выше каркаса аэратора на 100-200 мм и наблюдают за аэрацией. На участках с наличием сквозных отверстий наблюдается повышенное бурление. Эти участки отмечают и сквозные отверстия в каркасе заваривают. Выявление сквозных отверстий в каркасе можно осуществлять нанесением мыльной воды кистью на свароч-

ные швы и места сочленения гибких рукавов. При наличии отверстий и неплотностей в этих местах образуются пузырьки, а при крупных отверстиях возникает шумовой эффект.

Устранение сквозных отверстий в каркасе аэратора методом сварки производят после прекращения подачи воздуха в аэратор и при открытом конденсатном вентиле. Если место сварочных работ находится на расстоянии менее 40-50 мм от диспергирующих элементов, то последние необходимо временно снять во избежание их термического разрушения.

После устранения сквозных отверстий и неплотностей производят надежное крепление диспергирующих элементов на каркасе аэратора наложением хомутов или затягиванием резьбовых соединений в зависимости от типа аэратора. Аэратор устанавливают на стенд, подают сжатый воздух при давлении 0,1-0,2 МПа и проверяют аэратор на равномерность аэрации, которая оценивается визуально и методом цилиндра в 3-х точках аэрируемой площади. Аэрируемая поверхность воды в резервуаре стенда должна быть ровной, а отклонение расхода воздуха по точкам от среднего арифметического не должно превышать 10-15%. Над элементами с повышенной пропускной способностью на поверхности образуются вздутия, с пониженной - впадины. Эти элементы должны быть отрегулированы или заменены. По расходомеру определяют расход воздуха на аэратор при фиксированном давлении. Расход воздуха при давлении 0,1 МПа в зависимости от типа и размера аэратора должен составлять 5-17 м³/мин. Испытания на надежность проводят при давлении 0,25-0,30 МПа в течение часа. Разорванные элементы необходимо заменить, а сорванные с посадочных мест - перезакрепить. Аэратор, прошедший испытания, пригоден для установки во флотомашину.

2.3. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПНЕВМАТИЧЕСКИХ АЭРАТОРОВ

Основная характеристика аэратора - размер отрывающихся от его поверхности пузырьков. Точный количественный анализ стадий роста пузырьков невозможен вследствие множества влияющих факторов, которые экспериментально и аналитически еще не определены. Например, до сих пор не разработана модель, учитывающая взаимное влияние пузырьков в соседних отверстиях. Разработано несколько подходов к описанию барботажа через затопленное отверстие. Один из них заключается в составлении дифференциальных уравнений движения жидкости вблизи растущего пузырька (уравнения непрерывности Навье-Стокса, Бернулли) и уравнений термодинамического равновесия пузырьков, определяющих соотношение объема пузырька с давлением. Такие уравнения, характеризующие динамику роста пузырька и его форму в момент отрыва, позволяют решать эту задачу одним из перечисленных

методов, например, методом конечных элементов. К недостаткам рассмотренного подхода относят недоучет многих факторов при составлении уравнений и сложность математического описания.

Другой подход связан с определением диаметра пузырька из условия равновесия сил в момент отрыва. На первой стадии силы прилипания превышают силы, направленные вверх. С увеличением объема пузырька наступает баланс сил. Однако пузырек отрывается не мгновенно, а в течение определенного времени (стадия отрыва). Продолжительность этой стадии определяют по эмпирическим зависимостям. Анализ экспериментальных данных показал, что вычисление диаметра пузырька в момент установления баланса сил (без учета второго этапа образования пузырька) обуславливает погрешность, не превышающую 10% в широких пределах изменения параметров.

К силам, действующим на пузырек, относятся:

1. Сила Архимеда $F_a = \pi d_b^3 (\rho_l - \rho_g) g / 6$; (1)

2. Сила поверхностного натяжения $F_n = \pi d \sigma \sin \gamma$, где d - диаметр площади контакта, γ - угол наклона границы раздела газ-жидкость к горизонту, который складывается из гистерезисного краевого угла смачивания поверхности аэратора и угла наклона этой поверхности. В связи со сложностью и большой погрешностью определения значения γ обычно принимают $\sin \gamma = 1$.

3. Сила сопротивления $F_c = \pi d_b^2 \xi \rho_l (u_b + u_l)^2 / 8$, (2)

где ξ - коэффициент гидродинамического сопротивления; u_l - скорость движения жидкости вблизи пузырька ($u_l > 0$ соответствует противотоку); u_b - скорость подъема центра массы пузырька в момент отрыва. Исследование модели показало, что 10%-я погрешность в определении F_c и F_n обуславливает менее чем 1%-ю погрешность вычисления d_b , поэтому для расчета коэффициента сопротивления целесообразно использовать простые интерполярные формулы, например, $\xi = 24 \text{Re}^{-1} + 1$.

В момент отрыва пузырька, согласно упрощенной модели, пузырек имеет сферическую форму и связан с аэратором цилиндрической воздушной перемычкой, длина которой близка к $d_b/4$. Несложно показать, что в этом случае средняя скорость подъема центра пузырька до момента отрыва $u_b = 9 Q_{go} / (2 \pi d_b^2)$, где Q_{go} - расход воздуха через отверстие. В случае барботажа в непроточном режиме ($u_l = 0$) получаем

$$F_c = \frac{27 \mu Q_{go}}{2 d_b} + \frac{81 \rho_l Q_{go}^2}{32 \pi d_b^2}. \quad (3)$$

4. Сила, обусловленная избыточным давлением газа и его импульсом

$$F_d = \pi d^2 (\rho_g - \rho_l) / 4 + 4 Q_{go}^2 \rho_g / (\pi d), \quad (4)$$

где ρ_l, ρ_g - давление жидкости и газа на уровне аэратора.

5. Инерционная сила, обусловленная ускоренным движением пузырька и присоединенной жидкости. В случае невязкой жидкости объем равен $V = 11 V_b / 16$. Следовательно,

$$F_{\text{и}} = [99 \rho_l / (32\pi) + 9 \rho_g / (2\pi)] Q_{go}^2 / d_b^2. \quad (5)$$

Условие баланса сил имеет вид:

$$F_a + F_{\sigma} = F_n + F_c + F_{\text{и}}, \quad (6)$$

$$\text{откуда } d_b^3 = S + L d_b^{-1} + T d_b^{-2}. \quad (7)$$

Если выполняется условие $\rho_l \gg \rho_g$, то

$$S = 6 d \sigma / (\rho_l g); L = 81 \nu Q_{go} / (\pi g); T = 135 Q_{go} / (4 \pi^2 g). \quad (8)$$

Первое слагаемое в правой части уравнения (6) отражает влияние поверхностного натяжения, второе слагаемое - вязкого сопротивления, а третье слагаемое - инерционных сил. Уравнение (7) имеет пятую степень относительно d_b и может быть решено только итерационными методами, однако с погрешностью, не превышающей несколько процентов, можно получить приближенное решение:

$$d_b = (S^{4/3} + L + T^{4/5})^{1/4}. \quad (9)$$

При барботаже с малым расходом воздуха ($Q_{go} \rightarrow 0$) в непроточной и не очень вязкой жидкости можно принять

$$d_b = S^{1/3} = [6 d \sigma / (\rho_l g)]^{1/3}. \quad (10)$$

Последняя формула справедлива в случае $d_b > 0,2$ мм.

Поскольку в момент отрыва пузырька его форма отличается от сферической, С.С.Кутателадзе и А.М.Стырикевичем введена уточненная формула $d_b = [6 a d \sigma / ((\rho_l - \rho_g) g)]^{1/3}$. Экспериментально установлено, что $a \approx 2/3$. При увеличении расхода воздуха через отверстие отрыв происходит не в момент статического равновесия, а несколько позже, поэтому диаметр пузырька будет больше рассчитанного по формуле (10). Для вычисления начального объема пузырька А.Девисон и М.Харрисон предлагают следующее выражение:

$$V_b = 1,138 Q_{go}^{6/5} g^{-3/5}. \quad (11)$$

Некоторыми исследователями предложено определять продолжительность формирования пузырька из уравнения динамики движения его центра с учетом силы Архимеда и поверхностного натяжения. Начальный объем пузырька в этом случае можно определить из уравнения

$$V_b^2 - (3 V_b / 4 \pi)^{1/3} (2 Q_{go}^2 / g) - 4 \pi \sigma V_b / (\rho_l g) = 0. \quad (12)$$

Из уравнений (10) и (11) следует, что при малых расходах воздуха размер пузырьков слабо зависит от диаметра пор, а при увеличении расхода такая зависимость практически не наблюдается. Вследствие

этого попытки получить микропузырьки в аэраторах пневматического типа, уменьшая размер пор, обречены на неудачу. Так, при уменьшении размера отверстий в 5 раз (от 1 до 0,2 мм) средний начальный диаметр пузырьков изменится менее чем в 1,8 раза, а их размер в объеме колонны останется вследствие коалесценции практически неизменным.

Поток воздуха через отверстие можно оценить по уравнению Бернулли

$$Q_{go} = (\pi d_o^2 c_o / 4) (2 \Delta p / \rho_g)^{1/2},$$

где d_o - диаметр отверстия; c_o - коэффициент; Δp - избыточное давление газа; $\Delta p = p_g - \rho_g g H - \Delta p_c$, p_g - давление воздуха в трубопроводе; Δp_c - потеря давления в отверстии (равна минимальному давлению, при котором начинается аэрация в слое пульпы малой толщины $H \rightarrow 0$). Коэффициент c_o для малых отверстий вычисляют по формуле $c_o = \sqrt{\text{Re} \cdot (12\pi)}$, где $\text{Re} = u_o d_o / \nu_g < 100$, u_o - скорость воздуха в отверстии, ν_g - кинематическая вязкость воздуха в трубопроводе.

При увеличении давления воздуха механизм аэрации меняется: воздух выходит из отверстия в виде компактной струи, которая затем дробится на отдельные пузырьки. Такой механизм аэрации используется в некоторых комбинированных пневмогидравлических аэраторах. Если в области распада газовой струи скорость потока жидкости мала, то средний диаметр пузырька, рассчитываемый при помощи энергетического баланса, составляет $d_b = 2,7\pi \sigma d_o^2 / (Q_{go} \rho_g)$. Условие формирования газовой струи

$$Q_{go} > (5\pi/8) d_o u_b [\sigma / (g(\rho_l - \rho_g))]^{1/2} \quad (13)$$

Другие исследователи считают, что условием перехода пузырькового режима в струйный является баланс силы поверхностного натяжения F_n , стабилизирующей пузырек, и силы F_d , обусловленной давлением газа и его импульсом. В этом случае критическое значение числа Вебера $We = 16\rho_g Q_{go}^2 / (\pi^2 d_o^3 \sigma)$ равно $4(\sin\gamma - d_o/d_b)$, а d_b рассчитывают по формуле (9). Общие вопросы формирования и распада газовых струй рассмотрены в монографии Г.Н.Абрамовича с соавторами. На основе уравнений статистической физики получено, что средний размер пузырька, образующегося при распаде затопленной газовой струи в условиях $u_l = 0$, $d_b = 81d_j/38$. Диаметр (мм) струи в точке распада определяют по эмпирической формуле $d_j = 0,9d_o^{0,73} u_{go}^{0,28}$, где u_{go} - скорость потока газа в отверстии (м/с). Экспериментальные исследования подтвердили адекватность последних формул в условиях $d_o \geq 1$ мм, $u_{go} \geq 5$ м/с.

При критическом расходе воздуха $Q_{g\text{кр}}$ через отверстие, соответст-

вующем переходе барботажного режима аэрации в струйный, аэрация осуществляется в результате образования непрерывной цепочки пузырьков. В этом случае из уравнения баланса воздуха в аэраторе можно получить

$$d_b = \sqrt{6 q_{гкр} / (\pi u_b)}, \quad (14)$$

где u_b - скорость подъема пузырька, зависящая от d_b .

В промышленных установках барботаж осуществляется через большое число отверстий или пористую пластину. В этом случае теорию образования пузырьков в одиночном отверстии используют лишь в качестве первого приближения для описания процесса. При высокой скорости движения пульпы вблизи аэратора размер пузырьков значительно уменьшается вследствие "срезающего" действия потока.

Коалесценция пузырьков при их росте в соседних отверстиях определяется параметром $N = We_o / \sqrt{Fr_o}$, где $We_o = We_{pl} / \rho_g$; $Fr_o = u_o^2 / (gd_o)$. Экспериментальные исследования Т.Мияхары и Т.Такахаша показывают, что при $d_o = 1,5-3$ мм и $p/d_o = 1,35-2,37$ (p - расстояние между соседними отверстиями) коалесценция наблюдается при $N > 2$.

При барботаже через материалы с эластичными порами следует учитывать зависимость диаметра отверстия от давления воздуха p_g в системе. Степень растяжения $\lambda = d_o / d_o^*$ (d_o^* - диаметр отверстий, соответствующий минимальному давлению воздуха в барботажном режиме) поверхности перфорированного эластомера, применяемого в качестве аэратора, зависит от механических свойств материала (модуль Юнга, напряжение сдвига и т.д.), размеров аэратора и способа его крепления.

Для пористых эластичных мембран, принимающих под действием избыточного давления сферическую форму, справедливо соотношение

$$(p_g - \rho_l g H) R / (8 b_o G) = \sqrt{\lambda - 1} (\lambda^6 - 1) / \lambda^7, \quad (15)$$

где R - радиус мембраны; b_o - толщина недеформированной мембраны; G - модуль Юнга.

Определяя из выражения (15) численными методами λ , можно найти зависимость размера пор от давления воздуха. В первом приближении $d_o \sim \sqrt{p_g - \rho_l g H}$. В соответствии с экспериментальными данными $d_b \sim \sqrt{v_g}$.

Дисперсный состав пузырьков изменяется по высоте колонны. На него влияют уменьшение гидростатического давления, а также процессы диспергирования и коалесценции пузырьков. Коалесценция пузырьков может предшествовать их отрыву при малом расстоянии между отверстиями аэратора. Условием коалесценции при образовании пузырьков является неравенство $We Fr^{-1/2} < 2$. Начальное распределение пузырьков по размерам и интенсивность их коалесценции зависят от поверхностного натяжения σ на границе пульпа-воздух. Экспериментальные ис-

следования показывают, что на величину σ влияет не только расход реагентов, но и способ их подачи. Так, при распылении пенообразователя в виде аэрозоля в воздух, подаваемый во флотационную машину, средний размер пузырьков может быть вдвое меньше, чем при подаче реагентов непосредственно в пульпу.

2.4. ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ АЭРАТОРОВ

При эксплуатации трубчатых аэраторов из резиновых трубок для предупреждения попадания в них воды и тонкодисперсных фракций подачу воздуха необходимо распределять поровну между всеми трубками. Если расход воздуха в одном из секторов аэратора выше, чем в других, то его необходимо уравновесить регулировкой общего расхода или заменой части трубок. Если количество воздуха, требуемого по режиму эксплуатации, меньше, то необходимо обеспечивать расход воздуха до рекомендуемых пределов.

В указанных условиях минимальный расход воздуха определяется технологическим процессом. После перерыва в подаче воздуха, обусловленного отключением электропитания или другой помехой, эксплуатация аэратора должна в течение некоторого времени осуществляться с повышенным расходом воздуха. Это необходимо для удаления отложений с поверхностей трубок.

Если флотомашины опорожняются и в течение долгого времени остаются неиспользованными, то их аэраторы следует хорошо промыть (прочистить) и удалить конденсат (оставив вентиль сброса конденсата открытым). Это обусловлено тем, что эластичные трубки аэратора исключительно чувствительны к ударным нагрузкам при пуске. Если замечаются потери давления после промывки, то аэраторы (трубки) надо заменить новыми.

Увеличение потерь давления воздуха в трубчатых аэраторах в процессе эксплуатации происходит по следующим причинам: недостаточная фильтрация воздуха, засасываемого компрессором; наличие масла и пыли, поступающих вместе со сжатым воздухом из компрессоров с внутренней смазкой; присутствие коррозионных агентов, остающихся в трубопроводах систем, и остатков сварочных операций; наличие твердых частиц, забивающих аэраторы при простоях в эксплуатации и порыве трубок; присутствие в пульпе остатков флотореагентов, например, жидкого стекла, масла, сульфата железа и т.д., которые повышают коэффициент начального сопротивления аэраторов.

Ввиду того, что аэрация является энергоемкой операцией, следует строго следить, чтобы потери давления не превышали на аэраторах

исходного значения (0,15 МПа) для трубок типа КЩ-1 (ГОСТ 5496-67). Для обеспечения эффективности аэрации следует пористые части (трубки) промыть или заменить новыми.

Аэратор поднимается из машины вручную или с помощью подъемного механического устройства. Для облегчения ремонтного обслуживания аэратор промывают водой еще в камере машины. Трубки аэратора закреплены на ниппелях с помощью резиновых шайб. Основной подвод воздуха к аэратору осуществлен с помощью гибкого шланга и может при необходимости быть отсоединен от общей магистрали. Для замены перфорированных трубок необходимо перекрыть подачу воздуха в коллектор. Съем и одевание трубок производится вручную. Сборка аэратора осуществляется следующим образом: перфорированная трубка одевается на ниппель с предварительно одетой на нее крепежной шайбой уплотнителя. При одевании трубок ниппели необходимо смачивать мыльной эмульсией. Использование консистентной смазки или масла недопустимо.

Если предусматривается многократное использование перфорированных трубок аэратора, то их можно промывать с помощью различных моечных добавок или воды, нагнетаемой под давлением.

Промывка осуществляется с помощью специального моечного устройства, работающего под высоким давлением. Промывку аэраторов можно осуществлять на месте, не снимая их с каркаса. Для этого необходимо опорожнить машину или поднять аэратор на уровень переливного пенного порога. Промывку надо производить с помощью сопла, разбрызгивающего воду веерообразно, причем струя воды должна быть направлена к поверхности аэратора под углом 45° . Расстояние между соплом и аэратором в зависимости от величины давления должно составлять от 5 до 15 см. Струя воды, направленная на аэратор с короткого расстояния и под высоким давлением, может повредить перфорированную часть аэратора.

Для промывки аэраторов растворителями их устанавливают в специально разработанную емкость таким образом, чтобы загрязненный растворитель не проникал в трубки аэратора через крепежные детали. Для промывки внутренней части трубок необходимо снять их с ниппеля.

В процессе эксплуатации от наличия в пульпах различных солей происходит закупорка пор (пористой поверхности). Разработано и проходит испытания устройство оригинальной конструкции (рис. 2.33) для предотвращения закупорки пор в трубчатых и дисковых аэраторах с использованием муравьиной кислоты с подачей ее в воздухопровод в процессе работы. Муравьиная кислота не разъедает стенок трубопровода, она легко испаряется, равномерно распределяется по всей системе и

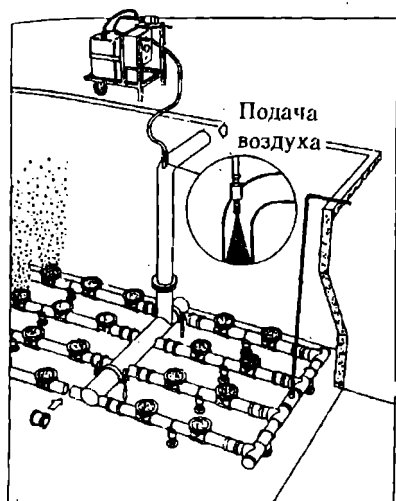


Рис. 2.33. Схема установки для предотвращения закупорки пор

эффективно растворяет ил, соли кальция и железа.

Наиболее эффективным средством прочистки аэраторов, используемых при флотации, является промышленная соляная кислота (2%-й водный раствор). Аэраторы выдерживают в растворе не менее 2 ч, после чего их прополаскивают и просушивают.

Результат промывки можно улучшить, используя 10%-й раствор щелочи, в который аэратор опускается после обработки его соляной кислотой и промежуточного ополаскивания. Далее аэратор окончательно ополаскивают водой. По мере надобности операцию промывки можно повторять несколько раз. Опыт показал, что

"отмачивание", продолжающееся 10 ч, не улучшает результатов промывки, ввиду чего более целесообразно использовать двух- или трехкратные операции промывки. Для предупреждения реакции нейтрализации моющих средств промежуточное прополаскивание необходимо осуществлять с особенной тщательностью.

Методы промывки дисковых (шайбовых) аэраторов аналогичны тем, которые используются для трубчатых аэраторов. Исходя из того, что более рентабельна промывка сравнительно крупных партий аэраторов, следует на складе в зависимости от размеров установки держать всегда от 10 до 40% требуемого установкой количества аэраторов. Этим можно обеспечить непосредственную замену отсоединяемых для промывки аэраторов ранее промытыми. Таким образом обеспечивается бесперебойная эксплуатация трубчатых и шайбовых аэраторов.

Наиболее простым способом промывки трубчатых и шайбовых аэраторов является их промывка в специально разработанной для этого емкости, в которой одновременно помещается до 300 трубок и 20 аэрационных шайб. Персонал, осуществляющий промывку аэраторов, необходимо снабжать защитной одеждой и специальными приспособлениями.

Если предусматривается промывка аэраторов с помощью растворов, то с вводом установки в эксплуатацию рекомендуется выделить специальное помещение, размер которого должен быть достаточен для обрабатываемого количества аэраторов. В помещении должен иметься вывод для сжатого воздуха, который в том случае, если установка не имеет собственной пневматической сети, отбирается непосредственно из аэрационного процесса. Обмен воздуха в помещении следует обеспечивать с помощью потолочного вентилятора ($25 \text{ м}^3/\text{ч}$ воздуха на 1 м^2 помещения). При промывке аэраторов согласно вышеуказанным рекомендациям потери давления могут быть сведены фактически до первоначального значения.

При испытании аэраторов давлением в систему подается большое количество воздуха (около $6 \text{ м}^3/\text{ч}$ на один аэратор). Уровень воды (чистой) не должен превышать 100 мм над поверхностью трубчатых аэраторов. Необходимо равномерное поступление воздуха через аэраторы. Контроль трубок рекомендуется начинать только через $10\text{--}20$ мин после начала испытаний. Одновременно с этим расход воздуха можно понизить до $3 \text{ м}^3/\text{ч}$ на аэратор. Если через какой-либо аэратор поступает явно меньшее количество воздуха, то это можно устранить путем кратковременной подачи избыточного количества воздуха, или же заменить трубку на новую. Неравномерность воздухораспределения выравнивается после того, как уровень воды в машине достигнет 3 м и более. При негерметичности аэрационной трубки из-под нее периодически появляются пузыри крупного размера. Указанный дефект можно устранить, затянув специальным инструментом стяжное кольцо аэратора или слегка открепив его и изменив положение трубки на ниппеле. Коэффициент равномерности аэрации зависит также от влажности воздуха и количества воды, имеющейся в трубопроводной системе. В таких случаях необходимо их удаление с помощью вентили водосливной трубы (конденсата отводника).

Наилучший результат аэрации достигается периодическим удалением влаги (конденсата) и масла в процессе нормальной эксплуатации машины (не менее одного раза в смену). Тщательное удаление воды и масла необходимо как в связи с вводом машины в эксплуатацию, так и после происшедшего отключения электропитания.

ГЛАВА 3. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ И ПНЕВМОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ АЭРАТОРЫ

3.1. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ АЭРАТОРЫ СТРУЙНОГО ТИПА

Принцип действия гидравлических аэраторов основан на подаче воздуха в поток движущейся жидкости и его диспергации. Этот принцип широко используется в процессах водоочистки. Применение его для флотации предложили К.Даррелл (1915 г.) и Т.Гувер (1916 г.). В 1917 г. А.Вагнером был создан аппарат, в котором дробление пузырьков воздуха и их минерализация происходили при движении пульповоздушной смеси с большой скоростью по трубе (патент США 1235083). Эту конструкцию можно считать прототипом современных эжекторных и аэро-лифтных флотационных машин.

Подробные экспериментальные и аналитические исследования аэраторов этого типа показали, что механизм процесса аэрации зависит от скорости движения потока жидкости. При малых скоростях воздух поступает в пульпу при ударе струи изменяющегося диаметра о поверхность жидкости в результате периодического смыкания краев образующегося кратера. С увеличением скорости струи вблизи нее образуется развитый пограничный слой, движущийся вместе с ней. На некотором расстоянии от сопла турбулентная струя распадается на отдельные капли, движущиеся с большой скоростью и увлекающие за собой воздух (эжекционный механизм). Форма струи в зависимости от конструкции сопла может быть конической, спиральной (патенты США 4514291, 4605494) или плоской. Для дополнительного диспергирования пузырьков можно использовать удар пульповоздушной смеси о твердую стенку.

Известно множество конструкций аэраторов, основанных на этом принципе действия: эжекция воздуха при перепаде динамического напора жидкости и диспергация его в турбулентном потоке. Наиболее наглядно этот принцип действия реализован в струйных аэраторах, действие которых основано на ударе струи жидкости о поверхность пульпы. Возможно два различных метода использования кинетической энергии струи рабочей жидкости: аэрация свободно падающей струи жидкости и напорное истечение жидкости через насадки (сопла), помещенные в камеру эжекции (рис. 3.1).

Аэраторы ударного действия являются разновидностью струйных аэраторов, в которых встречная струя жидкости дробит воздух на мелкие

пузырьки (рис. 3.2). Розетки, предназначенные для дробления воздуха, монтируются на воздуховоде и имеют обычно по четыре отверстия диам. 6-13 мм для подачи воздуха при расходе 0,1-0,6 м³/мин. Жидкость под давлением (обычно не более 0,8 МПа) выбрасывается к розеткам через конические насадки диаметром на срезе 16 мм. Степень дробления пузырьков и эффективность растворения кислорода зависят от расхода циркулирующей жидкости, обычно равного 60-70 л/мин на каждую насадку. В настоящее время эти аэраторы имеют ограниченное применение из-за невысокой производительности по кислороду, значительных потерь напора в трубопроводах, биологического обрастания и отложения солей, требующих систематической (через 3-4 мес) очистки, а также интенсивного пенообразования.

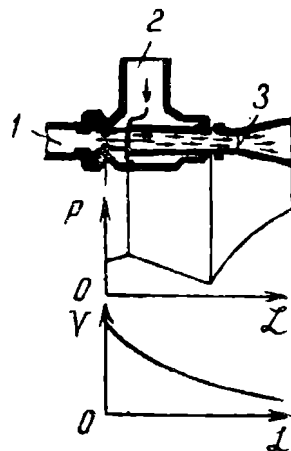


Рис. 3.1. Эжекторный аэратор:

1 - рабочая жидкость; 2 - воздух; 3 - водовоздушная смесь; α - длина эжектора; P - давление; V - скорость потока

Из всех типов струйных аэраторов заслуживают внимания два типа: *поверхностные и погружные (объемные)*, отличающиеся методами использования кинетической энергии движущейся струи жидкости.

В *поверхностных аэраторах* процесс осуществляется свободнопадающей струей жидкости. Большим недостатком этих аэраторов является то, что они применимы лишь для неглубоких емкостей, так как имеют малую глубину проникновения газожидкостного факела. Поэтому их не рекомендуют использовать во флотационных машинах при обогащении полезных ископаемых.

Погружные (объемные) аэраторы получили наиболее широкое распространение за последние 10 лет.

Конструктивное оформление погружных аэраторов весьма разнообразно, однако в любом случае они имеют сопло для пропускания рабочей жидкости, патрубок или отверстие для вовлечения воздуха, камеру смешения и диффузор. Различают три типа погружных аэраторов: *линейные, многосопловые, радиально-кольцевые*.

Линейные аэраторы. Представляет интерес предложенная Б. Н. Репиным и др. конструкция линейного аэратора (рис. 3.3), позволяющая повысить эффективность процесса аэрации за счет улучшения взаимного контакта воздуха с жидкостью. Это достигается тем, что устройство для движения потока жидкости выполнено в виде крыльчатки со спи-

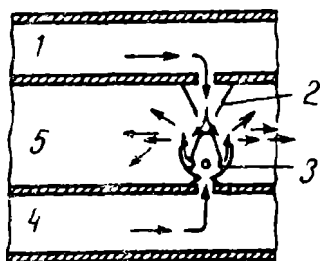


Рис. 3.2. Струйный аэратор ударного действия:

1 - рабочая жидкость; 2 - коническая насадка; 3 - распылительная розетка; 4 - сжатый воздух; 5 - аэрирующая среда

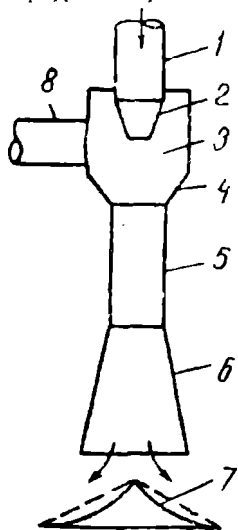


Рис. 3.3. Линейный аэратор:

1 - напорный коллектор; 2 - сопло; 3 - приемная камера; 4 - эжектор; 5 - камера смещения; 6 - диффузор; 7 - рассекающий воздух; 8 - воздухозаборная трубка

ральной образующей, имеющей возможность вращения вокруг горизонтальной оси, и снабжено прикрепленной к диффузору скобой с направляющей.

Аэратор со ступенчатой эжекцией воздуха (рис. 3.4) позволяет значительно повысить эффективность аэрации за счет увеличения растворенного в воде кислорода. Устройство снабжено прикрепленными к нижним и верхним торцевым кромкам конфузоров цилиндрическими обечайками с радиальными накладками, а также диффузором, прикрепленным к нижней торцевой кромке цилиндрической обечайки внешнего конфузора. Через кольцевой зазор между конфузором и насадкой подсасывается новая порция воздуха, что приводит к значительному увеличению общего объема вовлекаемого воздуха, а значит, и интенсивности аэрирования.

Анализ различных конструкций линейных аэраторов и опыт их эксплуатации позволяют отметить их недостатки: необходимость установки большого количества аэраторов для обеспечения равномерности газонасыщения по объему обрабатываемой жидкости и в связи с этим сложность подводных коммуникаций, большое количество запорно-регулирующей арматуры.

Многосопловые аэраторы. Этот тип аэраторов обеспечивает более равномерное насыщение жидкости воздухом по всему объему (рис. 3.5). Многосопловый аэратор содержит несколько расположенных равномерно по окружности эжекторов, имеющих общие воздухо- и водоподводящие трубы.

Все известные конструкции многосопловых аэраторов имеют определенные преимущества перед линейными аэраторами: подвод газа и жидкости осуществляется по общему для всех эжекторов трубопроводу, что упрощает конструкцию в целом и в части регулирования параметров процесса аэрации. Однако равномерность насыще-

ров трубопроводу, что упрощает конструкцию в целом и в части регулирования параметров процесса аэрации. Однако равномерность насыще-

ния всего объема жидкости недостаточна.

Радиально-кольцевые аэраторы позволяют в значительной степени интенсифицировать процессы аэрации и обеспечить равномерность насыщения воздухом всего объема жидкости. Это достигается тем, что образующийся при работе этих аэраторов газожидкостный факел рассредоточен и не замыкается в узкой области по оси струи, что снижает степень коалесценции пузырьков воздуха.

На рис. 3.6 представлен радиально-кольцевой аэратор, содержащий водоподводящую трубу и расположенную внутри нее по оси воздухоподводящую трубу, выполненную в виде расширяющегося книзу диффузора, снабженного горизонтальным диском. Аэратор позволяет увеличить зону захвата воздуха при эффективном его диспергировании.

Все известные конструкции радиально-кольцевых аэраторов компактны, позволяют получить кольцевой газожидкостный факел, обслуживающий большую площадь, и равномерно распределить газожидкостную эмульсию по сечению аппарата; обеспечивают большие коэффициенты эжекции (6-10 объемов воздуха на 1 объем жидкости), кроме того, появляется возможность оптимизации геометрических характеристик аэратора в зависимости от условий его работы.

С учетом перечисленных преимуществ радиально-кольцевых аэраторов их рекомендуется устанавливать во флотационных машинах, в том числе и аппаратах чанового типа при флотации и очистке сточных вод.

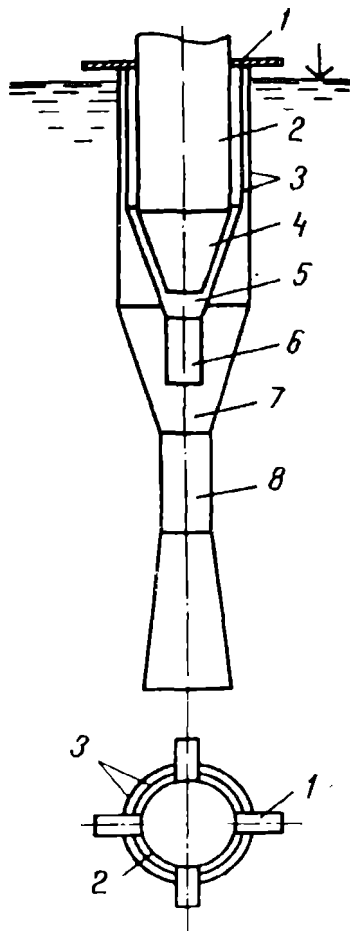


Рис. 3.4. Аэратор со ступенчатой эжекцией воздуха:

1 - ребра; 2 - трубопровод рабочей жидкости; 3 - воздухозаборные трубы; 4 - сопло; 5 - конфузор; 6 - засадка; 7 - приемная камера; 8 - смесительная камера

3.2. ПНЕВМОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ АЭРАТОРЫ

Предварительные конструктивные проработки и испытания различных моделей струйных аэраторов позволили выбрать базовую конструкцию пневмогидравлического аэратора (ПГА), в которой продуцируются кольцевые тонкие радиальные кинетические струи жидкости, обладающие большой энергоемкостью, осуществляющие эжекционный захват газа и его диспергирование в объеме окружающей аэратор жидкости (рис. 3.7).

Для создания новых и усовершенствования конструкций существующих пневмогидравлических аэраторов проводились теоретические и экспериментальные исследования пространственного и струйного течения реальной жидкости в условиях натекания на обтекаемую твердую поверхность, имеющую коническую форму, закономерности захвата и диспергирования воздуха в режимах самовсасывания и принудительной подачи сго в ПГА при различных глубинах погружения. Пневмогидравлические аэраторы обеспечивают малую энергоемкость и материалоемкость, максимальный коэффициент инжекции (6-10) и вполне удовлетворительную аэрацию пульпы и диспергирование воздуха, что необходимо для получе-

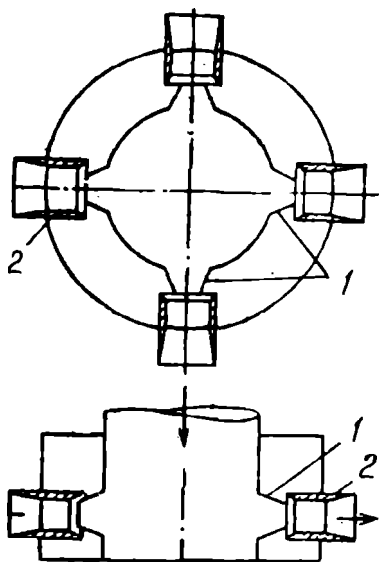


Рис. 3.5. Многосопловый аэратор:
1 - сопло; 2 - камера смешения; 3 -
воздухоподводящая труба; 4 - водоподво-
дящая труба

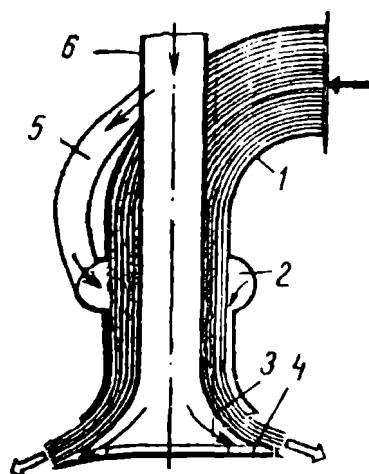


Рис. 3.6. Радиально-кольцевой аэратор:
1 - отвод; 2 - торроидальная камера; 3 - диф-
фузор; 4 - диск; 5 - водоподводящая труба; 6 -
воздухоподводящая труба

ния высоких технологических показателей при флотации апатита.

Это играет решающую роль в создании флотомашин с аэраторами пневмогидравлического типа, устанавливаемых в нижней камере, что позволяет увеличить зону вовлечения воздуха вдвое и значительно повысить коэффициент инжекции.

При аэрации пневмогидравлическими аэраторами растворов ПАВ образуются только мелкие пузырьки. Одним из путей создания потока транспортных пузырьков большего размера является интенсификация процесса коалесценции в вихревом потоке жидкости за препятствием. Результаты исследований различных вихреобразующих элементов показывают, что кинетика коалесценции описывается известной формулой

$$dn_b/dt = (\rho_l/\rho_c) n_b^2 (\epsilon^{3/4}/\nu^{5/4}) \bar{d}_b^4,$$

где ρ_c - плотность пульповоздушной смеси; \bar{d}_b - средний размер пузырька в момент времени t ; ϵ - диссипация энергии; ν - кинематическая вязкость жидкости. Следует учитывать возможность дробления пузырьков в вихревом потоке и отрицательное влияние циркуляции пульпы на гидродинамические параметры флотационной машины. К преимуществам пневмогидравлических аэраторов относят возможность получения высокой концентрации тонкодисперсного воздуха при невысоких энергозатратах без аэрирующих и перемешивающих устройств в камерах машины. Недостатком этих конструкций является их интенсивный абразивный износ.

Поверхностные инжекторные аэраторы.

Аэраторы "кольцевое сопло" (рис. 3.8, а), представляют собой закрытый опрокинутый конус с выходным, расширяющимся книзу соплом на вершине. Воздушная трубка образует со стенками конуса кольцевой канал для прохода воды. Воду от насоса к аэратору подают через боковой штуцер. Воздух всасывается за счет разрежения, возникающего у конца воздушной трубки при обтекании ее рабочей жидкостью. Выходящую из аэратора водовоздушную смесь погружают в обрабатываемую сточную воду со скоростью 10-12 м/с. В месте входа струи образует углубление в виде воронки. Водовоздушная струя захватывает в воронку атмосферный воздух и перемешивает воду в аэрационном сооружении.

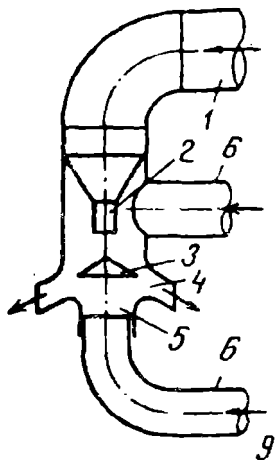


Рис. 3.7. Пневмогидравлический аэратор:

1 - отвод; 2 - насадки; 3 - рассекающий элемент; 4 - верхняя камера смешения; 5 - нижняя камера смешения; 6 - воздухоподводящие трубы

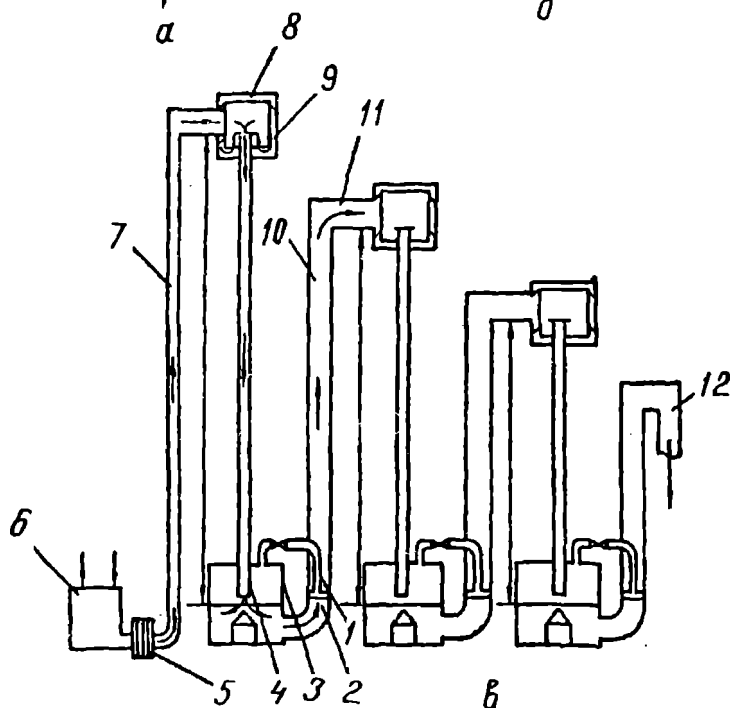
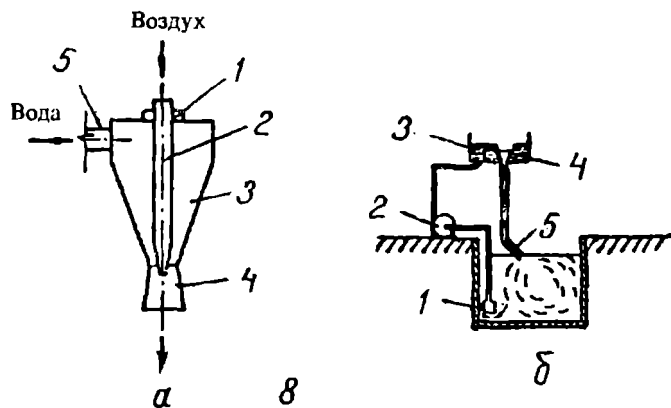


Рис. 3.8. Поверхностные инжекторные аэраторы:

а - аэратор "кольцевое сопло": 1 - контргайка; 2 - воздушная трубка; 3 - корпус; 4 - выходное сопло; 5 - входной патрубкок;
б - одноступенчатый шахтный водослив: 1 - аэрационное сооружение; 2 - циркуляционный насос; 3 - переливной бачок; 4 - кольцевой шахтный водослив; 5 - сопло;
в - многоступенчатый шахтный водослив: 1 - воздухопровод; 2 - кольцевой аэратор; 3 - воздухоотделитель; 4 - аэрационная колонна; 5 - насос; 6 - присмный колодец; 7 - нагнетательный трубопровод; 8 - успокоитель; 9 - смеситель; 10 - камера аэрации; 11 - переливной трубопровод; 12 - сливная труба

Максимальный захват воздуха достигается при установке аэратора на расстоянии 8-10 см от поверхности воды, а наилучшее перемешивание - при угле наклона 25-30°. Всасывание воздуха аэратором достигает максимального значения при $V_{сж} = 10-12$ м/с. При этом примерно третья часть воздуха инжектируется через трубку аэратора, а две трети захватываются водовоздушной струей при входе ее в жидкость. Коэффициент подсоса воздуха K_n достигает максимального значения 1,3-1,7 при скорости жидкости в сжатом сечении 8-10 м/с. При дальнейшем увеличении скорости наблюдается рост удельных энергетических затрат. Поэтому для расчетов рекомендуется скорость $V_{сж} = 8-10$ м/с. Для создания такой скорости напор рабочей жидкости должен составлять 0,05-0,07 МПа.

Поверхностные инжекторные аэраторы применяются для очистки сточных вод и рекомендуются к установке как в строящихся, так и на существующих аэротенках небольшой производительности.

Одноступенчатый шахтный водослив (см. рис. 3.8, б) устанавливается над аэрационным бассейном. В качестве рабочей жидкости аэратора используют очищаемую воду, которую насосом подают через переливной бачок к водосливу. Опускаясь под собственной массой по вертикальной трубе, вода через шахтный водослив инжектирует воздух. Выходящая из направляющего патрубка водовоздушная струя дополнительно захватывает воздух из атмосферы. Смесь воды и воздуха погружается в очищаемую жидкость. Таким образом достигают подачи воздуха в количестве 6-14 кг/(м³·ч). Высокая турбулентность воды обеспечивает благоприятные условия для смешения хлопьев активного ила кислородом и питательными веществами. Для подачи жидкости используют осевые или низконапорные центробежные насосы с рабочим напором 0,04-0,05 МПа.

Таковыми аэраторами можно оборудовать и башенные аэротенки. Для этого аэротенк разделяют на несколько секций по высоте горизонтальными перегородками. Рабочую жидкость при помощи насоса подают к водосливу, аэрирующему сточную воду верхней секции. Аэраторы последующих секций работают за счет разности уровней жидкости в секциях сооружения.

За рубежом шахтные водосливы используют для аэрации воды, в отечественной практике для очистки сточных вод известен шахтный водослив, работающий на Курьяновской станции аэрации (Москва). В данном случае при перепаде около 5 м концентрация кислорода в воде увеличивается от 4,9-5,4 до 6,9-7,0 г/м³.

В последние годы для очистки сточных вод нашли применение многоступенчатые шахтные водосливы с попутным использованием кис-

лорода воздуха (см.рис. 3.8, в), содержащие ряд ступеней аэрации. Вы-сота каждой ступени монотонно уменьшается по ходу движения жидко-сти.

Погружные инжекторные аэраторы.

Этот тип аэраторов более эффективен по сравнению с поверхностны-ми: использование кислорода в них более высокое, жидкость перемещи-вается лучше, а аэрация возможна при больших глубинах жидкости.

Эжекторы. В настоящее время известны различные их конструкции. Одна из конструкций эжекторов создана в Каунасском политехниче-ском институте.

Работает устройство следующим образом (рис. 3.9, а). Поступающую по напорному трубопроводу иловую смесь подают в суженное сечение (сопло) аэратора, в котором при высоких скоростях движения жидкости возникает вакуум. За счет вакуума по другому водопроводу инжектиру-ется атмосферный воздух. В смесительной камере газ и жидкость пере-мешиваются, и смесь их поступает в диффузор, в котором в результате постепенного увеличения площади сечения уменьшается скорость и со-ответственно увеличивается давление. Из диффузора водовоздушная смесь поступает под уровень жидкости в аэрационное сооружение. Ос-новные конструктивные параметры высокопроизводительных эжектор-ов представлены в табл. 3.1.

Расстояние между соплом и входом в смесительную камеру прини-мают равным 40-50 мм.

Количество инжектируемого воздуха и растворяемого кислорода при давлении у сопла 0,2 МПа и глубине погружения аэратора 2,5 м приве-дено в табл. 3.2.

Эжекторы рекомендуется применять для очистки хозяйственно-бы-товых и производственных сточных вод в аэротенках производительно-стью до 1000 м³/сут, а также для доочистки сточных вод, аэрации воды в естественных водосмах, для обесжелезивания воды и других целей.

Эффективность работы аэраторов зависит от рабочего напора насоса. Оптимальным следует считать напор воды у сопла - 0,2 МПа. Наиболее

Таблица 3.1
Конструктивные параметры эжекторов, мм

Тип эжектора	Коническое-сужающееся со- плю с цилиндрическим вы- ходным отверстием		Смесительная цилиндрическая камера		Диффузор с углом расши- рения 8-10°
	диаметр	длина цилинд- рической час- ти	диаметр	длина	длина диффу- зора
1-18-40-д	18	18	40	480	400
1-20-32-д	20	20	32	384	320

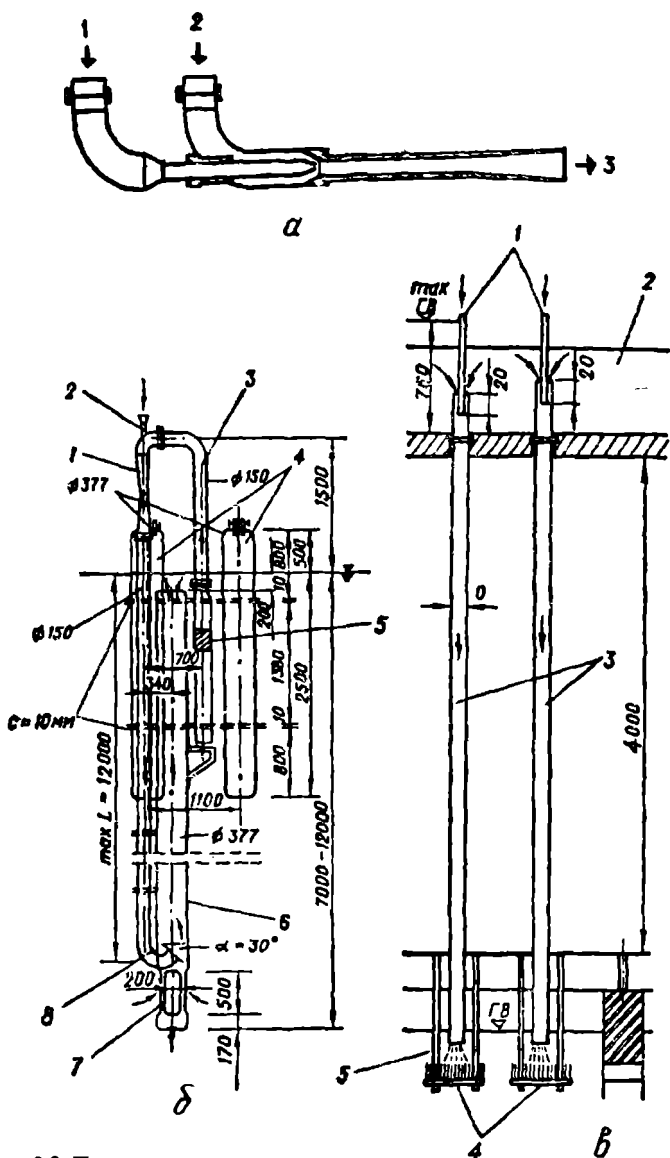


Рис. 3.9. Погружные инжекторные аэраторы:

а - инжектор: 1 - трубопровод подачи воды; 2 - воздухопровод; 3 - диффузор;

б - "Зоя"-аэратор: 1 - сопло; 2 - воздухопровод; 3 - напорный трубопровод; 4 - понтон; 5 - насос; 6 - подъемная труба; 7 - отверстия подсоса жидкости; 8 - смесительный трубопровод;

в - опускные трубы: 1 - воздушные трубки; 2 - резервуар с аэрируемой жидкостью; 3 - опускные трубы; 4 - отражатели; 5 - камера реакции

Таблица 3.2

Количество инжектируемого воздуха и растворяемого кислорода в различных типах эжекторов

Тип эжектора	Количество инжектируемого воздуха, м ³ /ч	Количество растворяемого кислорода, кг/ч
1-18-40-д	37,62	1,10
1-20-32-д	38,52	1,35

экономичен эжектор 1-18-40-д. При оптимальном режиме удельный расход энергии этим аэратором составляет 1,0 кВт·ч/кг O₂ (нетто) или 1,45 кВт·ч/кг O₂ (брутто).

Основное преимущество эжекторов - их простота. При использовании в качестве рабочей жидкости воды, не содержащей механических примесей, они довольно надежны в работе. Недостаток этих аэраторов - повышенный расход энергии.

Установка расщекателей потока после диффузора позволяет интенсифицировать процесс растворения в воде кислорода и улучшает условия перемешивания активного ила с компонентами загрязнений жидкости.

"Зоза"-аэратор (бывш. ГДР) (см. рис. 3.9, б) предназначен для аэрации и перемешивания воды в глубоких водоемах. При погружении низа устройства на 7 м насос обеспечивает расход воды 63 м³/ч, общий расход воды через устройство с учетом подсоса составляет 450 м³/ч. Концентрация кислорода на выходе из подъемной трубы достигает 5 г/м³. Дополнительное насыщение воды кислородом в количестве 1 г/м³ происходит при изливании водовоздушной смеси на поверхность водоемов. "Зоза"-аэратор обеспечивает интенсивное перемешивание воды в водоемах за счет забора ее из нижних, самых бедных по кислороду слоев и последующего выброса на поверхность водоема. При этом самая богатая растворенным кислородом вода из верхних слоев водоема опускается вниз.

Опускные трубы (бывш. ГДР) служат для насыщения воды кислородом для последующего удаления из нее углекислоты и окисления железа и марганца. Представленная на рис. 3.9, а, установка по обработке водопроводной воды состоит из двух бассейнов - верхнего и нижнего, поливинилхлоридного трубопровода подачи водовоздушной смеси в нижний бассейн diam. 100 мм, воздушной трубы diam. 40 мм и устройства для торможения водовоздушных струй под уровнем жидкости в нижнем бассейне. Верхний бассейн предназначен для подачи воды на обработку, нижний - для протекания реакции окисления.

Поверхностно-погружные инжекторные аэраторы

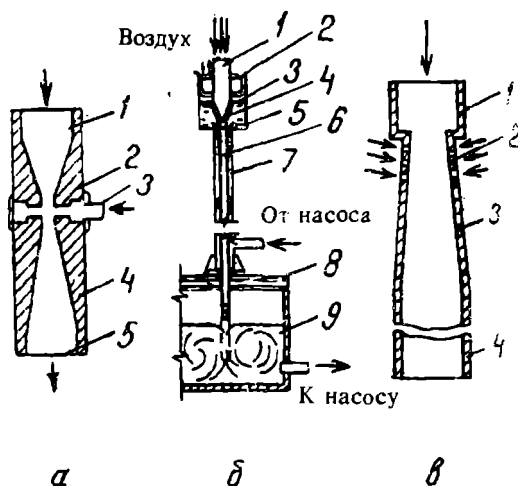
Труба Вентури (рис. 3.10, а) работает аналогично эжектору, но с большей эффективностью, обусловленной более низкими гидравлическими потерями в связи с отсутствием камеры смешения. При работе труб Вентури в экспериментальных условиях затраты энергии на рас-

Рис. 3.10. Поверхностно-погружные инжекторные аэраторы:

а - труба Вентури: 1 - трубопровод подачи воды; 2 - сужение; 3 - подвод воздуха; 4 - диффузор; 5 - трубопровод водовоздушной смеси;

б - водоструйный аэратор, разработанный Ростовским ГПИ "Водоканалпроект": 1 - воздушная труба; 2 - направляющие; 3 - регулирующий конус; 4 - приемный конус; 5 - распределительная камера; 6 - вертикальная колонна; 7 - колонна для подачи воды; 8 - опорная балка; 9 - аэротенк;

в - гидромеханический аэратор: 1 - трубопровод подачи воды; 2 - отверстия подсоса воздуха; 3 - диффузор; 4 - трубопровод водовоздушной смеси



творение 1 кг кислорода составляют 0,28-1,00 кВт·ч. На установках крупного масштаба достичь таких результатов трудно. В условиях эксплуатации эффективность переноса кислорода не превышает 0,6-0,9 кг O_2 /кВт·ч. Для сохранения дисперсности газожидкостной смеси необходимо обеспечить постоянный градиент скорости. Это выполнимо при увеличении скорости жидкости пропорционально радиусу суженного сечения аэратора, что приводит к значительным потерям напора. Повышения производительности можно достичь и за счет установки большего количества труб Вентури меньших размеров, однако это ведет к увеличению капитальных затрат и усложнению обслуживания.

Водоструйный аэратор, разработанный Ростовским ГПИ "Водоканалпроект" (см. рис. 3.10, б). Очищаемая вода, рециркуляционный активный ил или их смесь подаются насосом по колонне в распределительную камеру аэратора. Из камеры через приемный конус рабочая жидкость поступает в колонну водовоздушной смеси. При осесимметричной подаче жидкости к приемному конусу в нем образуется неразрывная воронка, через которую происходит захват воздуха из атмосферы в колонну. При этом на 1 м³ поданной жидкости в колонну вовлекается 1-3 м³ воздуха. Образованию развитой воронки с вращением жидкости, которая приводит к снижению эффективности аэрации, препятствует установка регулирующего конуса и воздушной трубы.

При $Re > 40 \cdot 10^3$, к чему приводят достаточно большие расходы рабочей жидкости, газовая фаза диспергирована в жидкой фазе в виде мел-

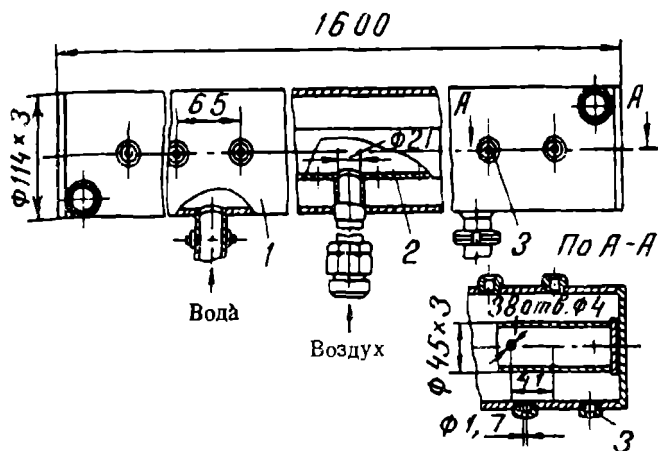


Рис. 3.11. Пневмогидравлический аэратор ПГА-2М:

1 - корпус; 2 - воздушный коллектор; 3 - сопло

ких пузырьков, то есть имеет место эмульсионный режим течения. Растворение кислорода происходит как в колонне, так и в самом аэрационном сооружении.

По удельным затратам электроэнергии на растворение кислорода указанный тип аэраторов равноценен пневматической мелкопузырчатой аэрации. Применение таких аэраторов считается целесообразным при очистке высококонцентрированных сточных вод. Водоструйные аэраторы можно применять вместо пневматических на станциях аэрации производительностью до $10000 \text{ м}^3/\text{сут}$, а также при аэрации воды в биопрудах.

В отечественной практике широкое распространение получили пневмогидравлические аэраторы ПГА-2М, используемые во флотомашинах "Апатит-30" (ФП-2,5 АМ) (рис. 3.11). Аэратор состоит из двух концентрически расположенных труб. Большая из них является смесительной камерой, а меньшая - воздушным коллектором с отверстиями для равномерного распределения воздуха в смесителе. Истечение водовоздушной смеси происходит через калибровочные фильтры диам. 1,8 мм, расположенные продольно по обеим сторонам аэратора.

Эрлифтные аэраторы. Для очистки сточных вод с 1970 г. широко применяются эрлифтные аэраторы, позволяющие без реконструкции существующей системы аэрации увеличить количество растворенного кислорода в аэротенке.

Эрлифтный аэратор со сливным порогом представлен на рис. 3.12. Расход воздуха регулируют по показаниям дифманометра. Эрлифтные аэраторы размещают по центральной оси коридора на расстоянии 4-6 м один от другого. Диаметр корпуса обычно равен 0,4-0,8 м, высота порога водослива составляет 0,3-0,6 м. Аэраторы данного типа применяют на

предприятиях пищевой, химической и нефтехимической отраслей промышленности при их быстрой коагуляции солевыми отложениями или нефтяными загрязнениями, а также в качестве дополнительного аэрирующего средства на перегруженных очистных станциях.

По эффективности работы эрлифтные аэраторы занимают промежуточное положение между мелко- и среднепузырчатыми. Как показали исследования Кубота (1979 г.), степень использования эрлифтными аэраторами кислорода воздуха при установке в обычных аэротенках достигает 3-6%. Степень использования технического кислорода в колонных (башенных) аэротенках рабочей глубиной 80-100 м, оборудованных эрлифтными аэраторами, находится на уровне 60-70%. По мнению ряда специалистов, эрлифтные аэраторы превосходят обычные среднепузырчатые по эффективности растворения кислорода вследствие дополнительного разбрызгивания жидкости.

Б.Н.Репин и Т.М.Хантимиров совместно с институтом "Гипрокоммунводоканал" разработали эрлифтный аэратор (рис. 3.13), который кроме обычных функций, осуществляет рециркуляцию иловой смеси из конца коридора аэротенка, оборудованного системой тонкого диспергирования, в его начало (а.с. 1024422 СССР). Это позволяет повысить эффективность растворения кислорода в результате выравнивания его концентрации по длине аэротенка. Аэраторами-эрлифтами рециркуляционного типа оборудованы действующие аэротенки аэропорта "Домодедово" пропускной способностью около 10 тыс.м³/сут. При падении содержания растворенного кислорода в аэротенках ниже нормы включение эрлифтных аэраторов повышает концентрацию растворенного кислорода до 2-4 мг/л при одинаковом количестве подаваемого воздуха. На основании натурных исследований разработаны рекомендации по переоборудованию действующих коридорных аэротенков аэраторами-эрлифтами рециркуляционного типа (Репин, Гиндин, Хантимиров, 1983 г.).

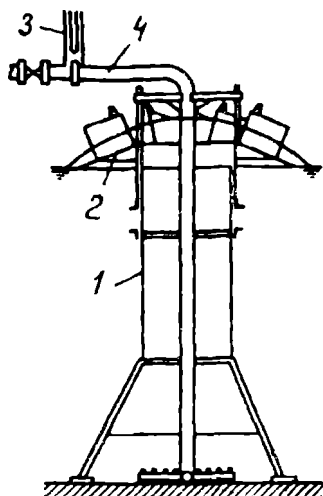


Рис. 3.12. Эрлифтный аэратор со сливным порогом:

1 - корпус; 2 - сливной порог; 3 - дифманометр; 4 - труба для подвода воздуха

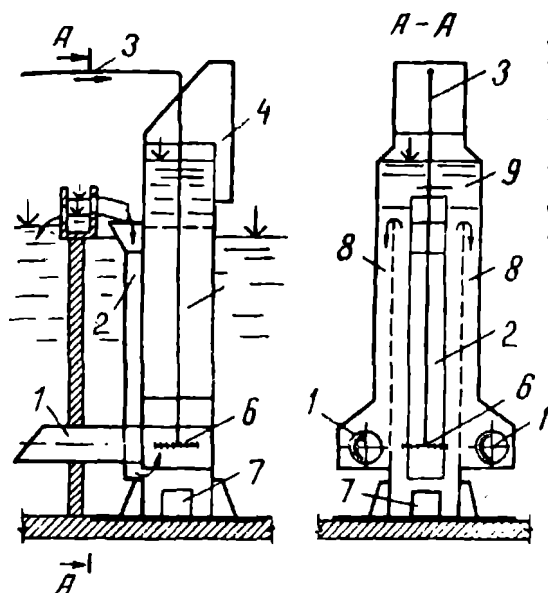


Рис. 3.13. Эрлифтный аэратор рециркуляционного типа:

1 - цилиндрический корпус; 2 - водосливный порог; 3 - тангенциальные лопатки; 4 - дифманометр; 5 - трубопровод подачи сжатого воздуха; 6 - опора; 7 - среднепузырчатый диспергатор

Эрлифтный аэратор пневматической флотационной машины состоит из прилегающих друг к другу полых кольцевых элементов, образующих цилиндр. В каждом элементе выполнена выемка, ограниченная с боков кольцевыми зубчатыми стенками. Между зубьями стенок выполнены сквозные прорезы. Зубья и прорезы формируют каналы с переменной жесткостью для подвода и диспергирования газовой фазы. Все элементы имеют отверстия для подачи сжатого воздуха и цилиндрические приливы с отверстиями для соединения их со стержнями в образования единого цилиндра. Через отверстия во внутренние полости элементов подают газовую фазу. Последняя через каналы переменной жесткости и прорезы в виде отдельных пузырьков определенной крупности поступает в камеру флотомашины. Требуемое количество газовых пузырьков обеспечивается определенным количеством прорезей.

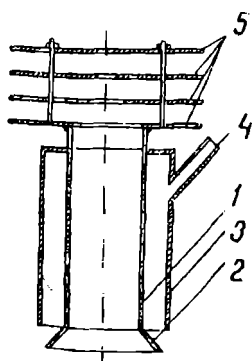
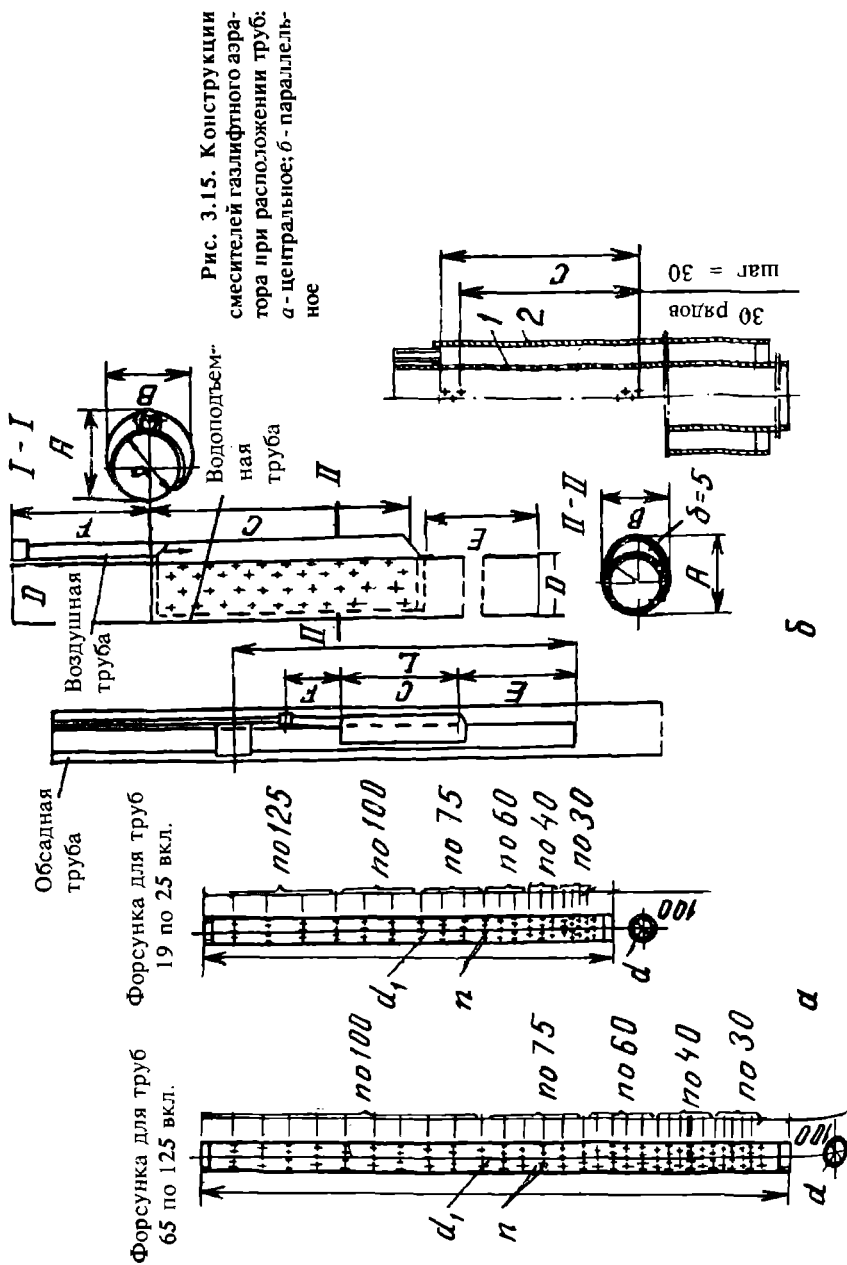


Рис. 3.14. Газлифтный аэратор

Газлифтный аэратор (рис. 3.14) состоит из внутреннего перфорированного корпуса 1, конуса 2, наружного корпуса 3, воздухоподводящего патрубка 4 и отражательных дисков 5.

Сжатый воздух, подаваемый через патрубок в пространство между внутренним и наружным корпусами поступает через отвер-



ствия внутрь смесителя и создает область пониженного давления, образуя область эффективного засасывания пульпы через конус. Аэрированная пульпа с высокой скоростью устремляется вверх на отражательные диски, где происходит эффективное диспергирование воздуха, и далее в камеру флотации. В отражательных дисках выполнены отверстия различных диаметров от большего (в нижней части) к меньшему (в верхней части), создавая условия для равномерного распределения пульпы, аэрированной воздухом, в объеме флотомашинны.

На рис. 3.15 приведены конструкции смесителей газлифтных аэраторов.

3.3. АЭРАЦИОННЫЕ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУЙНЫХ АЭРАТОРОВ

Рассматривая механизм аэрации жидкостными струями, необходимо различать три основных режима аэрации: ламинарными струями, турбулентными струями и каплями жидкости (разбрызгиванием).

При ударе ламинарных струй ($Re < 1500$) о поверхность жидкости образуется кратер. Вокруг ядра струи, входящей в жидкость, движется воздушная пленка, которая при попадании в кратер разрушается с образованием пузырьков. При снижении скорости истечения струи ниже определенного значения ($V_{кр}$) аэрация резко замедляется. Значение $V_{кр}$ зависит от диаметра насадки, вязкости жидкости и сил поверхностного натяжения. Так, при увеличении диаметра насадки (источника струи) с 2,2 до 9,5 мм $V_{кр}$ уменьшается с 12,5 до 0,75 м/с, а средний диаметр образующихся при этом воздушных пузырьков равен 2,4 мм. При возрастании скорости струи до $2V_{кр}$ средний диаметр пузырьков уменьшается до 0,9 мм. Как показали исследования Лина и Донелли, при диаметре насадки 5 мм и $V_{кр} = 1,02$ м/с за 1 с образуется 20 пузырьков, а при скорости струи $2V_{кр}$ число образующихся за 1 с пузырьков достигает 1000. Таким образом, ламинарные струи хотя и обеспечивают тонкое диспергирование воздуха, однако его объем составляет не более 3% от объема струи.

Турбулентные струи ($Re > 1500$) обладают большей аэрирующей способностью, так как в месте удара о поверхность жидкости образуется замкнутое тороидальное пространство, распадающееся на мелкие пузырьки.

При капельном режиме аэрации наблюдается несколько иной механизм. В месте удара капли образуется кратер, который под действием сил поверхностного натяжения замыкается пленкой жидкости, превращаясь в воздушный пузырек. Значение $V_{кр}$ для падающей капли составляет около 5 м/с, а глубина кратера и объем "захлопнутого воздуха"

определяются кинетической энергией единичного удара капли о поверхность жидкости.

Влияние высоты падения струи на процесс аэрации (рис. 3.16) изучали в Японии. Установлено, что эффективность аэрации падающей струей в стандартных условиях составляет 0,92-3,9 кг O₂/(кВт·ч).

Влияние угла падения струи изучали сотрудники ГИГХСа (Н.Ф. Мещеряков и др., 1981 г.) с применением кино съемки, скорость которой достигала 1000-3000 кадров в секунду. Насадок (источник струи) диам. 2 мм располагали на высоте 5 см над поверхностью аэрируемой жидкости. Вертикальная струя круглого сечения не обеспечивала стабильной аэрации даже при $V = 9-13$ м/с. Установлено, что наиболее эффективна аэрация плоскими наклонными струями, так как благодаря ассиметричной форме кратера воздух легче "защемляется" и ему труднее вырваться наружу. Объем жидкости, аэрируемой наклонной струей, в 3-4 раза больше, чем в случае падения круглой вертикальной струи (рис. 3.17).

Среди исследователей нет единого мнения относительно физической модели струйной аэрации. Гендерсон, Ван де Сандс и Смит определяют эжекционную способность турбулентной струи по формуле

$$Q_1/Q_2 = (d_c/d_n)^2 - 1;$$

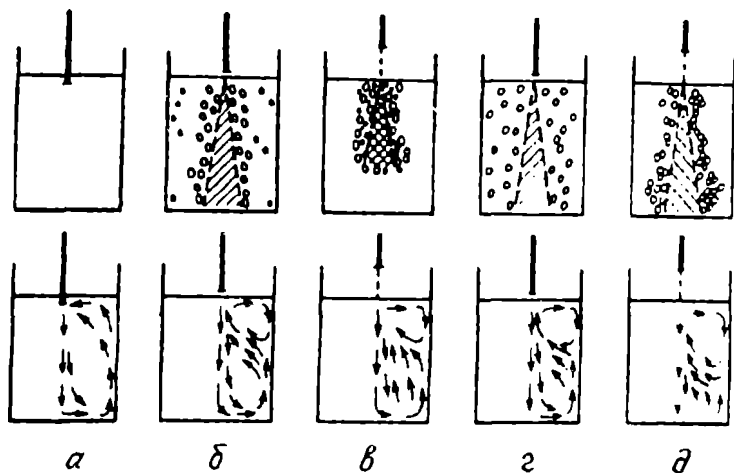


Рис. 3.16. Характер формирования аэрационного факела (вверху) и циркуляционных потоков (внизу) при различных скоростях истечения струи и высотах расположения h насадка диам. 4,5 мм над уровнем жидкости:

$a - V=5,66$ м/с, $h=0$; $б - V=5,66$ м/с, $h=0,5$ см; $в - V=5,66$ м/с, $h=10$ см; $г - V=9,06$ м/с, $h=0,5$ см; $д - V=9,06$ м/с, $h=10$ см

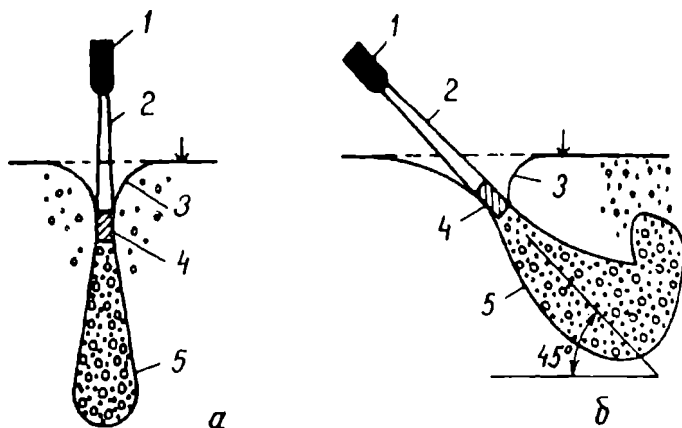


Рис. 3.17. Схема аэрации жидкости вертикальной (а) и наклонной (б) струями: 1 - насадок; 2 - струя; 3 - кратер; 4 - цилиндрическая переходная зона; 5 - факел

$$Q_1 = 0,21 d_n^{3/2} V^2 h^{1/3} / \sin \alpha,$$

где Q_1 и Q_2 - расходы соответственно воздуха и жидкости, м³/с; d_c и d_n - диаметры соответственно струи и насадка, м; V - скорость истечения струи, м/с; h - высота падения струи, м; α - угол падения струи.

Маккеог и Эрвин полагают, что не существует минимальной (критической) скорости, при которой начинается захват воздуха, а определяющей является деформация, создающая "шероховатость" поверхности струи, что выражается следующим образом:

$$Q_1/Q_2 = 1,4 [(\epsilon/r)^2 + 2(\epsilon/r) - 0,1]^{0,6},$$

где ϵ - относительное возмущение поверхности струи; r - текущий радиус струи; ϵ/r - безразмерная неоднородность струи.

Большинство авторов сходится во мнении о том, что перемешивающая способность струйных аэраторов явно недостаточна. Глубина H_1 проникания в жидкость воздушных пузырьков, определяемая по формуле

$$H_1 = 2,6(VdH)^{0,7},$$

заставляет подходить к применению струйных аэраторов с известной осторожностью.

Механизм инжектирования воздуха струей жидкости изменяется при увеличении расхода пульпы. При аэрации струей высокого напора (число Вебера $We = \rho_g u_n^2 d_n / \sigma > 10$, где u_n - скорость жидкости на выходе

из цилиндрического насадка, d_n - внутренний диаметр последнего) возрастает как газонасыщение пульпы, так и стабильность аэрации. Величина u_n пропорциональна давлению пульпы на выходе из насоса.

Расстояние, на котором струя дробится на отдельные капли, связанное с ее скоростью сложной зависимостью. Степень турбулизованности струи и отношение потоков пульпы Q_l и инжектированного воздуха Q_g увеличиваются с удлинением насадка. Предложено несколько аппроксимационных зависимостей Q_g/Q_l от длины струи L_j , диаметра насадка d_n и скорости струи u_n . Различие формул обусловлено разными соотношениями параметров насадка. Эксперименты показали, что дополнительная турбулизация струи инжектированием небольшого количества воздуха в насадок или введением в него спирали Архимеда (геликоида) значительно повышает отношение Q_g/Q_l , особенно при высоких скоростях движения пульпы ($u_n > 5$ м/с). Масштабный фактор существенно влияет на аэрацию, увеличение диаметра насадка при неизменной скорости струи обуславливает снижение степени аэрации. Для насадков цилиндрической формы предложено эмпирическое соотношение $Q_g/Q_l = 0,09(L_j/d_n)^{0,65}$ (стандартное отклонение 8%) при скорости струи, изменяющейся в пределах 1-10 м/с. При работе с насадком диаметром 1 см при $u_n = 6-10$ м/с обеспечивается $Q_g/Q_l = 1,6$.

Из результатов некоторых экспериментальных исследований следует, что, начиная с критического значения, увеличение длины свободной струи не повышает степень аэрации пульпы вследствие снижения ее импульса, обусловленного действием диссипативной силы сопротивления. Дробление струи на капли, по мнению В.А.Сугака, также не повышает аэрацию. При аэрации компактной струей поток воздуха, движущийся в пограничном слое,

$$Q_g = \pi d_j u_g \delta,$$

где d_j - диаметр струи; δ - толщина пограничного слоя. Скорость потока воздуха и степень инжекции пропорциональны скорости жидкости на поверхности струи, поэтому

$$Q_g = k \pi d_j \sqrt{v_g L_j u_n} Re^n,$$

где k , n - коэффициенты, экспериментально установлено, что $k = 2,1 \cdot 10^{-3}$; $n = 2/3$. Диаметр струи определяют по эмпирической формуле

$$d_j = 0,08 d_n \sqrt{u_n l / \nu_l},$$

где l - расстояние от насадка.

Выбор геометрических параметров камеры струйной флотационной машины определяется гидродинамическими условиями в пузырьковом конусе, образующемся в жидкости. Глубина камеры при падении струи

на поверхность жидкости должна быть несколько больше максимальной глубины погружения пузырька, а глубина погружения и диаметр патрубка, отделяющего зону пузырькового конуса от остальной части камеры, - соответствовать размерам конуса. Установлено, что глубина погружения пузырьков $H_c = 5,1 \sqrt{u_n^2 d_n^2 / g}$. При диаметре насадка 6 мм увеличение скорости потока пульпы u_n от 4 до 10 м/с повышает глубину зоны (конуса) аэрации с 15 до 30 см. Максимальный диаметр пузырькового конуса при этом не превышает 2 см (экспериментальные данные). Средний размер пузырьков по мере погружения водовоздушной струи увеличивается вследствие коалесценции. Их начальный размер определяют по формуле $d_{b0} = 1,5 \cdot 10^{-4} \epsilon$.

Удельную диссипацию энергии ϵ рассчитывают из баланса подводимой мощности

$$(\pi/8) \rho_l u_n^2 d_n^2 = Q_g \rho_l g H_c + \epsilon \rho_l \pi d_c^2 H_c / 4,$$

где d_c - средний диаметр пузырькового конуса. При подстановке численных значений в формулу получаем $\epsilon \approx 5$ Вт/кг, откуда начальный диаметр $d_{b0} \approx 0,1$ мм, равновесное значение $d_{br} \approx 4$ мм. На пузырьках диам. 0,1-0,4 мм обеспечивается эффективное закрепление частиц различной крупности. Увеличение диаметра пузырька в нижней части конуса и в восходящем потоке до нескольких миллиметров создает предпосылки для подъема минерализованного пузырька в спокойных условиях, характерных вне зоны пузырькового конуса. Значительное влияние на показатели флотации оказывает распределение газосодержания и скоростей пузырьков по объему конуса. Экспериментально определено, что распределение скоростей жидкости и пузырьков в нисходящей затопленной струе (пузырьковом конусе) близко к распределению скоростей в одномерной турбулентной струе $u(r) = u_{\max} \exp(-k r^2/b^2)$. Распределение газосодержания опускающихся пузырьков подчиняется аналогичной зависимости на достаточно больших глубинах $\varphi(z) = \varphi_{\max} \exp(-k r^2/b^2)$. Диаметр конуса $D_c(z) = b \sqrt{\ln(u_{\max}/u_c)}$. Вблизи поверхности максимальное газосодержание наблюдается не на оси струи, а в кольце, диаметр которого близок к диаметру насадка. Значения коэффициентов u_{\max} , φ_{\max} , b , k и u_c , зависящих от глубины, определяют экспериментально. При изменении z от 0 до H_c значение b возрастает примерно от 1 до 2, а значение k убывает примерно от 30 до 0.

В соответствии с экспериментальными данными угол расширения пузырькового конуса близок к 25° , а его объем $V_c = 0,152 H_c^3$.

Для увеличения объема аэрированной жидкости, зависящего от вре-

мени пребывания частицы в пульповоздушной системе, применяют аэрацию плоскими наклонными струями. При этом максимальная глубина аэрации $H_{\gamma} = H_c \sin \gamma$, где H_c - глубина аэрации такой же струей, но направленной вертикально, γ - угол наклона струи. Максимальное расстояние от точки входа струи до точки выхода пузырьков $R_{\gamma} = 0,8 H_{\gamma}$, а объем аэрируемой пульпы $V_a = H_{\gamma}^2 (0,8 - 0,5 \operatorname{ctg} \gamma) (a + 0,44 H_{\gamma})$, где a - длина струи.

Среднее газосодержание аэрируемой зоны пропорционально расходу инжектируемого струей воздуха и времени пребывания пузырька в жидкости. Определяя последнюю величину на основе профилей радиальной и вертикальной составляющих скорости пузырьков, для вертикальной струи круглого сечения

$$\bar{\varphi} = 23,8 / (H_c \sqrt{Q_l u_n}),$$

где Q_l - расход пульпы. Для плоской наклонной струи

$$\bar{\varphi} = 17,7 Q_g / [\sqrt{Q_l u_n} / a (a \sqrt{R_{\gamma}} + 1,2 \sqrt{R_{\gamma}^3})].$$

Газосодержание восходящего потока пузырьков значительно ниже газосодержания пузырькового конуса и обычно не превышает 0,15-0,2 (вследствие относительно большого размера поперечного сечения потока). Размеры пузырьков составляют 4-5 мм, поэтому можно предположить, что они выполняют функцию транспортирования. В спокойной зоне от пузырьков отрываются гидрофильные частицы, случайно вынесенные на поверхность. Так как интенсивность минерализации вне пузырькового конуса низка, увеличивать высоту аппарата струйной флотации и распылять струю в придонной фазе в воздушном колоколе нецелесообразно.

Механизм струйной флотации, отличающийся от флотации в импеллерных и колонных машинах, в литературе практически не описан. Закрепление частиц на межфазной границе происходит, очевидно, не только при движении пузырьков в пульпе, но и при падении с большой скоростью отдельных капель пульпы в свободной струе (по аналогии с режимом инверсии фаз в газовой абсорбции, характеризующимся высокой скоростью массообмена). Скорость выноса минеральных частиц на поверхность капли или компактной струи, превышающую скорость их столкновения с отдельными пузырьками, можно ожидать и в процессе струйной флотации, так как в турбулентной струе значительна площадь поверхности раздела газовой и жидкой фаз, а расстояние, которое надо преодолеть частицам до нее, в интенсивно перемешиваемой струе мало. Для моделирования процесса минерализации пузырьков в пузырьковом конусе следует использовать уравнения, применяемые для описания процесса в машинах с интенсивным перемешиванием.

Размер пузырька, зависящий от конструкции аэратора и давления (расхода) воздуха, влияет на интенсивность всех флотационных субпро-

цессов. Гидродинамический коэффициент захвата E возрастает с уменьшением размера пузырька. Вероятность закрепления частицы P_a , определяющая селективность флотации, зависит от соотношения времени контакта частицы с поверхностью пузырька и времени индукции. Обе эти величины уменьшаются при снижении крупности пузырьков. Расчеты Г.С.Добби и Дж.А.Финча показывают, что для повышения вероятности закрепления частиц необходимо повышать дисперсность пузырьков воздуха. На основе этого обычно делают вывод о целесообразности получения тонкодисперсных пузырьков. Согласно формуле О.Н.Тихонова, скорость флотации пропорциональна удельной поверхности пузырьков, т.е. обратно пропорциональна их средней крупности. Ухудшение показателей флотации при чрезмерной диспергации воздуха происходит по следующим причинам. Во-первых, при малых значениях d_b скорость подъема минерализованного пузырька может стать меньше скорости потока пульпы, которая увлекает флотокомплекс в хвосты; во-вторых, приведенная скорость воздуха, при которой наблюдается "захлебывание" колонны (переход к поршневому режиму), согласно модели Г.Уоллиса, падает при уменьшении d_b , поэтому повышение дисперсности пузырьков вынуждает снижать приведенную скорость воздуха. Таким образом, наблюдается экстремальная зависимость скорости флотации от размера пузырька при максимально возможной аэрации. Согласно расчетам Г.С.Добби и Дж.А.Финча, при $d_p = 10$ мкм, $\rho_s = 4$ г/см³ и времени индукции $\tau_i = 30$ мс приведенной скорости противоточного движения пульпы $V_l = 1,5$ см/с соответствует оптимальное значение $d_b = 0,8$ мм, а $V_l = 0,25$ см/с - $d_b = 0,4$ мм. Этот размер следует учитывать при выборе типа аэратора.

3.4. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ АЭРИРОВАННОСТИ ПУЛЬПЫ

Для определения расхода воздуха и степени аэрируемости пульпы во флотомашине смонтирована специальная установка (рис. 3.18), состоящая из стального бака диам. 1500 мм, высотой 5600 мм, циркуляционного насоса КМ 45/55 и ПГА. Для измерения расхода воздуха, давления в нагнетательном патрубке насоса предусмотрены соответствующие измерительные устройства.

Аэрированность жидкости - степень объемного содержания газа в объеме жидкости - рассчитывают по формуле

$$\varepsilon = \frac{W_1 - W_0}{W_1},$$

где W_1 - объем смеси газ-жидкость; W_0 - объем жидкости.

Аэрированность жидкости зависит от ряда факторов (применительно к пневмогидравлическим аэраторам): температуры жидкости, влияю-

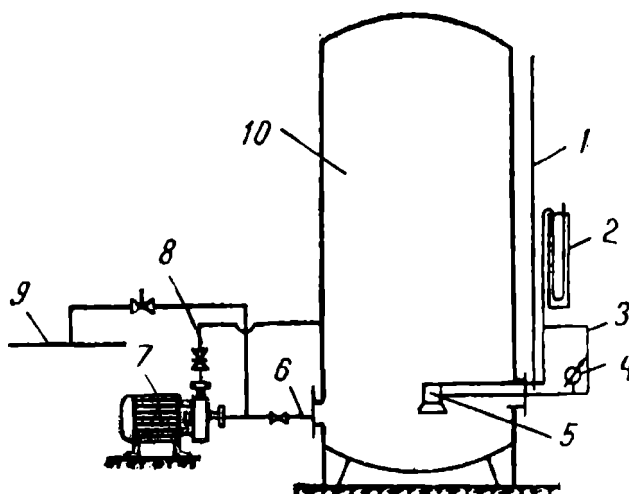


Рис. 3.18. Схема экспериментальной установки:
1 - труба для подачи воздуха; 2 - ротаметр; 3 - подача воды; 4 - манометр; 5 - ПГА; 6 - всасывающая линия; 7 - насос; 8 - напорная линия; 9 - трубопровод; 10 - резервуар

щей на растворимость газов в воде; коэффициента эжекции, который в свою очередь зависит от конструктивных особенностей ПГА и скорости движения жидкости в выходном сечении сопла и степени дисперсности газовой фазы.

Исследования по аэрированности жидкости ПГА проводят в следующей последовательности. Вначале измеряют объем жидкости в резервуаре до аэрированности по градуировочной шкале, затем включают ПГА и дают ему поработать в течение 5-10 мин для установления равновесного режима. После этого измеряют объем смеси в баке (W_1), используя ту же градуировочную шкалу, и рассчитывают аэрированность жидкости.

Проводят опыты с использованием планирования эксперимента с целью получения экспериментально-статистической модели процесса.

Расход воздуха, увлекаемого ПГА, измеряется расходомером, изображенным на рис. 3.19. Расходомер представляет собой наклонно расположенную стеклянную трубу, внутри которой размещен шар. При движении воздуха шар перемещается по трубе под воздействием скоростного напора, причем отклонение шара пропорционально расходу газа.

Отсчет осуществляется по шкале. При движении газа давление до шара будет $P_1 \approx P_0$, после - P_2 . Перепад ΔP обусловлен наличием местного сопротивления (шара).

$$\Delta P = P_1 - P_2 = P_0 - P_2,$$

где P_0 - давление на поверхности; P_1 - давление перед шаром; P_2 - давление после шара.

Для приведения расхода газа к нормальным условиям следует ввести

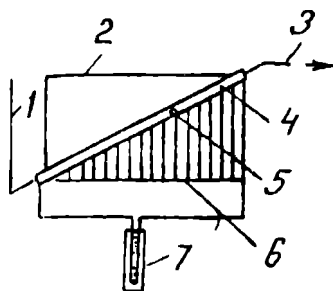


Рис. 3.19. Расходомер газа:
1 - входная труба; 2 - щит;
3 - воздушная труба; 4 - про-
зрачная наклонная труба; 5 -
шар; 6 - пьезометры

поправку

$$Q_2 = \frac{P_o}{P_o - \Delta P} \cdot Q_1,$$

где Q_1 - расход, измеренный расходомером;
 Q_2 - расход воздуха через ПГА.

Величина ΔP измеряется с помощью пьезометра.

Расход выделяющегося газа определяют с помощью непосредственных измерений.

Установка представляет собой перевернутый цилиндр с градуировочной шкалой, соединенный эластичным шлангом с пьезометром. Перед измерением цилиндр устанавливают над точкой, где необходимо выполнить измерение количества выделяющегося газа. Открыв кран, выпускают сжатый воздух. Затем переходный кран ставят в положение, при котором цилиндр соединяется с пьезометром. Включив секундомер, измеряют объем воздуха (W) в цилиндре за время (Δt). С помощью пьезометра определяют избыточное давление в цилиндре ΔP , тогда объем газа, приведенный к нормальному давлению на поверхности, составит

$$W_n = \frac{W (P_o + \Delta P)}{P_o},$$

откуда расход воздуха с площади f_u составит:

$$Q_a^n = \frac{W_n}{\Delta t}.$$

Удельный расход воздуха (расход с единицы площади аппарата) рассчитывают по зависимости

$$q_a^n = \frac{Q_a^n}{f_u} = \frac{4 \cdot Q_a^n}{\pi d_u^2},$$

где d_u - диаметр цилиндра, мм.

Измерение расхода выделяющегося газа необходимо выполнять после установления равновесия ($\frac{\Delta W}{\Delta t} = \text{const}$).

Размер пузырьков воздуха зависит от ряда причин и колеблется в некотором интервале, т.е. образуется полидисперсная система газ-вода. Наиболее полно такие системы характеризуются интегральной и дифференциальной кривыми распределения и эквивалентным диаметром пузырька. Размеры пузырьков определяют киносъемкой через стекло с

нанесенной шкалой. Результаты подсчета и классификации пузырьков заносятся в табл. 3.3.

Процентное содержание фракции определяют по отношению числа пузырьков данной фракции к суммарному числу пузырьков

$$Q = \frac{N_i}{\sum N_i} \cdot 100\%.$$

Таблица 3.3

Данные для построения интегральной кривой распределения пузырьков по радиусам

Радиус пузырька, мм	Количество пузырьков данной фракции, N	Процентное содержание фракции, Q, %	Нарастающее суммарное содержание пузырьков, $Q_0 + Q_1 + \dots + Q_n$, %
---------------------	--	-------------------------------------	---

По данным табл. 3.3 строят интегральную кривую распределения, для чего разбивают ось абсцисс через равные интервалы радиусов, которые выбирают произвольно и восстанавливают ординаты до пересечения с интегральной кривой. Из графика определяют приращение процентного содержания (ΔQ_i) при увеличении радиуса пузырька (Δr). Полученные данные записывают в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Данные для построения дифференциальной кривой распределения

r, мм	Δr , мм	ΔQ_i , %	$\Delta Q_i / \Delta r$
-------	-----------------	------------------	-------------------------

По данным табл. 3.4 строят дифференциальную кривую распределения (рис. 3.20) и определяют эквивалентный радиус, соответствующий радиусу пузырьков, которых в данной системе наибольшее количество.

Эффективность работы флотационного аппарата в значительной степени зависит от равномерности распределения газовой фазы по площади емкости. Поскольку ПГА устанавливается в центре, то равномерность распределения пузырьков представляет практический интерес. Исследования предполагается выполнять, используя методику измерения расхода газа, выделяющегося на элементарных площадях 1, 2, ..., i, i + 1.

Полученные результаты позволяют построить эпюры распределения газа по площади аппарата и выявить основные параметры работы ПГА, обеспечивающие равномерное распределение пузырьков воздуха в объеме обрабатываемой жидкости.

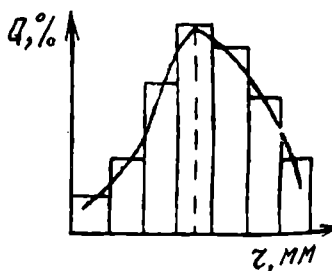


Рис. 3.20. Дифференциальная кривая распределения пузырьков

3.5. ПАТЕНТНЫЕ РАЗРАБОТКИ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ И ПНЕВМОГИДРАВЛИЧЕСКИХ АЭРАТОРОВ

В ФРГ разработаны конструкции аэраторов с поверхностными струями (рис. 3.21, а, б), состоящие из камеры 1, пеноприемника 2, патрубков 3 и 4 для подачи пульпы и воздуха, отбойной плиты 5 для интенсификации диспергирования воздуха. В конструкции, приведенной на рис. 3.21, в (патент ФРГ 3008476), дробление струи пульпы, выходящей под давлением из патрубка 1, происходит при ее ударе об отбойник 3. Воздух подается через патрубок 2.

Хорошие результаты, полученные при флотации в аппаратах с поверхностными струями, свидетельствуют о перспективности использования этого принципа аэрации. Крупность образующихся при ударе пузырьков зависит от давления газожидкостной смеси и скорости ее подачи. При флотации тонких частиц, как известно, следует насыщать пульпу мелкими пузырьками, интенсивность минерализации которых велика, и обеспечить поток более крупных пузырьков, выполняющих транспортные функции.

Условия коалесцентной флотации созданы во флотационной машине (рис. 3.22) с двойной аэрацией (а.с. 1101305 СССР), запатентованной в США. При ударе водовоздушной струи, поступающей из патрубка 7, опреграду 6 пузырьки, движущиеся под давлением 203 кПа со скоростью 30 м/с, дробятся до 20-500 мкм, а при ударе пульповоздушной смеси, поступающей из патрубка 5 под давлением 100 кПа со скоростью 5-7 м/с, - до 1 мм. Суммарное газосодержание в камере 1 достигает 40%. В зоне аэрации 4 осуществляется интенсивное перемешивание пульпы. Концентрат удаляется в пеносорбник 2, а хвосты - в шибберный карман 3.

Для проведения глубинной аэрации жидкостную струю, инжектиру-

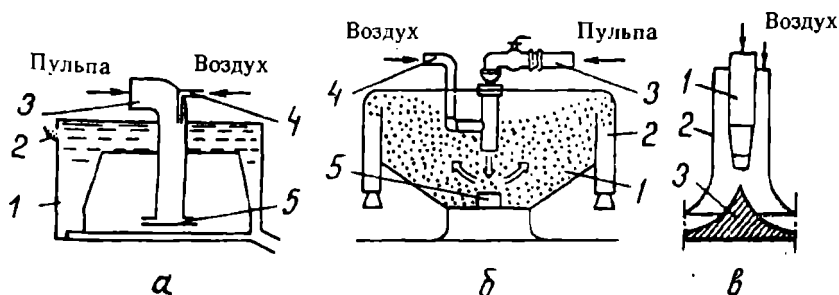


Рис. 3.21. Аппараты с поверхностными струями

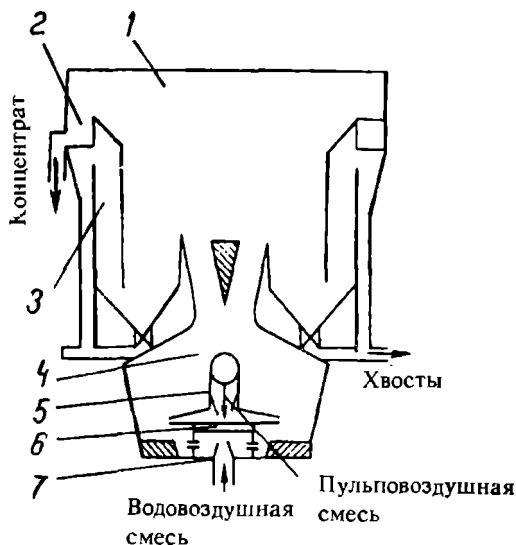


Рис. 3.22. Флотомашина с пневмогидравлическим аэратором

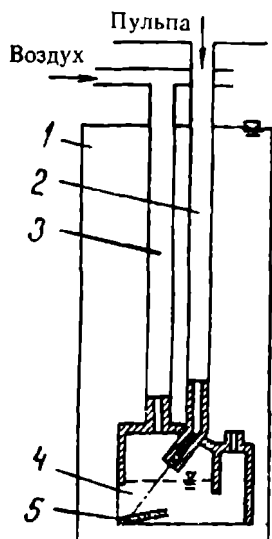


Рис. 3.23. Флотомашина со струйным аэратором

ющую окружающий воздух, помещают в воздушный колокол, опускаемый в придонную часть флотационной машины (а.с. 1117085, 1108078 СССР). Флотационная машина, представленная на рис. 3.23, состоит из камеры флотации 1, патрубков 2 и 3 для подачи пульпы и воздуха и камеры аэрации 4 с отбойной плитой 5.

Работа струйного аэратора пневмогидравлического типа (а.с. 1180074 СССР) 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 (патенты Франции 2313127, 2354820, патенты США 3865909, 3756578, 3653641, 3797809). Применение струйных аэраторов - перспективное направление совершенствования конструкций флотомашин.

С целью повышения степени аэрации предложено устройство, обеспечивающее вращательное движение в противоположных направлениях конической струи пульпы и жидкости в объеме (а.с. 1260026 СССР).

Одно из направлений разработки гидравлических аэраторов связано с созданием новых конструкций вихревых камер, в которых разрежение

обусловлено вращательным движением жидкости (пульпы).

Пневмогидравлические циклонные аэраторы представляют собой центробежные форсунки, в которых распыление воздуха, подаваемого под давлением 15 кПа, происходит под воздействием вихревых потоков жидкости, выталкивающейся из циклона в виде веера. В качестве жидкости в аэраторе (рис. 3.24, *а*) используется пульпа, подаваемая под давлением до 200 кПа (а.с. 724210 СССР). Он напоминает по форме гидроциклон, в который вместо сливного отверстия вставлен патрубок для подачи реагентно-воздушной смеси. В состав аэратора входят патрубок 1 для тангенциальной подачи питания, труба 2 для подачи реагентно-воздушной смеси, патрубок 3, распределитель 4, разгрузочные патрубки 5, сопло 6 и корпус 7. Предложено также подавать воздух непосредственно в рабочее пространство лопастного насоса, перекачивающего пульпу во флотационную машину обычной конструкции. Аэрацию в

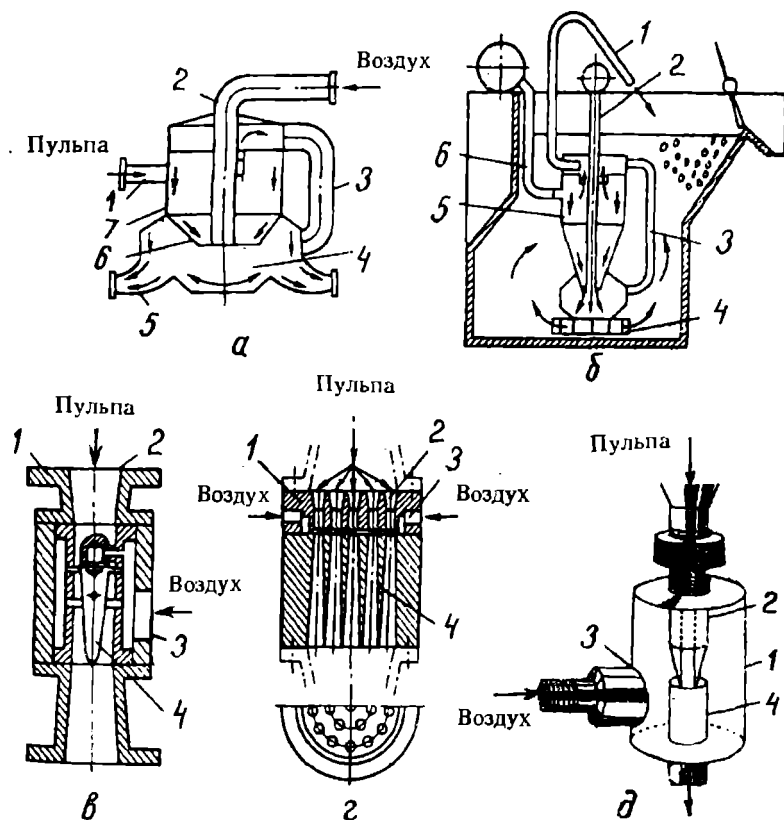


Рис. 3.24. Аэраторы циклонного (*а, б*) и эжекторного (*в, г, д*) типов

вихревой камере осуществляют и во флотационных машинах, запатентованных в СССР (а.с. 1005920), США (патент 3645892) и Югославии (патент 37474).

Японскими исследователями проведены многочисленные эксперименты с аэратором циклонного типа, в который принудительно одновременно подавали жидкую и газовую фазы (режим пневмогидравлической аэрации). Из результатов исследований следует, что степень аэрации при постоянном давлении воздуха быстро возрастает с увеличением расхода пульпы.

Австралийской фирмой "Зинк Корпорейшн" циклонный аэратор используется в машине "Давкра" (см.рис. 1.12), успешно применяемой на зарубежных обогатительных фабриках (патент США 3446353). Благодаря более эффективному диспергированию воздуха в машине можно значительно повысить ее удельную производительность по сравнению с пневмомеханическими флотационными машинами без ухудшения технологических показателей. Аэратор, обеспечивающий эффективную аэрацию плотных пульп (до 60% твердого), расположен непосредственно у места ввода пульповоздушной смеси в нижнюю часть камеры. В него поступают пульпа под давлением и поток сжатого воздуха. Для повышения равномерности аэрации напротив места ввода в камеру установлена отражательная перегородка.

Особенность циклонного аэратора, установленного во флотационной машине "Хейлпат-Миллер" (см.рис. 1.13, б), заключается в подаче дополнительного воздуха в кольцевой зазор в стенке конической части циклона через специальный патрубок и в установке конической перфорированной насадки, вызывающей дополнительное дробление пузырьков. Аэратор имеет следующие параметры: диаметр цилиндрической части 30 см, высота 20 см, диаметры входного патрубка и нижнего (выходного) отверстия 10 см, высота конической части 15 см, угол конусности насадки 140° , диаметр насадки в нижней части 90 см, давление пульпы 70-220 кПа, давление воздуха 15 кПа. Давление подаваемой в аэраторы пульпы целесообразно увеличивать по мере перемещения от первой камеры к последней, поскольку средняя флотируемость убывает от камеры к камере. Для обеспечения эффективного обогащения необходимо увеличивать газосодержание вдоль фронта флотации.

На рис. 3.24, б представлена конструкция комбинированного пневмогидравлического аэратора (а.с. 1175563 СССР), сочетающего в себе элементы аэраторов струйного и вихревого типов. Аэратор состоит из корпуса 5 цилиндрикоконической формы, тангенциально подведенного патрубка 6 для подачи исходного питания, патрубка 3 для слива, распределителя пульпы 4, патрубка 2 для ввода реагентно-воздушной смеси и

дополнительного патрубка 1 для слива. Аэратор работает следующим образом. Исходная пульпа по патрубку 6 под давлением поступает в аэратор, в нижней части которого встречается с реагентно-воздушной смесью, и через распределитель пульпы попадает в камеру флотационной машины.

В Японии для водоочистки применяют флотационную машину, в которой последовательно установлены аэратор циклонного типа, аэро-лифт для интенсификации минерализации пузырьков и камера разделения.

В нашей стране и за рубежом разработано множество конструкций эжекторов и аэраторов типа сопло Вентури (а.с. 1212588 СССР; а.с. 228250 ЧССР; патент США 4406782, патенты ФРГ 3211906, 2366107, 3101221, 3529638). В этих устройствах поступающая от насоса по напорному трубопроводу под давлением около 200 кПа пульпа подается в суженное сечение (сопло) аэратора, за которым при высоких скоростях движения возникает зона пониженного давления. Вследствие разрежения по другому трубопроводу инжектируется атмосферный воздух, который интенсивно диспергируется в диффузоре.

Для создания условий коалесцентной флотации целесообразно использовать машины, в которых установлены аэраторы эжекторного и пневматического типов (а.с. 472692 СССР). Технологические опыты подтвердили высокую эффективность таких устройств. Для дополнительной диспергации воздуха в пульпопроводе предусматриваются сужение потока, введение сопла и т.п. (европ. патент 90234).

В ФРГ в течение 5 лет успешно эксплуатируются флотационные машины большого объема (до 45 м³) для обогащения угля, в которых используют щелевые аэраторы эжекторного типа (см. рис. 3.24, а, з, д), состоящие из камеры 1, отверстий для подачи пульпы 2 и воздуха 3 и диспергаторов пульповоздушной смеси 4. Аэраторы проработали около 20 тыс. ч при содержании твердого в питании до 6% без значительного износа.

К недостаткам аэраторов с инъекцией воздуха из атмосферы относят малый срок службы вследствие быстрой забивки эжекторов минеральными частицами при флотации плотных пульп. Этому недостатка лишены пневмогидравлические аэраторы, так как подача сжатого воздуха исключает необходимость установки сопла малого диаметра. Интенсивную аэрацию обеспечивает вихрешесмесительная система "ЕМJA", созданная в США. В этой системе сжатый воздух и жидкость подают в сопла diam. 28 мм (при таком диаметре их забивка маловероятна), расположенные по окружности цилиндрической камеры перпендикулярно к ее поверхности. В камере, где организуется восходящее движение пульпо-

воздушной смеси, происходит интенсивное дробление пузырьков и перемешивание. Применяют такие устройства, в которых сжатый воздух или реагентно-воздушную смесь под давлением подают непосредственно в питающий флотационную машину пульпопровод или патрубок (через сопла или форсунки), а диспергацию осуществляют турбулентным потоком в трубе (а.с. 1119736 СССР, патент ФРГ 2700049, патенты США 3758080, 3446353, 3947359, 4450072).

В последние годы получили распространение пневматические флото-машины с аэраторами решетчатого газораспределения, заимствованные из смежных отраслей. В зависимости от конструктивных особенностей различают несколько типов газораспределительных устройств: пористые, перфорированные, колпачковые, колосниковые, трубчатые и другие. Наиболее простыми, а потому и наиболее распространенными, являются перфорированные решетки.

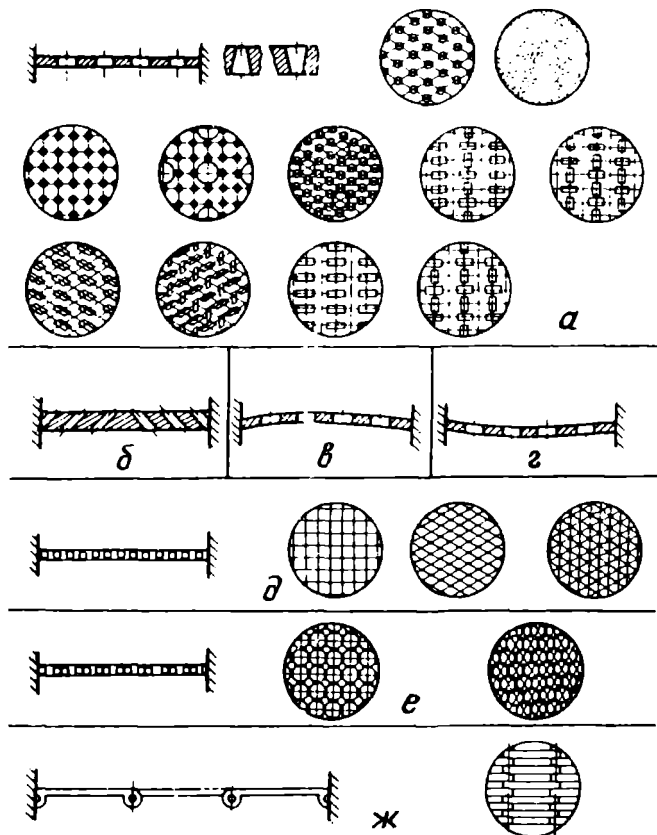
Простейшая однослойная перфорированная решетка (рис. 3.25, а) имеет отверстия самой разнообразной формы - круглые, овальные, квадратные, треугольные, щелевые, сужающиеся или расширяющиеся в направлении движения газа и образующие каналы различного профиля (а.с. 77693, 280775 СССР, патенты ФРГ 94503, США 2608474). Разбивка отверстий по площади решетки осуществляется либо по углам треугольника (чаще всего равностороннего), либо по углам прямоугольника (чаще всего квадрата). В решетке со щелевыми отверстиями при указанных схемах разбивки возможны различные варианты ориентации щелей друг относительно друга.

Оси отверстий могут располагаться вертикально или под некоторым углом (рис. 3.25, б) к плоскости листа. Встречается и комбинированное расположение отверстий. Решетки с вертикальной ориентацией отверстий технологичны, просты в изготовлении, поэтому нашли широкое применение в технике псевдосжижения и флотации. Отверстия на решетке могут размещаться равномерно или с переменным шагом. На одной решетке возможны разнообразные сочетания отверстий различных размеров и форм в целях сохранения постоянного живого сечения либо создания зон с большим или меньшим свободным сечением.

Однослойные перфорированные решетки выполняют плоскими (см. рис. 3.25, а, б), выпуклыми (рис. 3.25, в, а.с. 128001 СССР), вогнутыми (рис. 3.25, г, патент США 2630962). Они могут быть выполнены из разнообразных сеток (рис. 3.25, д) и наборных колец (рис. 3.25, е, патент США 2048246), а также из звеньев и пластин (рис. 3.25, ж, а.с. 19744 СССР) самой разнообразной конфигурации с образованием отверстий любой формы.

Общим и существенным недостатком простых перфорированных решеток является возможность образования застойных зон твердого мате-

Рис. 3.25. Кон-
струкции перфори-
рованных решеток



риала между отверстиями и провала частиц через отверстия, что приводит к забиванию их при малых скоростях оживающего агента. Для ликвидации застойных зон применяются пульсаторы.

Указанные недостатки устраняют различными путями. Простейший способ предотвращения провала - применение многослойных (чаще всего двух- и трехслойных) газораспределительных решеток (рис. 3.26). При этом слои решеток располагают с учетом угла естественного откоса обрабатываемого материала так, чтобы проходящий сквозь первый слой решетки материал не попадал в отверстия второго слоя. Чаще всего во избежание провала основную газораспределительную решетку покрывают слоем мелкоячеистой сетки. Однако это решение не очень удачно, так как сетка, обращенная к слою, подвержена эрозионному воздействию, приводящему к ее износу, и быстро забивается.

Решетки могут быть выполнены с некоторой степенью подвижности (рис. 3.26, д, е, ж). В нерабочем состоянии отверстия в них закрыты или достаточно малы, чтобы исключить провал частиц. При подаче ожива-

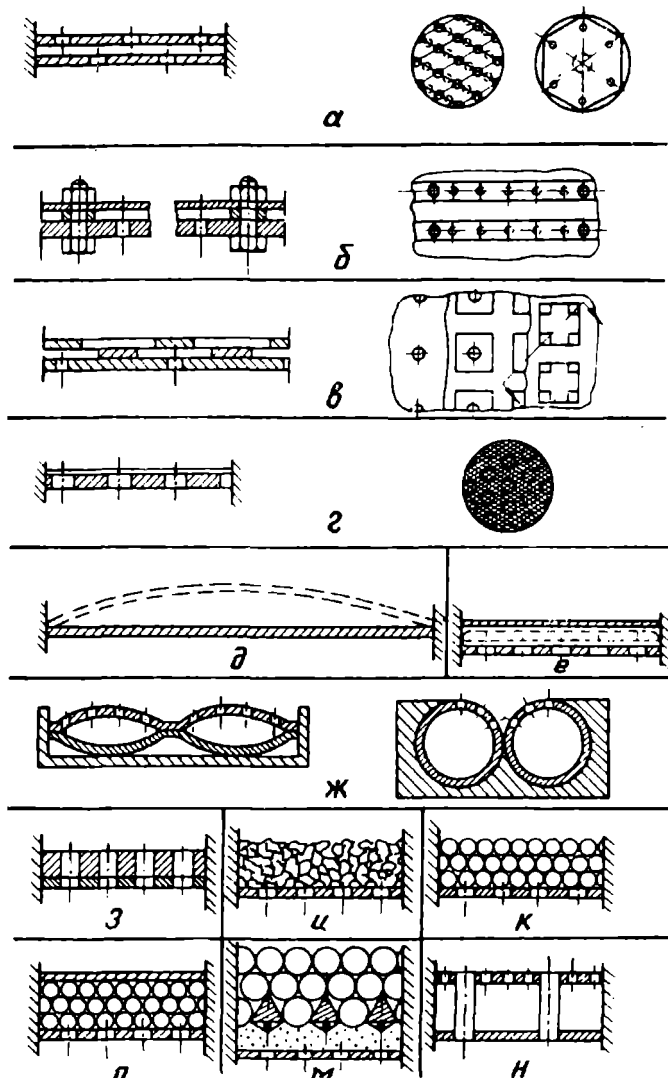


Рис. 3.26. Многослойные перфорированные решетки:

а - а.с. 283546 СССР, патент Англии 1070251; б - а.с. 139615 СССР; в - патент ФРГ 1442600; г - патент Англии 1094771; д - а.с. 197444 СССР; е - а.с. 85035 СССР; ж - патент Швеции 503641; з, и - патент Англии 1119250; к - а.с. 196723 СССР; л - патент США 3514868; м - а.с. 199105 СССР; н - а.с. 223778 СССР

ющего агента такие решетки растягиваются и выгибаются в направлении движения газового потока, и отверстия открываются. Такие решетки могут быть наборными из элементов различной конфигурации либо цельными, но из упругого материала, например, из резины или эластичной сетки. Прием многослойности широко используют и в других целях.

Распространены решетки с удлиненными газораспределительными трубками (рис. 3.26, з, н), а также с укладкой твердых тел шарообразной и других форм (рис. 3.26, и, к, л, м).

Анализ проведенного патентно-информационного поиска и обобщение практики применения нового поколения аэраторов позволяют заключить, что основными факторами, формирующими развитие флотационной технологии в перспективе, являются:

более жесткие требования к комплексному использованию минерального сырья и качеству очистки сточных вод в связи с возрастающими требованиями к охране и рациональному использованию водных и природных ресурсов в условиях выхода промышленного и гражданского строительства на качественно новый уровень;

необходимость экономного расходования топливно-энергетических ресурсов, внедрение энергосберегающих технологий и аппаратов с высокоэффективными аэрационными устройствами (аэраторами);

усовершенствование существующих и освоение новых видов технологического оборудования с пневмогидравлическими и гидравлическими струйными аэраторами;

развитие приборов и средств измерения, регулирования, автоматизации управления процессами во флотационных пневматических машинах и аппаратах для очистки сточных вод;

усиление требований к компактности технологического оборудования из-за дефицита площадей при одновременном снижении его материалоемкости.

С учетом изложенного возможны два принципиально различных направления развития аэрационной технологии и устройств, диспергирующих воздух:

1. Аэрационные системы станут значительно более эффективными, мало металло- и энергоемкими, конструктивно простыми; предпочтение получают такие методы, как аэрация техническим кислородом, аэрация под давлением, аэрация на большой глубине, противоточная и другие процессы;

2. Развитие пойдет по пути увеличения производительности, технологической гибкости, управляемости и надежности традиционных систем аэрации на базе конструктивного совершенствования, постепенного улучшения качества материалов, флотационного оборудования, условий применения и методов эксплуатации.

С момента возникновения технология аэрации во флотационных машинах чанового типа и для очистки сточных вод носит эволюционный характер. Значительные потенциальные возможности повышения экономичности нового поколения аэраторов могут быть раскрыты в результате разработки и широкого внедрения управляемых процессов флотации минерального сырья и очистки сточных вод, когда затраты

электроэнергии на аэрацию регулируются в соответствии с изменениями нагрузки как по объему, так и по органическим загрязнениям.

Качественно новым крупным направлением технологии аэрации сточных вод является использование технического кислорода. Целесообразность использования чистого кислорода или воздуха, обогащенного кислородом, там, где кислород является побочным или сбросным продуктом промышленной технологии, не вызывает сомнений. Однако такие случаи пока немногочисленны, чтобы оказать решающее влияние на современную технологию аэрации. Сохранит ли метод биохимической очистки сточных вод активным илом свое универсальное значение в условиях конкуренции с физико-химическим методом, будут ли преодолены серьезные технико-экономические ограничения для широкого использования технического кислорода в процессах очистки производственных вод, покажет время.

Несомненно другое - современные системы аэрации и в обозримом будущем должны находить широкое применение с учетом достижений научно-технического прогресса.

ГЛАВА 4. ОСНОВЫ ГИДРОДИНАМИКИ БАРБОТАЖА ВО ФЛОТАЦИОННЫХ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ МАШИНАХ ЧАНОВОГО (КОЛОННОГО) ТИПА

4.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

За последние 30 лет опубликовано более сотни работ, посвященные экспериментальным исследованиям двух- и трехфазных барботажей колонн в химической технологии. В них приводятся различные, зачастую и противоречащие друг другу, качественные и количественные закономерности, что объясняется как неточностью методов исследования, так и разнообразием изучавшихся условий (расходы и физические свойства фаз, а также размеры камер колонн и способы аэрации).

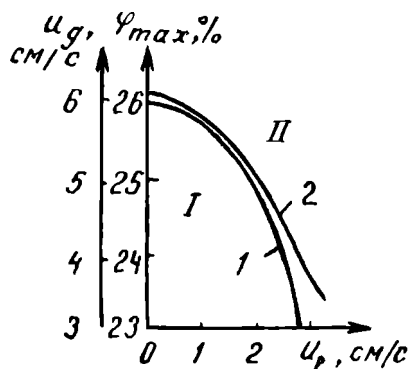
В зависимости от соотношения расходов фаз в аппаратах рассматриваемого типа могут наблюдаться качественно различные режимы течения. При увеличении расхода газа последовательно реализуются условия существования следующих режимов: пузырькового, пробкового или снарядного (массовая коалесценция пузырей и образование воздушной пробки по всему сечению колонны), кольцевого (раздельное течение

жидкой фазы вдоль стенок, а газа - в осевой части аппарата), эмульсионного (инверсия фаз и образование эмульсии из капель в газовой среде). Возможны и переходные режимы и течения. При флотации в чановых (колонных) машинах к гидродинамике процесса предъявляют следующие требования: максимальная площадь пузырьков и минимальное перемешивание фаз. Этим требованиям в наибольшей степени удовлетворяют пузырьковый и эмульсионный режимы.

Условия перехода барботажной структуры в пробковую зависят от многих факторов. Основным параметром, влияющим на структуру потоков, является приведенная скорость подачи газа. Для пузырьков сферической формы граница существования гомогенного барботажного слоя определяется условием $v_g/u_b \approx 0,186$ (u_b - скорость подъема одиночного пузырька). Согласно другим данным, критическая приведенная скорость газа зависит от расхода жидкости $v_g = (v_l + u_b)/3$ (положительные значения v_l соответствуют прямотоку). Последнее соотношение хорошо согласуется с экспериментальными данными (рис. 4.1). При увеличении подачи газа выше предельного значения наблюдаются интенсивная коалесценция пузырьков и переход к пробковому режиму (для камер малого диаметра) или образованию крупных (так называемых тейлоровских) пузырьков, усилению макроциркуляции жидкости и наступлению гетерогенного режима. Наибольший размер камеры, в которой еще возможно образование пробок, определяется соотношением $0,35\sqrt{gd_c} = 1,53 \sqrt{g\sigma/\rho_l}$, т.е. для системы вода-воздух он составляет 5-10 см. Образованию пробки или тейлоровского пузырька способствует массовая коалесценция, поэтому создание условий, замедляющих этот процесс, может обеспечить существование барботажного слоя при расходах фаз, превышающих критические значения. Если число Бонда

Рис. 4.1. Зависимости газосодержания φ_{\max} (1) и приведенной скорости воздуха u_g (2) от приведенной скорости пульпы u_l в противоточном колонном аппарате с площадью сечения 25 см^2 :

I - область барботажного режима; II - область поршневого режима



пузырька $Bo = g(\rho_l - \rho_g)d_b^2/\sigma$ не превышает 0,4, то вероятность перехода к пробковому или гетерогенному режиму мала. Границы существования пузырькового режима зависят также от химического состава жидкой фазы и меняются при переходе к трехфазным системам. Приведенные граничные параметры барботажного режима (см. рис. 4.1) являются естественными пределами изменения гидродинамических характеристик флотации в колонной машине, выход за которые обуславливает резкое нарушение процесса.

4.2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДВИЖЕНИЯ ОДИНОЧНЫХ ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ В ЖИДКОСТИ

В отличие от истечения веществ в жидкости, способных к полному молекулярному перемешиванию, при истечении воздуха в жидкости возникают поверхности контакта фаз и образуется динамический двухфазный слой. Проникновение одной фазы в другую в виде элементарных струек, пузырьков и капель происходит довольно быстро, но молекулярное перемешивание или истинное растворение одной фазы в другой происходит медленно и обычно осуществляется не полностью. Скорость растворения газа в жидкости (например, кислорода в воде) зависит от многих факторов, в том числе гидродинамических, часть которых рассматривается на примере единичного (элементарного) акта барботаж. Приводимые далее зависимости при соответствующем численном определении констант справедливы для различных стабильных газовых сред, включая воздух и технический кислород, а также воздух, обогащенный техническим кислородом.

Образование воздушного пузырька. При малых скоростях истечения воздух поступает из отверстия (сопла) в виде последовательно отрывающихся пузырьков. Если пренебречь влиянием конвективных потоков, вязкости жидкости и гидравлического сопротивления среды в момент образования и роста воздушного пузырька, баланс сил в момент его отрыва выразится равенством сил Архимеда и поверхностного натяжения:

$$(\pi d_o^3/6)(\gamma_2 - \gamma_1) = \pi d_1 \varphi_o \sigma, \quad (1)$$

где d_o - диаметр воздушного пузырька в момент отрыва; γ_2 и γ_1 - удельный вес соответственно жидкости и воздуха; d_1 - диаметр отверстия (сопла); φ_o - коэффициент сужения диаметра шейки пузырька перед началом его отрыва; σ - коэффициент поверхностного натяжения.

Как следует из равенства (1), сила Лапласа, удерживающая пузырек воздуха на кромке отверстия, пропорциональна коэффициенту поверхностного натяжения и периметру отверстия. При этом

$$d_o = \sqrt[3]{6d_1 \varphi_o \sigma / (\gamma_2 - \gamma_1)}, \quad (2)$$

или в безразмерной форме

$$d_o/d_1 \approx 1,82 \sqrt[3]{\varphi_o \sigma / [(\gamma_2 - \gamma_1) d_1^2]}. \quad (3)$$

Таким образом, в соответствии с формулами (2) и (3) диаметр воздушного пузырька в период отрыва при прочих равных условиях в первую очередь зависит от диаметра отверстия истечения. Однако, как показали исследования, при больших скоростях подачи воздуха пузырек формируется не непосредственно на отверстии, а на конце вытянутой струи. В момент отрыва наблюдается отчетливый скачок скорости перемещения хвостовой зоны пузырька относительно скорости перемещения его лобовой зоны, обусловленный силовым эффектом замыкания пузырька поверхностью контакта фаз. При этом пузырек принимает характерное пулевидное очертание, которое затем быстро переходит в стабильную сферическую форму.

Геометрия воздушного пузырька и скорость его подъема. Скорость подъема пузырьков воздуха и жидкости находится в непосредственной связи с их размерами и формой. С уменьшением размеров пузырьков, пронизывающих жидкостный слой, их сферическая форма становится более устойчивой. С увеличением размеров пузырьков их форма все более отклоняется от шаровой, наблюдаются динамическое их сплющивание в направлении движения и возникновение грибовидных пузырьков с волнистыми краями и вогнутостью в хвостовой зоне (рис. 4.2). Точные теоретические выводы могут быть справедливы только для относительно небольших пузырьков стабильной сферической формы.

Всплывание сферического пузырька воздуха в большом объеме жидкости является результатом преодоления силы гидравлического сопротивления окружающей среды подъемной силой Архимеда, обусловленной разностью плотностей газа и жидкости. Условие равновесия этих сил имеет вид:

$$\gamma_2 \psi [v_1^2 / (2g)] S_1 = (\gamma_2 - \gamma_1) V, \quad (4)$$

где ψ - коэффициент и цент гидравлического сопротивления;
 v_1 - скорость подъема (всплывания) воздушного пузырька;
 S - площадь

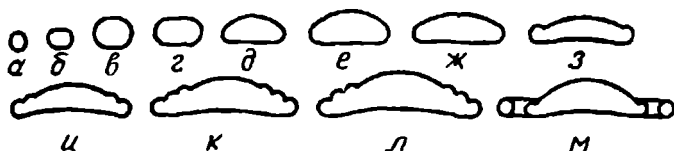


Рис. 4.2. Форма воздушных пузырьков различного объема, см³:
а - 0,01; б - 0,095; в - 0,15; г - 0,28; д - 0,5; е - 1; ж - 1,43; з - 2,5;
и - 4; к - 13,3; л - 20; м - более 20

ние свободного падения; S_1 - площадь поперечного сечения пузырька; V - объем воздушного пузырька.

Решая равенство (4) относительно v_1 и принимая, что для пузырька сферической формы $S_1 = \pi d^2/4$, а $V = \pi d^3/6$, где d - диаметр воздушного пузырька, получим

$$v_1 = \sqrt{[4g/(3\psi)](1 - \gamma_1/\gamma_2)d}. \quad (5)$$

Если принять, что $v/S_1 = \delta$, где δ - характерный линейный размер воздушного пузырька любой формы, выражение (5) можно записать в следующем виде:

$$v_1 = \sqrt{(2g/\psi)\delta(1 - \gamma_1/\gamma_2)}. \quad (6)$$

Простота этой зависимости является следствием допущений, принятых при составлении баланса сил (формула (1)). В действительности механизм истечения воздуха из отверстия даже при умеренных скоростях, когда на отверстии формируются отдельные пузырьки, значительно сложнее. Так, при повышенной плотности и вязкости жидкости в области течения Стокса может быть существенной роль гидравлического сопротивления, что вызывает увеличение диаметра пузырька в момент отрыва.

При увеличении напора воздуха перед отверстием, следовательно, и его расхода через отверстие происходит стабилизация частоты образования.

Как видно из формулы (5) Стокса, скорость движения пузырьков возрастает с увеличением их диаметра. Однако формула Стокса дает удовлетворительную сходимость с опытными данными только в узком интервале значений d (рис. 4.3). Это объясняется изменением формы воздушных пузырьков с увеличением их диаметра, что уменьшает скорость их движения. Сила поверхностного натяжения стремится придать



Рис. 4.3. Зависимость скорости всплытия воздушных пузырьков в воде от их размеров:

I - ламинарная область течения, пузырьки сферической формы, траектория их всплытия прямолинейна; *II* - переходная область течения, пузырьки эллипсоидальной формы, траектория их всплытия зигзагообразна; *III* - турбулентная область течения, пузырьки грибовидной формы, траектория их всплытия отклоняется от прямолинейной в зависимости от степени деформации сферической формы.

пузырьку шарообразную форму, которая вследствие неравномерности давления по поверхности делается нестабильной. Чем меньше пузырек, тем больше сила поверхностного натяжения и тем устойчивее его форма, поэтому пузырьки малого размера практически шарообразны. Влияние же силы поверхностного натяжения на форму крупных пузырьков мало по сравнению с динамическим воздействием жидкостной среды, и пузырек приобретает неустойчивую форму. Неустойчивость формы крупного пузырька приводит к изменениям скорости и нарушениям вертикальной траектории его всплывания (рис. 4.4).

Как показывает опыт, характер движения одиночного пузырька воздуха в жидкости весьма сложен: траектория его всплывания имеет вид сплюсненной (эллиптической) спирали с тенденцией к увеличению среднего диаметра ее витка по мере подъема пузырька. Разница в скоростях движения жидкости и воздушных пузырьков вызывает коалесценцию мелких и диспергирование крупных пузырьков воздуха. При этом необходимо отметить, что объем пузырька воздуха за время его подъема не остается постоянным в результате диффузии кислорода в жидкость, с одной стороны, и уменьшения гидростатического давления на него по мере его подъема - с другой. Маккоуэн и Окун методом масштабного фотографирования установили, что после перемещения пузырька на $2/3$ высоты колонны площадь его поверхности увеличивается на 20%.

Элементарность формулы (6) кажущаяся, так как ψ является функцией целого ряда факторов в соответствии со следующими выражениями:

$$\psi = f(Re), Re = f_1(Ar),$$

где Re - критерий Рейнольдса, равный $v_1 d / \nu_2$ (ν_2 - кинематическая вязкость жид-

кости); Ar - критерий Архимеда, равный $(g \delta^3 / \nu_2^2) (1 - \gamma_1 / \gamma_2)$.

Согласно фундаментальным законам гидравлического сопротивления, для подъема пузырьков воздуха в неограниченном объеме жидкости характерны следующие режимы движения:

режим Стокса, когда воздушный пузырек сохраняет шаровую форму

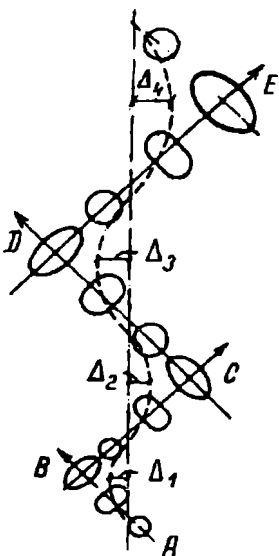


Рис. 4.4. Характер движения одиночного пузырька в жидкости:

A, B, C, D, E - точки траектории, соответствующие максимальной деформации пузырька; $AB < BC < CD < DE$; $\Delta_1 < \Delta_2 < \Delta_3 < \Delta_4$

и у поверхности контакта фаз ведет себя как твердое тело; $Re < 2$
 $\psi \sim Re^{-1}$; $Re \sim Ar$;

$$v_1 \sim (g \delta^3 / \nu_2) (1 - \gamma_1 / \gamma_2); \quad (7)$$

режим Адамара-Рыбчинского, или ламинарного пограничного слоя, когда пузырек воздуха укрупнен, но еще сохраняет стабильную форму: шара или слабосплющенного сфероида; при этом в отличие от режима Стокса наблюдается свободное движение поверхности контакта фаз;

$$\begin{aligned} &< R < 500, \psi \sim Re^{-1/2}, Re \sim Ar^{2/3}; \\ &v_1 \sim \delta^3 \sqrt{(g / \nu_2^2) (1 - \gamma_1 / \gamma_2)}; \end{aligned} \quad (8)$$

режим Тейлора, или квадратичного сопротивления, когда происходит движение крупных грибообразных пузырьков, форма которых не стабильна:

$$\begin{aligned} &Re > 500, \psi \sim Re \rightarrow 1, Re \sim Ar^{1/2}; \\ &v_1 \sim \sqrt{g \delta (1 - \gamma_1 / \gamma_2)}. \end{aligned} \quad (9)$$

В действительности между режимами (формулы (7) и (9) могут существовать переходные формы, отличные от формулы (8), так как даже для твердой сферы зависимость ψ (Re) очень сложна.

Д.А. Франк-Каменецкий* показал, что относительная скорость движения сплющенного сфероида не зависит от его размера. Это хорошо согласуется с данными, приведенными на рис. 4.3.

Для области чисел $Re \approx 50 \dots 80$ теоретическое решение для скорости подъема воздушного пузырька получено В.Г. Левичем**.

Необходимо отметить, что при $Re > 2$ подвижность поверхности контакта фаз приводит к режиму, отличному от обтекания твердой сферы, так как точка отрыва оказывается смещенной ближе к хвостовой зоне пузырька, что в свою очередь уменьшает гидравлическое сопротивление его движению.

Воздушный пузырек в вертикальном потоке жидкости. Из многочисленных вариантов столкновения воздушного пузырька и набегающего потока жидкости рассмотрим два наиболее характерных: векторы относительного движения газовой и жидкостной сред совпадают (прямой режим) и векторы относительного движения сред противоположны (противоточный режим). Следует отметить, что этот вопрос

* Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Изд-во АН СССР, 1967. 491 с.

** Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. М.: Физматгиз, 1959. 699 с.

практически не получил освещения в литературе.

В момент отрыва пузырька от отверстия аэратора на него действуют подъемная сила Архимеда F_1 , сила поверхностного натяжения F_2 и гидродинамического давления F_3 . Условие равновесия записывается следующим образом:

$$F_1 = F_2 + F_3,$$

или

$$(\pi d_o^3/6) (\gamma_2 - \gamma_1) = \pi d_1 \varphi_o \sigma \pm \gamma_2 \psi [v_2^2/(2g)] S_1, \quad (10)$$

где v_2 - скорость движения жидкости, причем знак "плюс" относится к прямооточному, а знак "минус" - к противоточному режиму движения.

Преобразуя выражение (10) с учетом того, что $S_1 = \pi d_o^2/4$, получим уравнение кубической параболы вида:

$$d_o^3 \pm d_o^2 \frac{3\psi v_2^2 \gamma_2}{4g(\gamma_2 - \gamma_1)} - \frac{6 d_1 \varphi_o \sigma}{\gamma_2 - \gamma_1} = 0. \quad (11)$$

Приближенное решение уравнения резольвенты (11) с использованием формулы Кардано дает возможность определять диаметр пузырька в момент отрыва как дискретный элемент двухфазной среды при прямооточном и противоточном режимах движения:

$$d_o \approx \sqrt{\frac{6 d_1 \varphi_o \sigma}{\gamma_2 - \gamma_1}} \pm v_2^2 \frac{\psi \gamma_2}{4g(\gamma_2 - \gamma_1)}. \quad (12)$$

Второй член в правой части равенства (12), характеризующий динамическое воздействие потока на пузырек воздуха, при $v_2 \rightarrow 0$ стремится к нулю и равенство (12) приближается к выражению (2). Наоборот, при увеличении v_2 значение второго члена в правой части равенства (12) резко возрастает, что означает, например, при противоточном режиме образования пузырьков заметное увеличение их размеров - явление для технологии, безусловно, нежелательное.

Рассмотрим движение воздушного пузырька в прямооточной колонне высотой h . Равновесие силы гидродинамического сопротивления и подъемной силы записывается следующим образом:

$$\gamma_2 \psi [v^2/(2g)] \pi d^2/4 = (\pi d^3/6) (\gamma_2 - \gamma_1), \quad (13)$$

где v - скорость подъема воздушного пузырька ("минус" - для противоточка, "плюс" - для прямотока).

После преобразования получим

$$v = \sqrt{(4g/3\psi)(1 - \gamma_1/\gamma_2)d} \pm v_2. \quad (14)$$

Среднее время пребывания воздушного пузырька в прямооточной колонне будет равно

$$t = h / [\sqrt{(4g/3\psi)(1 - \gamma_1/\gamma_2)d} \pm v_2]. \quad (15)$$

Если при противоточном режиме $v_1 \approx v_2$, то знаменатель формулы (15) обращается в нуль, а значение t стремится к бесконечности. Наобо-

рот, при проточном режиме возрастание v_2 вызывает увеличение формулы (15), т.е. сокращение времени пребывания воздушного пузырька в аэрационной колонне. Таким образом, укрупнение воздушного пузырька в момент его отрыва от отверстия аэратора при противоточном режиме компенсируется увеличением времени газожидкостного контакта в средней части аэрационной колонны.

Влияние конечных размеров сосуда. Рассматривая такой режим насыщения, когда число пузырьков достаточно велико (т.е. пузырьки всплывают не в свободном объеме), но не настолько, чтобы они взаимодействовали друг с другом, а также принимая их форму и размеры стабильными, можно наметить расчетную схему, представленную на рис. 4.5. В соответствии с моделью, предложенной В.В.Померанцевым и С.Н.Сыркиным, сферический пузырек при своем движении вверх в круглой заполненной жидкостью трубе освобождает пространство, равное $(\pi d^2/4) dx$, которое заполняется втекающей в нее жидкостью в соответствии с равенством:

$$(\pi d^2/4) dx = -v_2 \pi [(d_1^2 - d^2)/4] dt, \quad (16)$$

где v_2 - скорость движения жидкости в кольцевом пространстве между пузырьком и стенками трубы; d_1 - диаметр трубы.

С учетом того, что абсолютная скорость всплывания пузырька относительно стенок сосуда $v_1 = dx/dt$, получим

$$v_1 = v_2 [1 - (d/d_1)^2]. \quad (17)$$

Тогда относительная скорость

$$v = v_1 - v_2 = v_1 / [1 - (d/d_1)^2], \quad (18)$$

откуда

$$v_1 = v_{1(\infty)} [1 - (d/d_1)^2], \quad (19)$$

где $v_{1(\infty)}$ - скорость всплывания пузырька в неограниченном объеме жидкости ($d_1 \gg d$).

Как следует из формулы (19), диаметр сосуда оказывает значительное влияние на скорость подъема воздушных пузырьков. Так, при $d = d_1$ скорость $v_1 = 0$; при уменьшении относительного диаметра воздушного пузырька, когда $d/d_1 \rightarrow 0$, то $v_1 \rightarrow v_{1(\infty)}$. При $d > d_1$ размеры и форма воздушных пузырьков зависят от диаметра сосуда. В последнем случае при возрастании газосодержания потока пузырьки приобретают вытянутую форму, приближающуюся к форме сосуда. Так как приведенные формулы описывают уменьшение скорости всплывания пу-

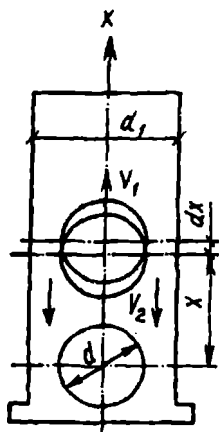


Рис. 4.5. Расчетная схема к задаче о влиянии конечных размеров сосуда на характер движения газового пузырька

зырька из-за перетекания невязкой жидкостной среды, т.е. учитывают минимальное влияние стенок сосуда, большинство экспериментальных наблюдений показывает более сильное влияние сосуда, чем формула (19). Особенно ощутима погрешность при $d \approx d_1$, так как в этом случае будет оказывать влияние шероховатость стенок сосуда, не учтенная при разработке расчетной схемы. Тем не менее эта зависимость благодаря своей простоте находит применение в инженерных расчетах.

Дробление и коалесценция пузырьков воздуха. Среди элементарных процессов, совокупность которых определяет эффективность и производительность аэрационных систем, значительную роль играют процессы дробления и коалесценции, если под термином "коалесценция" понимать процесс укрупнения пузырьков воздуха путем слияния более мелких. Пузырьки, образующиеся при истечении воздуха из отверстий или сопел, в процессе своего движения в слое жидкости подвергаются различным воздействиям. Наблюдаются столкновения пузырьков воздуха со стенками и перегородками, с лопастями механических и пневмомеханических аэраторов, а также соударения самих пузырьков в результате движения жидкости. Кроме того, соударения пузырьков воздуха при ламинарном режиме движения происходят вследствие разницы в скоростях их подъема в слое жидкости. Прогнозировать результат соударений пузырьков воздуха довольно трудно, так как в зависимости от целого ряда факторов возможны коалесценция (укрупнение) пузырьков воздуха, дробление их, механическое столкновение двух движущихся пузырьков без изменения их первоначальных объемов, а также различные комбинации этих трех случаев.

Рассмотрим наиболее простой случай дробления крупного пузырька воздуха, находящегося под воздействием турбулентных пульсаций, возникающих в результате наложения сил Архимеда и Лапласа (поверхностных). Еще Харкинс и Браун в 1919 г. отмечали, что при дроблении газовых пузырьков в потоке жидкости образуются неравновеликие "осколки". Наряду с образованием главного пузырька происходит образование одного или нескольких сателлитных пузырьков. Теоретическое обоснование этого явления было дано значительно позднее Л.Я.Кремневым и А.А.Равделем*, показавшими, что крупный пузырек готов к дроблению, когда он вписывается в цилиндр, длина которого превышает периметр основания. При выполнении этого условия площадь суммар-

* Кремнев Л.Я., Равдель А.А. О механизме эмульгирования. Коллоидный журн. 1954. Т. XVI. N 1. С. 17-25.

ной поверхности пузырьков-осколков всегда меньше площади исходного пузырька, что и определяет вероятность дробления, сопровождающегося уменьшением энергии поверхностного натяжения. Такой простой и одновременно изящный механизм дробления дополняется строгим геометрическим правилом: площадь суммарной поверхности пузырьков разной величины всегда меньше площади поверхности пузырьков равной величины, образовавшихся в обоих случаях из одного и того же крупного пузырька. В связи с этим деформация сжатия или растяжения крупного пузырька в турбулентном потоке должна заканчиваться его дроблением на пузырьки неравных размеров, так как разнообъемность их энергетически менее выгодна. Для пузырька эллипсоидной формы, растянутого по длинной оси, $a/b > 1$, где a и b - соответственно большая и малая полуоси. Пусть эллипсоид объемом $V_0 = (4/3)\pi (a/b) b^3$ и площадью поверхности $S_0 = 4\pi (a/b) b^2$ распадается на два сферических пузырька объемами V_1 и V , радиусами r_1 и r , площадями S_1 и S . При $r_1 = nr$, где n - произвольная постоянная, можно записать:

$$(S_1 + S)/S_0 = r^2(n^2 + 1)/[(a/b) b^2] = r^2(n^2 + 1)/(ab). \quad (20)$$

Поскольку $V_0 = V_1 + V$, получим $(4/3)\pi ab^2 = (4/3)\pi r^3(n^3 + 1)$ или

$$r^2 = a^{2/3} b^{4/3} / (n^3 + 1)^{2/3}. \quad (21)$$

Подставив выражение (21) в формулу (20) для исключения r^2 , получим в окончательном виде:

$$(S_1 + S)/S_0 = [(n^2 + 1)/(n^3 + 1)](a/b)^{-1/3}. \quad (22)$$

Анализируя выражение (22), легко видеть, что отношение $(n^2 + 1)/(n^3 + 1) \rightarrow 1$ при $n \rightarrow 0$ и $n \rightarrow \infty$, имея экстремум, равный 1,26, при $n = 1$. Таким образом, дробление исходного эллипсоида на два сферических пузырька равных размеров при $a/b = 1$ энергетически невозможно. Изложенное наглядно демонстрируется графиком на рис. 4.6, подтверждающим относительную независимость формы пузырьков-осколков от формы исходного пузырька. Вместе с тем график показывает, что по мере увеличения деформации исходного пузырька-сфероида энергетическая обусловленность его дробления возрастает. Полученные результаты неплохо согласуются с экспериментальными данными. Однако прогнозировать полную картину дробления крупных воздушных пузырьков с помощью данного метода, а также на основании имеющихся в настоящее время других методов ввиду недостаточной изученности вопроса пока не представляется возможным.

Коалесценция пузырьков происходит вследствие турбулентной и ортокинетической коагуляций, причем последняя является результатом столкновений пузырьков разных размеров,двигающихся с различными

скоростями. Б.И.Броунштейн и А.С.Железняк в своей монографии* приводят теоретическое описание процесса коалесценции в предположении, что каждое соударение воздушных пузырьков заканчивается слиянием. Однако, как показывает опыт, это предположение справедливо далеко не всегда. В связи с тем, что неслияние газовых пузырьков чаще наблюдается при наличии процесса массопередачи, П.С.Прохоровым и В.Н.Яшиным, а затем А.Смитом с сотрудниками была выдвинута градиентная теория неслияния пузырьков, объясняющая повышение давления в водяном зазоре между пузырьками возникновением на их поверхности градиентов межфазного натяжения. Имеются, однако, экспериментальные данные, которые не укладываются в рамки чисто механической теории неслияния газовых пузырьков. Окончательные причины неслияния пузырьков при их близком к соударению взаимном расположении еще не выяснены.

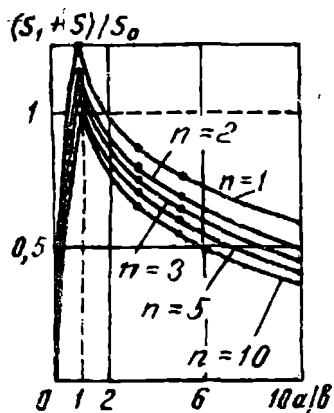


Рис. 4.6. Взаимосвязь энергетических и геометрических параметров в процессе дробления воздушного пузырька эллипсоидальной формы на более мелкие

Выход воздушных пузырьков на поверхность жидкости. Визуально выход пузырька на поверхность жидкости и момент его разрушения воспринимаются как мгновенное и одностадийное явление. Скоростная киносъемка позволяет разделить это явление на ряд стадий (рис. 4.7, а). Так, при выходе пузырька на поверхность жидкости поднятая им жидкостная пленка стекает с образовавшегося купола. Затем вершина купола — место концентрации поверхностных напряжений — разрывается и возникающие неуравновешенные силы стремительно расширяют отверстие. В момент разрыва оболочка в верхней части купола имеет малую толщину, а вблизи его основания значительно большую, в связи с чем разрушение оболочки может сопровождаться появлением на ее поверхности ряда разрывов с отделением от массы жидкости частей пленки, свертывающихся в отдельные капли (Кутателадзе, Стырикович, 1976). При отсутствии примесей в жидкости пленочная поверхность втягива-

* Броунштейн Б.И., Железняк А.С. Физико-химические основы жидкостной экстракции. М.; Л.: Химия, 1966. 318 с.

ется в основную массу жидкости и углубление на поверхности быстро заполняется жидкостью, устремленной к его центру. Образующаяся кольцевая волна, смыкаясь, выплескивает вверх столбик жидкости, от которого отделяются одна или несколько капель.

Однако при барботаже воздуха через слой жидкости, содержащей специфические примеси, наблюдается иная картина. Так, если примеси замедляют сток жидкости с купола пузырька при достижении пленкой малой толщины, последняя практически перестает истончаться (рис. 4.7, б) и стекание жидкости происходит из ее нижних слоев. В момент разрыва пленка достигает очень малой толщины и "осколки" ее образуют очень мелкие капли.

Разумеется, сказанное справедливо только при разрушении единичных пузырьков, так как в случае массового барботажа возникает взаимодействие между соседними разрушающимися пузырьками. Это взаимодействие при наличии в жидкости поверхностно-активных веществ, либо крупных молекул белкового происхождения или коллоидных частиц, обладающих высокой вязкостью, усиленное как интерференцией образующихся волн, так и разрывом пленок соседних пузырьков, может приводить к образованию и накоплению весьма устойчивой поверхностной пены.

Скорости движения пузырьков во флотационных пневматических чановых (колонных) машинах обычно значительно превышают скорость потока пульпы, поэтому основные гидродинамические, а следовательно, и флотационные характеристики определяются расходом воздуха и способом его диспергирования. Расход пульпы влияет в основном на время пребывания частиц в машине.

Одним из важнейших параметров, влияющих на показатели обогащения, является дисперсный состав газовой фазы. По мере всплывания пузырьков различной крупности и перемешивания наблюдаются коалесценция и дробление пузырьков, кинетика которых определяется как гидродинамическими, так и физико-химическими условиями. При безграничном увеличении высоты колонны распределение пузырьков по

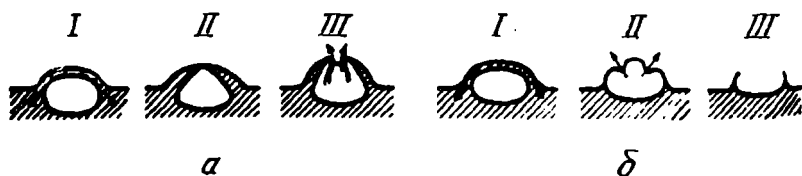


Рис. 4.7. Последовательные стадии I-III разрыва газового пузырька на поверхности жидкости:

а - не содержащей загрязнений; б - содержащей загрязнения, увеличивающие структурную вязкость

размерам в верхней ее части будет стремиться к равновесному. Математическое ожидание этого распределения (средний размер пузырька вдали от диспергирующего устройства) не зависит от параметров аэратора и определяется из условия минимума потенциальной энергии:

$$d_b = \xi u_b^2 / (4g),$$

где ξ - коэффициент гидродинамического сопротивления пузырька, зависящий от приведенной скорости воздуха v_g . Скорость достижения энергетически равновесного дисперсного состава пузырьков зависит от условий аэрации, концентрации ПАВ и твердой фазы. В соответствии с экспериментальными исследованиями последнее уравнение адекватно описывает средний размер пузырька вдали от аэратора, который для системы вода-воздух при отсутствии примесей составляет 3-6 мм. При вычислении размера пузырька по этой формуле следует учесть, что входящие в правую часть коэффициент сопротивления и скорость подъема зависят от d_b , поэтому для решения уравнения следует использовать один из численных итерационных методов. Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о влиянии на средний равновесный размер пузырька газосодержания. Аппроксимационные формулы для d_b (мм) имеют вид

$$d_b = 4,15 \sigma_{\rho_l}^{0,6} g^{-0,4} \varphi^{0,5} \cdot 10^3 + 0,9; \quad d_s = (0,59/g) (v_g/\varphi)^2.$$

Распределение пузырьков по размерам определяется структурой барботажного слоя. При псевдогомогенной структуре, характерной для небольших расходов газа (для системы вода-воздух $v_g \sim 3-5$ см/с), дисперсный состав пузырьков описывается логарифмически нормальным или гамма-распределениями, а плотность этих распределений соответственно функциями

$$f(d_b) = \left[1 / (\sqrt{2\pi} \ln \sigma_d) \right] \exp [-(\ln d_b - \ln \bar{d}_b)^2 / (2(\ln \sigma_d)^2)] \quad \text{и} \\ f(d_b) = \omega^{\xi-1} d_b^3 \exp(-\omega d_b) [\Gamma(\xi + 1)]^{-1},$$

где \bar{d}_b - средний размер пузырька; σ_d^2 - дисперсия распределения по размерам;

$$\Gamma(\omega) = \int_0^\infty x^{\omega-1} \exp(-x) dx; \quad \omega = d_b/\sigma_d^2; \quad \xi = (d_b^2/\sigma_d^2) - 1.$$

При увеличении приведенной скорости газа существенное влияние на крупность пузырьков оказывает коалесценция, обуславливающая образование крупных пузырьков и возрастание пульсационной скорости жидкости и газа в колонне даже при весьма малом начальном размере пузырьков (аэрация через пористые диски с диаметром пор $d_o = 25-75$ мкм). При гетерогенной структуре барботажного слоя поток газа можно разделить на две части - транспортный (крупные пузырьки) и увлекаемый (мелкие пузырьки). Такое биомодальное распределение пузырьков по размерам может интенсифицировать процесс флотации,

обеспечивая так называемый коалесцентный механизм процесса, когда мелкие частицы захватываются пузырьками малого размера и затем выносятся вместе с потоком, увлекаемым крупными пузырьками в пену, либо вместе с мелкими пузырьками налипают на пузырьки транспортного потока. Флотация в гетерогенном режиме характеризуется интенсивным перемешиванием и механическим выносом частиц в концентрат. При увеличении v_g от 6 до 10 см/с газосодержание φ изменяется незначительно и составляет для мелких пузырьков около 14%, а для крупных - около 6%. При дальнейшем увеличении расхода газа основная часть его переносится крупными пузырьками. При моделировании флотации в высокослойных колонных аппаратах следует учитывать увеличение объема пузырька по мере подъема вследствие снижения гидростатического давления, поскольку

$$(\rho_c gz + P_{am} + 4\sigma/d_b) d_b^3 = const,$$

где ρ_c - плотность газожидкостной смеси.

Скорость подъема одиночного пузырька зависит от его размера и свойств фаз. Критериями подобия рассматриваемой задачи являются числа Рейнольдса и Вебера.

Поверхность пузырьков весьма малых размеров обычно практически полностью заторможена уже в присутствии ничтожных следов ПАВ, поэтому их движение можно рассматривать как движение твердых сферических частиц малой плотности ρ_g и рассчитывать скорость подъема по формуле Стокса:

$$u_{b\infty} = d_b^2 g (\rho_l - \rho_g) / (18\mu).$$

При малых концентрациях ПАВ и невысокой вязкости среды эта формула адекватна для пузырьков размером менее 100 мкм. С увеличением крупности пузырька значительно возрастает влияние на его скорость скольжения и деформируемости поверхности. Для относительно крупных пузырьков размером 1-12 мм в системе вода-воздух характерна слабая зависимость скорости свободного подъема от эквивалентного радиуса $u_{b\infty} = K (\sigma_g (\rho_l - \rho_g) / \rho_l^2)^{1/4}$, где $K = 1,4-1,8$ - эмпирический коэффициент, учитывающий размер пузырька.

Для пузырьков промежуточных размеров (0,1-1,0 мм) предложено большое число аналитических и эмпирических формул, в соответствии с которыми на скорость пузырька, помимо размера, влияют концентрация ПАВ (рис. 4.8). Для расчета скорости подъема одиночного пузырька чаще используют эмпирическое соотношение Г.Уоллиса. Расчет скорости начинается с вычисления безразмерных параметров:

$$P = \sigma^3 \rho_l / (g \mu^4); \quad r = (d_b/2) (\rho_l^2 g / \mu^2)^{1/3}; \quad B = g d_b^2 \rho_l / (4\sigma).$$

Формулы справедливы в интервале $10^2 < P < 10^{10}$. Затем вычисляют

безразмерную скорость u в зависимости от значений безразмерных параметров: при $\sqrt{B} \geq 4$ $u = \sqrt{r}$, при $1 < B < 4$ $u = \sqrt{2P^{1/12}}$. При $B < 1$ и $r < 1,5$ скорость зависит от степени заторможенности поверхности. При отсутствии ПАВ $u = r^{2/3}$, а при значительной их концентрации $u = 2r^{2/9}$. При $B < 1$ и $r > 1,5$ и отсутствии ПАВ u равно наименьшему из следующих значений: $0,408 r^{3/2}$ и $(2/r)^{1/2} P^{1/6}$, при заторможенной поверхности - наименьшему из значений $1,41 P^{1/12}$ и $0,307 r^{1,21}$. Заключительным этапом расчета является определение скорости подъема одиночного пузырька по формуле $u_b \propto u (\mu g / \rho_l)^{1/3}$.

Следует иметь в виду, что вследствие разности скоростей подъема мелких и крупных пузырьков их дисперсный состав на входе в аппарат не совпадает с распределением размеров, усредненным по его объему и при отсутствии коалесценции. В этом случае средний размер пузырька в пульпе меньше его среднего начального размера вследствие меньшего времени пребывания в аппарате более крупных пузырьков.

Объемное газосодержание в колонной машине влияет не только на дисперсный состав пузырьков, но и на скорость и селективность процесса. Оно зависит от расходов фаз и крупности пузырьков. Для описания этой зависимости рассмотрим процесс барботаж в непроточной по жидкой фазе колонне в приближении монодисперсных пузырьков и однородного поля скоростей фаз. В этом случае доля сечения колонны, занятого газом, равна объемному газосодержанию φ , а скорость подъема пузырьков относительно аппарата или слоя неподвижной жидкости - $u_0 = v_g / \varphi$. Слой поднимающихся пузырьков вытесняет некоторый объем жидкой фазы, который перемещается вниз, поэтому скорость относительного движения пузырька и обтекающей его жидкости (скорость скольжения фаз) u_s не равна u_0 . Скорость жидкости, обтекающей пузырек, определяется из условия постоянства объема барботажного слоя по мере всплывания пузырьков: $u_{j0} = u_0 \varphi / (1 - \varphi)$. Скорость скольжения фаз можно определить по формуле

$$u_s = u_0 + u_{j0} = v_g / [\varphi(1 - \varphi)] = u_0 / (1 - \varphi).$$

Если расход жидкой фазы в колонне не равен нулю, то в указанных допущениях относительные скорости движения фаз будут выражаться

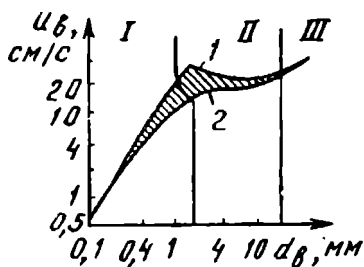


Рис. 4.8. Зависимость подъема одиночных пузырьков от их размеров: I, II, III - зоны, соответствующие пузырькам сферической, эллиптической и снарядообразной формы:

1 - в чистой воде; 2 - при высокой концентрации ПАВ (заштрихована область промежуточных режимов)

через скорость, определенную для непроточного режима, и скорость движения жидкости в сечении площадью $\pi d_c^2 (1 - \varphi)/4$:

$$u_0 = v_g / \varphi \pm v_l / (1 - \varphi);$$

$$u_s = v_g / [\varphi(1 - \varphi)] \pm v_l / (1 - \varphi).$$

Следует отметить, что величина u_s определяет только среднюю вертикальную проекцию скорости скольжения фаз без учета стохастической составляющей, зависящей от интенсивности перемешивания. Зависимость скорости подъема совокупности пузырьков в неподвижной жидкости от газосодержания выражается формулой, аналогичной известному выражению для скорости стесненного осаждения частиц

$$u_0 = u_{b\infty} (1 - \varphi)^{n-1},$$

где значение коэффициента n зависит от числа Рейнольдса для пузырька и колеблется, по данным разных исследователей, в пределах 1,5-2 для гомогенного барботажного режима. Из формул, приведенных в данном разделе, можно вывести соотношение для расчета газосодержания в указанных допущениях по известным расходам фаз и дисперсности газа:

$$v_g(1 - \varphi) \pm v_l \varphi = u_{b\infty} \varphi (1 - \varphi)^n.$$

Последнее уравнение может быть решено итерационными методами или графически. Следует учесть, что средний размер пузырька d_b , определяющий скорость его подъема u_b , зависит от расхода воздуха. Кроме того, полученное уравнение неприменимо в случае гетерогенного режима, при интенсивном перемешивании и большой дисперсии гранулометрического состава пузырьков.

Графический метод определения газосодержания заключается в следующем. На диаграмму (рис. 4.9) наносят кривую зависимости плотности потока дрейфа $j = u_{b\infty} \varphi (1 - \varphi)^n$ от газосодержания φ с учетом зависимостей $u_{b\infty}(d_b)$ и $d_b(\varphi)$.

Для определения газосодержания φ на оси ординат следует отложить значение приведенной скорости газа v_g , а на оси v_l , соответствующей прямой $\varphi = 1$, - приведенной скорости жидкости v_l причем $v_l > 0$ соответствует нисходящему потоку жидкости (противоток). По абсциссе точки пересечения прямой, соединяющей построенные точки с кривой плотности потока дрейфа $j(\varphi)$, определяют значение газосодержания φ , соответствующего заданным расходам фаз. Из диаграммы, приведенной на рис. 4.9, видно, что при противотоке газа и жидкости в зависимости от соотношения их расходов может существовать один устойчивый режим (точка а на прямой 2) при $\varphi = \varphi_2$, два устойчивых режима (точки б и в на прямой 3) при $\varphi = \varphi_2$ и $\varphi = \varphi_3$, либо барботажной структуры вообще не образуется (нет пересечения с прямой 1). При восходящем движении

жидкости (прямая 4) всегда существует единственное решение уравнения, соответствующее точке z при $\varphi = \varphi_4$. Реализация того или иного устойчивого режима при противотоке зависит от равномерности аэрации по сечению колонны и во времени, а также от вязкости жидкости и ее поверхностного натяжения. При флотации обычно реализуется режим с меньшим значением $\varphi = \varphi_3$. Режим с большим значением $\varphi = \varphi'_3$ наблюдается в зоне очистки колонных флотационных машин, что обуславливает высокую селективность флотации в машинах указанного типа. Поток при таком режиме напоминает пенный слой, однако описывается другими соотношениями. Как следует из кривой плотности потока дрейфа (см. рис. 4.9),

такая структура может возникнуть только при противотоке фаз, т.е. при подаче промывной воды под пену. Увеличение приведенных скоростей воздуха и промывной воды снижает газосодержание, в то же время при повышении расхода воды глубина зоны высокого газосодержания быстро возрастает. При $v_l > 0,5$ см/с нарушается однородность потока, образуются циркуляционные токи, т.е. происходит переход к барботажному режиму с малым φ . Этим объясняется отсутствие квазипенной структуры в зоне минерализации колонных флотомашин. Дж. Йанатос с соавторами разделяет зону очистки по высоте на две части: нижнюю ($\varphi < 0,74$), в которой пузырьки не касаются друг друга, и верхнюю плотной упаковки пузырьков ($\varphi > 0,74$). Вторичная концентрация минералов происходит в основном в нижней части зоны очистки вследствие резкого торможения пузырьков. Осыпание частиц из зоны, находящейся выше точки подачи промывной воды, незначительно. Вследствие коалесценции пузырьков в зоне очистки суммарная площадь поверхности пузырьков в нижней части зоны в 2 раза больше, чем в верхней, что обуславливает осыпание более гидрофильных частиц и улучшение качества концентрата.

Для определения интенсивности дренажа в зоне очистки используется положение теории движения жидкостей в каналах. Для оценки приведенной скорости рециркуляционного движения жидкости из зоны очистки в зону минерализации получено выражение

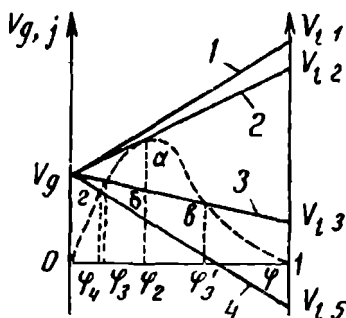


Рис. 4.9. Диаграмма для оценки газосодержания φ при различных режимах работы колонного аппарата с использованием кривой плотности потока дрейфа (штриховая линия):

1-3 - режим противотока; 4 - режим прямотока

$$v_l = (1 - \varphi)^3 d_b^2 \rho_l g A^{-1} [1 - \varphi + (v_w - v_c)/(v_c + v_g - v_w)],$$

где φ - газосодержание на нижней границе зоны очистки;
 $A = 72 \varphi^2 \mu [1 - 0,5 \ln(1 - \varphi)]$; v_w - приведенная скорость промывной воды; $v_c = Q_c / (\pi d_c^2)$; Q_c - объемный поток в концентрат. Значение v_l можно найти и из условия баланса воды в зоне очистки. Приравнявая выражения для v_l , можно вывести зависимость среднего размера пузырька в нижней части зоны очистки d_b от газосодержания φ . Следует отметить, что при моделировании зоны очистки в отличие от полиэдрической пены необходимо учитывать неполное увеличение жидкости всплывающими пузырьками. Следовательно, соотношение для вычисления скорости выноса воды $v_l = v_g (1 - \varphi) / \varphi$ не выполняется.

Для определения максимально допустимого расхода газа, при котором наступает "захлебывание" потока, следует провести на точки с координатами $(1; v_l)$ касательную к кривой плотности потока дрейфа и продолжить ее до пересечения с осью ординат. Расстояние от точки касания до оси газосодержания равно критической приведенной скорости газа.

Пр и м е р. Оценим при помощи модели потока дрейфа газосодержание в колонной флотационной машине диаметром $d_c = 80$ см. Аэрация осуществляется через перфорированные трубки с отверстиями диам. 0,2 мм. Рабочее давление в воздухопроводе обеспечивает расход воздуха $Q_g = 45$ м³/ч, производительность по пульпе равна $Q_l = 27$ м³/ч. Начальный диаметр пузырька оценим по формуле $d_o = [6\sigma u_o / (g \rho_l)]^{1/3}$; при $\sigma = 6 \cdot 10^{-2}$ Н/см и $d_o = 0,1$ мм $d_b = 1,9$ мм. Адсорбция ПАВ на поверхности пузырьков препятствует их коалесценции, поэтому, пренебрегая увеличением объема пузырька вследствие падения гидростатического давления по мере подъема, можно считать, что средний размер пузырька составляет 1,9 мм. Для мелких пузырьков показатель степени n в формуле потока дрейфа, по данным многих исследований, находится в пределах 1,5-2,0. Примем $n = 2$. Скорость подъема одиночного пузырька диам. 1,9 мм в соответствии с рис. 4.8 составляет 18-28 см/с в зависимости от степени заторможенности поверхности. В первом приближении можно допустить, что при $d_o \geq 1$ мм скорость подъема одиночного пузырька слабо зависит от его размера. Будем вычислять ее по формуле $u_{b\infty} = 1,53 (g \sigma / \rho_l^2)^{1/4}$, тогда при $\rho_l = 1$ г/см³ $u_{b\infty} = 23,8$ см/с.

Кривая плотности потока дрейфа для данных условий $j = 23,8\varphi(1 - \varphi)^2$ представлена на рис. 4.10 штриховой линией. Вычислим приведенные скорости потоков пульпы и воздуха:

$$v_l = 4Q_l / (\pi d_c^2) = 2,5 \text{ см/с};$$

$$v_g = 4Q_g / (\pi d_c^2) = 1,6 \text{ см/с}.$$

Отметим отсутствующие точки на осях (точки а и б). Значения газосодержания определяются как абсциссы точек пересечения прямой ab с кривой плотности потока дрейфа. Точка $г$ соответствует пенной структуре, точка $в$ - пузырьковому режиму. Следовательно, в данном случае газосодержание φ близко к 0,14.

При помощи той же диаграммы можно решить практически важную обратную задачу - определить необходимый расход воздуха. Предположим, что в колонной флотационной машине достигнуты оптимальные показатели при $\varphi = 0,2$. Параметры колонны те же. Требуется определить расход воздуха, обеспечивающий оптимальное разделение. Для этого отметим на кривой плотности потока дрейфа точку d , соответствующую $\varphi = 0,2$.

проведем прямую bd . Пересечение этой прямой с осью v_g (точка e) определяет необходимое значение приведенной скорости воздуха $v_g = 3,4$ см/с, что соответствует $Q_g = 33$ м³/ч.

Следует учесть, что допущения, приведенные выше, выполняются с определенной точностью, поэтому полученные данные могут быть использованы лишь для оценки параметров.

На основе этой методики можно получить аналитические формулы для приведенных критических скоростей жидкой и газовой фаз, соответствующих определенному газосодержанию φ :

$$v_l = (1 - n \varphi) u_b (1 - \varphi)^n;$$

$$v_g = \varphi^2 u_b n (1 - \varphi)^{n-1}.$$

Анализ модели потока дрейфа показывает, что при заданной скорости потока пульпы v_l с уменьшением размера пузырька резко падает критическая скорость потока воздуха v_g и соответствующее ей газосодержание φ . Так, при $v_l = 1$ см/с в противоточном режиме значению $d_b = 1,3$ мм соответствует критическая скорость воздуха $v_g = 1,45$ см/с, а значению $d_b = 0,4$ мм - $v_g = 0,27$ см/с.

Если скорость коллективного подъема пузырьков зависит только от газосодержания, то приведенные скорости, обеспечивающие равное газосодержание, связаны линейной зависимостью. Это значит, что при увеличении скорости потока пульпы в k раз для сохранения прежнего газосодержания φ необходимо уменьшить расход воздуха в $k \varphi / (1 - \varphi)$ раз при противоточном режиме или увеличить его во столько же раз в случае прямотока. Очевидно, что результаты флотации при этом существенно изменятся.

Установка флотационных или барботажных колонн под небольшим наклоном повышает неравномерность аэрации, снижает газосодержание $(\varphi \sim 1 - C_1 \alpha)$ и интенсифицирует перемешивание $[D \sim (1 + C_2 \alpha d_c)^2]$. Здесь α - угол отклонения оси колонны от вертикали; C_1, C_2 - постоянные.

Поскольку при изменении расхода воздуха одновременно с газосодержанием изменяются и средний размер пузырька, и скорость его подъема, формула для коллективного подъема пузырьков требует уточнения. При значительных колебаниях степени аэрации следует применять ап-

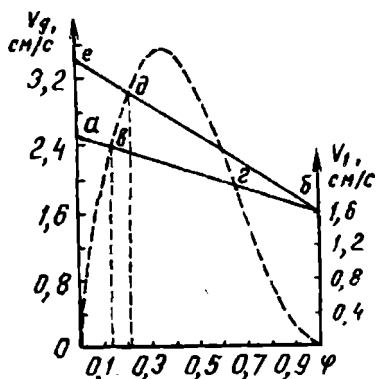


Рис. 4.10. К примеру расчета газосодержания и необходимого расхода воздуха в колонной флотационной машине

проксимационные формулы, например,

$$u_0 = u_b (1 - \varphi)^2 (1 - \varphi^{5/3}) \text{ или } u_0 = u_b (1 - \varphi)^{2,39} (1 - 2,55\varphi^2).$$

Первая из этих формул аналитически получена Г. Маруччи на основе ячеечной модели. Им были вычислены составляющие тензора скоростей деформации для безвихревого обтекания сферы, интенсивность диссипации энергии и сила сопротивления, действующая на пузырек. Из баланса силы сопротивления и силы Архимеда определена величина u_0 . Следовательно, область применения этой формулы ограничена мелкими пузырьками (стоксовское безвихревое обтекание) и невысоким газосодержанием (возмущение, вносимое пузырьком в поток, локализовано в объеме ячейки).

Экспериментальные исследования созданной специальным способом гомогенной барботажной системы показали, что с возрастанием φ до 0,12 значение u_s несколько повышается. Это объясняется известным явлением снижения коэффициента гидродинамического сопротивления при перемешивании жидкости. В барботажной колонне интенсивность перемешивания определяется в основном газосодержанием. При $\varphi = 0,12-0,14$ значение u_s резко падает и снижается при дальнейшем увеличении φ до 0,21-0,23 вследствие взаимного гидродинамического торможения пузырьков. При $\varphi > 0,23$ вследствие интенсивной коалесценции псевдогомогенный барботажный режим переходит в гетерогенный и значение u_s повышается. При создании условий, соответствующих $\varphi > 0,26$, возможно также образование монодисперсной пузырьковой структуры, схожей с пенным слоем. Применение для расчета скорости коллективного подъема пузырьков модели точечных сил не позволяет получать адекватные результаты вследствие неточности начальных предположений.

Для аналитического расчета скорости скольжения фаз используют уравнение баланса сил

$$u_s = u_b \left\{ (\xi_\infty / \xi) (1 - q) [1 + \Delta F / (g(\rho_l - \rho_g))] \right\}^{1/2},$$

где ξ_∞ , ξ - коэффициенты гидродинамического сопротивления при движении одиночного пузырька и стесненном подъеме движения; ΔF - разность сил сопротивления, действующих на единичный объем жидкости и воздуха.

Результаты экспериментальных исследований газосодержания барботажного слоя целесообразно представлять в виде произведения безразмерных критериев Галилея, Этвоша, Фруда, отношения высоты колонны к диаметру и размера отверстий барботера к диаметру. Показатели степени, критериев, входящих в уравнение для газосодержания, и численные значения коэффициентов определяют экспериментально.

Следует отметить, что определению среднего газосодержания посвящено огромное число экспериментальных исследований, однако пределы применимости полученных в них эмпирических соотношений неясны, что не позволяет использовать их при моделировании процесса в колонных флотационных машинах без проведения экспериментов. Прогнозирование скорости движения пузырьков и их концентрации является необходимым этапом конструирования и моделирования флотационной машины.

4.3. РАСЧЕТ ГИДРОДИНАМИКИ ЭЛЕМЕНТАРНОГО АКТА ФЛОТАЦИИ

Технологи часто недооценивают роль гидродинамического фактора во флотационном процессе, хотя широко известно, что показатели флотации шламистых и крупнозернистых пульп во многом зависят от правильного выбора оборудования.

В действительности гидродинамика элементарного акта флотации значительно усложняется вследствие турбулизации пульпы всплывающими пузырьками и искажений, вносимых в поток самими частицами.

Уравнения, предложенные для расчета вероятности столкновения частиц с пузырьками, можно разделить на две группы. К первой относятся формулы, основанные на концепции столкновения в результате турбулентных блужданий частицы и пузырька. Некоторые из них приведены в табл. 4.1, формулы (1)-(5). В последние годы достигнут значительный прогресс в экспериментальном и теоретическом изучении турбулентного переноса и осаждения аэрозолей. Наряду с диффузионным был теоретически предсказан и практически подтвержден миграционный механизм осаждения. Он обусловлен пульсационной составляющей скорости потока. Теория миграционного механизма к настоящему времени разработана для осаждения частиц на стенки каналов. Применение ее для расчета турбулентной коагуляции помогло бы глубже раскрыть механизм субпроцессов и способствовать оптимизации гидродинамических условий. По данным Е.П.Медникова, на движение частицы в турбулентном потоке влияют: продольная и пульсационная скорости среды; поперечная турбулентная миграция; крупномасштабное турбулентное перемешивание; диффузия, вызванная мелкомасштабными пульсациями; седиментация; соударение со стенками и остаточная миграция.

Во вторую группу входят формулы, полученные на основе анализа детерминированного описания движения частицы в окрестности пузырька с учетом действия различных сил. К ним относятся формулы (6)-(15) (см. табл. 4.1). Н.Н.Рулев указывает, что теория турбулентной диффузии неприменима для расчетов флотации микрочастиц мелкими

Т а б л и ц а 4.1

Формулы для расчета числа столкновений N и коэффициента захвата частицы пузырьком E

Автор, год опубликования, формула	Модель и допущения
<p>М.Смолуховский, 1936 г. $N = 2\pi D (d_p + d_b) n_p n_b$</p>	<p>(1) Коагуляция вследствие броуновской диффузии частиц, подчиняющейся уравнению</p> $\frac{\partial n}{\partial t} = D \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial n}{\partial r} \right).$ <p>Отсутствие собственной траектории частицы и пузырьков относительно жидкости</p>
<p>М.Смолуховский, 1936 г. $N = \frac{1}{6} \Gamma (d_p + d_b)^3 n_p n_b$</p>	<p>(2) Градиентная коагуляция, т.е. столкновение вследствие различия в скоростях движения частиц. Отсутствие гидродинамического взаимодействия коагулирующих частиц. Скорость потока вблизи поверхности изменяется по линейному закону</p>
<p>В.Г.Левич, 1959 г. $N = \frac{\pi}{16} n_p n_b (d_p + d_b)^2 \varepsilon^{3/4} \nu^{-5/4} \times$ $\times \left[d_p^2 (\rho_p - \rho_l) / \rho_l + d_b^2 \right]$</p>	<p>(3) Коагуляция вследствие влияния на скорость движения в турбулентных потоках плотности и крупности частицы и пузырька. Сила сопротивления, действующая на частицу и пузырек, подчиняется закону Стокса</p>
<p>Дж. Абрахамсон, 1975 г. $E = \frac{5}{4} n_p n_b (d_p + d_b) \times$ $\times \sqrt{\frac{(u'_p)^2 + (u'_b)^2}{2}}$ где $\sqrt{\frac{(u'_p)^2 + (u'_b)^2}{2}} = (0,33 - 0,4) \times$ $\times \frac{\varepsilon^{4/9} d^{7/9}}{\nu^{1/3}} \left(\frac{\rho_p - \rho_l}{\rho_l} \right)^{2/3}$</p>	<p>(4) Модель совпадает с моделью, описываемой формулой (3)</p>
<p>Х.Шуберт, 1977 г. $N = \sqrt{\frac{8\pi \varepsilon}{15 \nu}} (d_p + d_b)^3 n_p n_b$</p>	<p>(5) Коагуляция вследствие турбулентных пульсаций. Полное увеличение частиц турбулентными пульсациями; $d_b < \lambda_0$ (λ_0 - внутренний масштаб турбулентности)</p>
<p>К.Л. Сазерленд, 1948 г. $E = 3d_p/d_b$</p>	<p>(6) Столкновение вследствие зацепления. Потенциальное обтекание. Силами тяжести и инерции пренебрегают; $d_p < d_b$</p>

Продолжение табл. 4.1

Автор, год опубликования, формула	Модель и допущения
<p>И.Лэнгмюр, 1949 г.</p> $E = \left(\frac{St}{St + a} \right)^2$ <p>где $a = 0.06-0,5$</p>	<p>Столкновение вследствие инерционности захватываемой частицы. Потенциальное обтекание (пограничный слой отсутствует). Эффектом зацепления, седиментацией, диффузионным осаждением пренебрегают</p>
<p>В.Г. Левич, 1959 г.</p> $E = 3 \left(\frac{D}{\nu} \right)^{2/3} Re_b^{-2/3} \approx$ $= 6d_b \sqrt{\frac{\epsilon}{\nu}} \beta / u_b$	<p>Осаждение частиц вследствие турбулентных пульсаций в случае $d_p \ll d_b$. Частицы не обладают собственной скоростью, эффект зацепления не учитывают</p>
<p>Л.Р. Флинт, В.И. Говарт, 1971 г.</p> $E = G/(G + 1),$ <p>где $G = St \cdot Fr = u_p/u_b =$</p> $= \frac{(\rho_p - \rho_l) d_p^2 g}{18\mu u_b}$	<p>Столкновение вследствие седиментационного осаждения частиц</p>
<p>П.П. Колборн, 1971 г.</p> $E = \frac{2,33}{d_p} \left[1 - \left(\frac{d_p}{d_{max}} \right)^{1/5} \right] \times$ $\times \exp \left(- \frac{a}{d_p^2} \right)$	<p>Учет числа столкновений вследствие турбулентных пульсаций и вероятности деминерализации</p>
<p>Е.Б. Кремер, 1978 г.</p> $E = \left(\frac{u_p}{u_b} + \frac{3d_p}{d_b} \right) \sin^2 \varphi,$ <p>где $\varphi = \arccos(\sqrt{1 + b^2} - b);$ $b = 2d_p/3d_b - St$</p>	<p>Осаждение за счет гравитационного сноса с линий тока и зацепления. Турбулентной коагуляцией пренебрегают</p>
<p>С.С. Духин, 1980 г.</p> $E = G/(1 + G) + 3d_p/d_b$	<p>Обобщение моделей, описываемых формулами (6) и (9)</p>
<p>Н.Н. Рулев, 1985 г.</p> $E = \frac{3}{2} \left(\frac{d_p}{d_b} \right)^2 f,$ <p>где $f = C, 1 - 1$</p>	<p>Модель совпадает с моделью К.Л. Сазерленда, но вязкое обтекание (поверхность пузырька полностью заторможена)</p>

Продолжение табл. 4.1

Автор, год опубликования, формула	Модель и допущения
<p>Г.С. Добби, Дж.А. Финч, 1985 г. при $St < 0,1$ $E = E_0 = E_g + E_i$, (14) где $E_g = \frac{G}{1 + G} \left(1 + \frac{d_p}{d_b}\right) \sin^2 \varphi$; $\varphi = 78,1 - 7,37 \lg Re_b$ $(20 < Re_b < 400)$; $\varphi = 98 - 12,49 \lg (10Re_b)$ $(1 < Re_b < 20)$; $\varphi = 90 - 2,5 \lg (100Re_b)$ $(0,1 < Re_b < 1)$; $E_i = \frac{3}{2(1 + G)} \left(\frac{d_p}{d_b}\right)^2 \times$ $\times \left[1 - \frac{(3/16) Re_b}{1 + 0,279 Re_b^{0,56}}\right]$; при $0,1 < St < 0,8$; $20 < Re_b < 300$ и $G < 0,25$ $E = E_0 1,627 Re_b^{0,06} St^{0,54} G^{-0,16}$ (15)</p>	<p>Независимое осаждение по гравитационному и инерционному механизмам</p>
<p>Обозначения: N - число столкновений в единичном объеме за единицу времени; D - коэффициент диффузии; d_p, d_b - диаметры частицы и пузырька соответственно; n_p, n_b - число частиц и пузырьков в единичном объеме соответственно; ε - градиент скорости жидкости; ε - удельная диссипация энергии; ν - кинематическая вязкость; ρ_p, ρ_l - плотности частиц и жидкости соответственно; E - коэффициент захвата; St - критерий Стокса; Fr, Re, G - критерии Фруда, Рейнольдса и седиментационный; u_p, u_b - скорости частицы и пузырька соответственно; u' - пульсационная составляющая скорости; β, K, d_{\max}, f, a - численные коэффициенты; g - ускорение свободного падения; μ - динамическая вязкость.</p>	

пузырьками (получаются заниженные по сравнению с экспериментальными данными результаты), тогда как В.Г. Левич делает прямо противоположный вывод. Таким образом, вопрос об интенсивности захвата частиц пузырьками при флотации остается открытым. С целью определения наиболее адекватной формулы экспериментальные данные сравнивали с результатами расчетов по различным соотношениям. В соответствии с формулами (1)–(5) (см. табл. 4.1) в случае, когда размер частицы пренебрежимо мал по сравнению с диаметром пузырька, изменение крупности частиц не влияет на число столкновений, что не подтверждается экспериментальными результатами.

Опыты по флотации частиц пирита узких классов крупности инерционного размера (+50 мкм) проводили в беспенном аппарате, аэрирующее устройство которого обеспечивало практически одинаковый размер пузырьков. Реагентный режим соответствовал условиям максимальной гидрофобности поверхности частиц. В этом случае кинетика процесса при неизменности гидродинамических характеристик по объему аппа-

рата описывается уравнением

$$K = -\ln(1 - \epsilon)/t = \text{const.}$$

Константа скорости флотации K равна произведению числа столкновений частицы с пузырьками в единицу времени P_{GN} и вероятности устойчивого закрепления P_a . Поскольку в условиях беспенной флотации скорость движения частиц u_p значительно меньше скорости всплывания пузырьков u_b , величина $P_{GN} = (\pi d_b^2/4)(u_p + u_b)n_b E$, т.е. пропорциональна коэффициенту захвата E (n_b - концентрация пузырьков). Следовательно, при постоянном времени флотации должно выполняться соотношение

$$\lg(1 - \epsilon_1)/\lg(1 - \epsilon_2) = E_1/E_2,$$

где индексы 1 и 2 относятся к опытам по флотации частиц различной крупности в одинаковых условиях. На рис. 4.11 приведены экспериментально полученная кривая роста величины $\lg[1 - \epsilon(d_p)]$ по сравнению с ее значением для крупности 50 мкм $A = \lg[1 - \epsilon(d_p)]/\lg[1 - \epsilon(d_0)]$ и расчетные кривые $B = E/E_0$, где E_0 - коэффициент захвата частиц крупностью 50 мкм. Из сопоставления расчетных и экспериментальных кривых видно, что формула (12) (см. табл. 4.1), учитывающая седиментационное осаждение частиц на пузырьке и эффект зацепления в приближении незаторможенной поверхности пузырька, описывает результаты флотации относительно крупных частиц ($d_p=50$ мкм) в спокойных условиях (при отсутствии интенсивного перемешивания) с погрешностью, не превосходящей погрешности опыта. Эта же формула рекомендована для анализа результатов флотационных опытов в работах О.С. Богданова с соавторами. С увеличением размера частиц влияние седиментации по сравнению с влиянием эффекта зацепления возрастает. Удельный вес первого слагаемого в формуле (12) (см. табл. 4.1) возрастает от 21% для частиц крупностью 50 мкм до 49% - для частиц крупностью 125 мкм.

Хорошая сходимость результатов отмечается и при расчете по

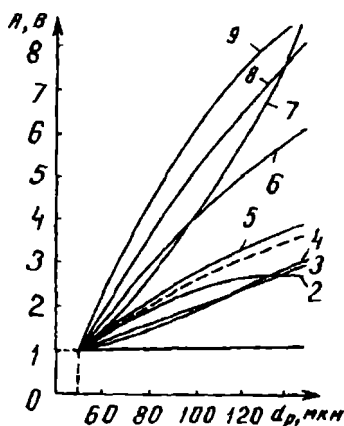


Рис. 4.11. Экспериментальная зависимость величины A от крупности частиц пирита d_p (штриховая линия) и кривые роста гидродинамического коэффициента захвата, рассчитанные по формулам (4), (7) при $a = 0,2$; (6), (7), (9), (11), (12), (13) при $a = 0,5$, приведенным в табл. 4.1, - соответственно кривые 1-6, 8, 9; кривая 7 построена на основе зависимостей, полученных Ю.Б. Рубинштейном

формуле (7) (см. табл. 4.1) со значением $a=0,2$, предложенным Б.В.Дерягиным и С.С.Духиным, и по методике Е.Б.Кремера несмотря на то, что исходные предпосылки для их вывода противоположны.

Полученные данные нельзя, однако, непосредственно экстраполировать для расчета показателей во флотомашине чанового типа с интенсивной аэрацией, где наблюдается значительное перемешивание пульпы. Некоторые исследователи для учета влияния перемешивания на элементарный акт флотации используют формулы, полученные для спокойных условий, рассчитывая значения скорости частицы и пузырька с учетом пульсационных составляющих. Н.Н.Рулев и другие исследователи получили оценочную формулу для расчета амплитуды относительной скорости инерционных пульсаций частицы (пузырька) и жидкости при турбулентном движении последней. Это выражение следует подставлять в формулу для расчета интенсивности процесса P_{GN} . Аддитивность значений интенсивности P_{GN} , рассчитанных исходя из инерционного и гравитационного механизмов элементарного акта флотации, должна быть обоснована. Необходимо также учитывать градиентный механизм столкновений вследствие неоднородности гидродинамического поля.

При интенсивном перемешивании пульпы в импеллерных машинах концентрация частиц остается постоянной вблизи поверхности пузырька и концентрационный пограничный слой весьма тонок. В аппаратах чанового типа циркуляция пульпы обеспечивается только всплывающими пузырьками и градиентом скорости в пристенном слое, поэтому закономерно предположить качественные различия гидродинамики элементарного акта флотации в машинах этих типов.

Поле скоростей жидкости вблизи сферического препятствия при Stokesовском (вязком) ламинарном обтекании ($Re \rightarrow 0$) описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} u_z/u_{b\infty} = 1 - (z^2 + y^2)^{1/2} - (z^2 + y^2 - 1)(2z^2 - y^2)/[4(z^2 + y^2)^{5/2}] \\ u_y/u_{b\infty} = 3(z^2 + y^2 - 1)zy/[4(z^2 + y^2)^{5/2}], \end{cases}$$

а при потенциальном ламинарном обтекании ($Re \rightarrow \infty$) - системой

$$\begin{cases} u_z/u_{b\infty} = 1 - (2z^2 - y^2)/[2(z^2 + y^2)^{5/2}] \\ u_y/u_{b\infty} = 3zy/[2(z^2 + y^2)^{5/2}], \end{cases}$$

где u_z и u_y - вертикальная и горизонтальная составляющие скорости частицы в системе координат, связанной с пузырьком; $u_{b\infty}$ - скорость подъема пузырька (рис. 4.12).

Анализ уравнений показывает, что искажение линий тока отмечается уже на значительном расстоянии от пузырька (на порядок превосходящем его размеры). В то же время внешний масштаб турбулентных

вихрей, индуцируемых всплывающими пузырьками, будет, очевидно, совпадать с характерным расстоянием между пузырьками, поэтому наряду с детерминированной составляющей скорость потока будет обладать пульсационной составляющей. Степень турбулентного перемешивания и интенсивность крупномасштабной циркуляции пульпы оказывают существенное влияние на столкновение и отрыв пузырьков. Влияние крупномасштабной циркуляции можно учесть, если в формулы табл. 4.1 подставить значения реальной скорости движения частиц и пузырьков.

Турбулентные вихри, масштаб которых соизмерим с расстоянием между пузырьками, влияют на траекторию движения частицы вблизи пузырька, следовательно, для их учета необходимо применять специально полученные соотношения.

Для описания движения молекул примеси при массообменных процессах используют уравнение диффузии, являющееся следствием эмпирического соотношения

$$\vec{j} = -D \text{grad } c,$$

где \vec{j} - поток примеси.

Из физической кинетики известно, что правая часть этого выражения - первый исчезающий член разложения функции $\vec{j}(c)$. Членами высших порядков можно пренебречь, если характерный линейный размер задачи (в нашем случае - расстояние от частицы до поверхности пузырька) значительно превышает длину свободного пробега частицы, совпадающего для мелких частиц с внутренним масштабом турбулентности. Таким образом, при расчете траектории частиц в слое радиуса r целесообразно воспользоваться уравнением движения частиц для определения поля регулярных скоростей, а затем учесть пульсационную составляющую при помощи уравнений турбулентной диффузии и турбулентной миграции частиц.

Пределы измерения r определяются неравенствами $R_h < r < R_b + \lambda_0 n$, где R_h - дальность распространения возмущений потока, порождаемых пузырьком, R_b - радиус пузырька, $\lambda_0 = l Re^{-3/4}$ - внутренний масштаб турбулентности, l - внешний масштаб турбулентности (расстояние между пузырьками), $Re = l(u_b - u)/\nu$; ν - кинематическая вязкость жидко-

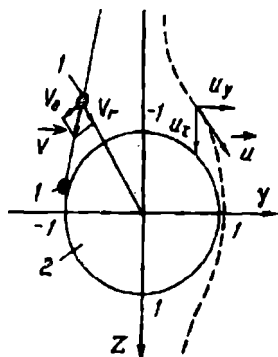


Рис. 4.12. Схема столкновения частицы (1) с пузырьком воздуха (2):

сплошная линия - траектория частицы; штриховая линия - линия тока жидкости

сти; $n \gg 1$ - коэффициент, определяющий точность выполнения этого равенства.

Коэффициент турбулентной диффузии для частиц малых размеров совпадает с коэффициентом диффузии среды, для частиц большого диаметра он может быть вычислен по известным формулам. Число частиц, достигающих поверхности пузырька в единицу времени, определяют по выражению

$$N = \oint_S v_r (R_b + d_p/2) \theta c_p (R_b + d_p/2) \theta dS,$$

где S - поверхность сферы радиуса $(R_b + d_p/2)$; v_r - радиальная составляющая скорости частицы, θ - полярный угол. Граничные условия для уравнений движения частиц и уравнений турбулентного массопереноса можно найти из ячеечной модели, в соответствии с которой возмущения, вносимые дисперсным включением (в частности, пузырьком) в поток, локализованы в ячейке радиусом $R_c = R_b \varphi^{-1/3}$, где φ - удельное объемное газосодержание (не следует путать ее с ячеечной моделью структуры потоков в аппарате). Очевидно, адекватность этого предположения снижается с ростом φ .

Методика расчета кинетики флотации, разработанная японскими исследователями, основана на осаждении частиц на пузырьки вследствие турбулентной диффузии. Поле концентраций частиц в окрестности пузырька описывается уравнением

$$\partial c_p / \partial t = r^{-2} (\partial / \partial r) (2r^2 D \partial c_p / \partial r),$$

где r - расстояние от центра пузырька, $r = (d_p + d_b)/2$; D - коэффициент турбулентной диффузии.

В этом случае $N = 2\pi d_b^2 D \partial c_p / \partial r$. Выражая коэффициент диффузии через удельную диссипацию энергии ϵ , можно получить соотношение для константы скорости флотации $K \sim \epsilon^{0.5} N_a^{0.75}$, где $N_a = Q_a / (n d_n^3)$, n - частота вращения импеллера, d_n - его диаметр. Выражение, стоящее в правой части уравнения, может быть использовано как один из физически обоснованных критериев масштабного перехода во флотационных машинах механического и пневмомеханического типов.

При высокой концентрации дисперсной фазы (интенсивная аэрация) для расчета гидродинамического взаимодействия пузырьков следует применять альтернативную методику, основанную на модели точечных сил. Суть ее заключается в том, что возмущение, вносимое сферической частицей в поток, можно выразить через точечный массовый диполь и точечную силу, приложенную в центре пузырька и направленную в сторону, противоположную силе сопротивления, действующей на него.

При рассмотрении движения большого числа пузырьков или частиц от описания движения каждого пузырька (частицы) переходят к стати-

стическим характеристикам (концентрация, поле скоростей и т.д.). Такой переход корректен в том случае, когда характерное расстояние, на котором существенно меняются гидродинамические параметры, значительно превышает расстояние между пузырьками (частицами). В соответствии с ячеечной моделью условия для решения уравнений должны задаваться на границе ячейки. Радиальная и тангенциальная составляющие скорости частиц на этой поверхности в системе отсчета, связанной с всплывающим пузырьком, выражаются соотношениями $v_r(R_c, \theta) = v_0 \cos \theta$ и $v_t(R_c, \theta) = v_0 \sin \theta$, где v_0 - сумма скоростей седиментации частиц и коллективного подъема пузырьков. Для диффузионного уравнения возможны следующие граничные условия:

$$\begin{aligned} c \Big|_{r=R_c} &= c_0 \text{ и} \\ \partial c / \partial r \Big|_{r=R_c} &= \partial c / \partial \theta \Big|_{r=R_c} = 0, \end{aligned}$$

характеризующие концентрации частиц $c = c_0$ на наибольшем расстоянии от пузырьков. Таким образом, модель флотации в условиях турбулентного потока может включать в себя сочетание элементов моделирования столкновения в условиях спокойного течения (расчет траектории частиц) с подходом, применяющимся для анализа массообменных процессов. Методика численного расчета интенсивности гетерокоагуляции должна предусматривать: расчет поля скоростей среды вблизи пузырька; расчет траекторий частиц при различном "прицельном расстоянии"; расчет поля скоростей частиц с учетом стохастической составляющей их движения; определение вероятности столкновения частицы с пузырьком.

Решение каждой из этих задач связано со значительными математическими сложностями, преодоление которых позволит создать более адекватную картину гидродинамики элементарного акта при флотации частиц широкого диапазона крупности.

Расчет миграции частиц в случае детерминированных и статистических факторов методом имитационного моделирования применяют для описания сходного процесса улавливания частиц волокном фильтра. При разработке алгоритма были сделаны следующие допущения: осаждение частиц не влияет на гидродинамику обтекания волокна; пространственное и временное распределения частиц вдали от волокна носят случайный характер, каждое столкновение частицы с волокном сопровождается захватом. Рассматривается движение частиц внутри цилиндрической ячейки радиуса $R_c = R_\phi \varphi^{-1/2}$, где R_ϕ - радиус волокна; φ - коэффициент упаковки (объемная доля волокон в пространстве фильтра). Направленную скорость частицы определяют по кривизне линий тока. Перемещение частицы, вызванное случайной составляющей ско-

рости, моделируют при помощи случайного вектора n с нулевым математическим ожиданием, изотропным распределением направления и дисперсией в безразмерных координатах, равной $\sigma^2 = 2D \Delta t$, где D - коэффициент турбулентной диффузии, Δt - интервал времени, за которое рассматривается перемещение.

Траекторию частицы рассчитывают при помощи генератора случайных чисел по рекуррентной формуле

$$P_i = P_{i-1} + u_{i-1} \Delta t + 2 \sqrt{\Delta t n / Pe},$$

где P_i - пространственная координата на i -м шаге расчета; u_i , n - компоненты вектора скорости и случайного вектора \vec{n} соответственно; Δt - шаг расчета по времени.

Начальное положение частиц на поверхности ячейки также выбирают случайным образом. После проведения каждого шага расчета траектории проверяют, не столкнулась ли частица с волокном и не вышла ли она за пределы ячейки. Расчет продолжают до осуществления одного из этих событий. При помощи многократного проведения подобного процесса можно определить вероятность улавливания частицы волокном, а также характер распределения частиц по поверхности волокна и другие статистические характеристики. Расчеты С. Канаоки по предложенному им алгоритму показали его эффективность.

Имитационное моделирование успешно применяют в коллоидной химии для исследования осаждения микронных частиц на сферическом коллекторе.

Для применения имитационного моделирования при анализе гидродинамики элементарного акта флотации необходимо в уравнение массопереноса подставить выражение для коэффициента турбулентной диффузии и учесть собственную траекторию частиц относительно линий тока жидкости.

Гидродинамические условия влияют не только на вероятность столкновения частицы и пузырька, но и на устойчивость флотокомплекса.

Вероятность закрепления частиц на пузырьке зависит от соотношения времени контакта частицы с пузырьком и времени индукции. *Время контакта* определяется в основном гидродинамическими условиями. Для расчета его значения используют две взаимоисключающие гипотезы. Согласно одной из них, столкновение частицы с поверхностью пузырька представляет собой удар, при этом расчетное время контакта τ_c в зависимости от размера частиц меняется от 1 до 10^3 мкс. В соответствии с другой гипотезой после столкновения с пузырьком частица в течение некоторого времени (время контакта) скользит по его поверхности, в этом приближении расчетное время контакта значительно больше ($\tau_c = 10 - 100$ мс). Адекватность одного из этих предположений зависит

очевидно, от соотношения размеров частицы и пузырька и параметров потока. Величина τ_c стохастическая, поскольку полярный угол и энергия столкновения частицы с пузырьком являются случайными параметрами. Согласно расчетам К.Л.Сазерленда, время скольжения $\tau_c = (2d_b/3u_b) \text{Arch} \{ \sqrt{3d_p d_b} (2r)^{-1} \}$, где r - прицельное расстояние (расстояние от оси подъема пузырька до центра частицы вдали от пузырька). Тангенциальная составляющая скорости скольжения частиц по поверхности пузырька u_θ складывается из скорости седиментации частиц $u_p \sin \theta$ и скорости движения жидкости, определяемой подвижностью поверхности. Для расчета подвижности $\xi = u_\theta/u_b$ в зависимости от значения Re_b С.Ву и Б.Леклером разработаны аппроксимационные формулы. При флотации совокупностью пузырьков экспериментально установлено, что подвижность поверхности ξ пропорциональна газосодержанию φ . Численный расчет траекторий, проведенный Г.С.Добби, показывает, что функция распределения точек столкновения частиц с поверхностью пузырька в приближении гравитационно-инерционного сноса с линий тока жидкости приближенно описывается соотношением $n_\theta = \sin^2 \theta_n / \sin^2 \theta_c$, где θ_n - полярный угол точки соударения; θ_c - критический угол (полярный угол точки касания частицы, движущейся по критической траектории).

Время скольжения можно оценить по формуле

$$\tau_c = (\theta_m - \theta_n) \pi d_b / (360 \bar{u}_p \theta),$$

где θ_m - максимальный угол контакта, определяемый из баланса гравитационной силы, прижимающей частицу к верхней полусфере пузырька, и гидродинамической силы отрыва, обусловленной радиальной составляющей скорости потока. Значение θ_m зависит от размера пузырька и плотности частицы.

Время индукции - это интервал, в течение которого происходит утончение прослойки жидкости до критической толщины $h_{кр}$. Согласно Х.Шульце, оно определяется по формуле

$$\tau_i = (3\mu r_f^2/2) \int_{h_0}^{h_{кр}} dh / [h^3 (\Pi_\sigma - \Pi_\Sigma)],$$

где r_f - радиус пленки жидкости; Π_σ - капиллярное давление; Π_Σ - сумма сил взаимодействия, зависящая от физико-химических условий и структуры потоков. К сожалению, разработанные методы позволяют измерять, как правило, значения τ_i в статических условиях при помощи различных контактных устройств. Опыты показывают уменьшение τ_i с увеличением прижимной силы, действующей на частицу. Вследствие случайных значений параметров, входящих в последнее соотношение, величина τ_i подвержена стохастическим изменениям. Вероятность за-

крепления одиночной частицы на пузырьке равна единице, если $\tau_i < \tau_c$, и нулю, если знак меняется на противоположный. На рис. 4.13 представлены расчетные зависимости вероятности закрепления от времени индукции в случае закрепления на одиночном пузырьке частиц различной крупности. Кривые получены Г.Добби и Д.ж.Финчем при расчете по формуле

$$P_a = \sin^2 \theta' / \sin^2 \theta_c,$$

где θ' - значение полярного угла точки контакта частицы с поверхностью пузырька, когда $\tau_c = \tau_i$ (при $\theta < \theta'$ закрепление происходит, а при $\theta' < \theta < \theta_i$ времени контакта частицы с поверхностью оказывается недостаточно для закрепления).

Из рис. 4.14 видно, что для мелких частиц время индукции слабо влияет на вероятность элементарного акта флотации. Этот факт наряду с механическим выносом обуславливает низкую селективность флотации шламов. Эксперименты, проведенные во Фрайбергской горной академии (бывш. ГДР), показали, что распределение частиц по времени индукции близко к экспоненциальному. По мнению Т.Гейделя, это является теоретическим обоснованием применения для описания неоднородности флотационных свойств материала гамма-распределения.

В работах С.С.Духина и Н.Н.Рулева рассматривается динамика утончения пленки при ударе частицы о поверхность пузырька в случае лобового столкновения. Авторы полагают, что гравитационные силы значительно меньше инерционных. Уравнения движения сферической

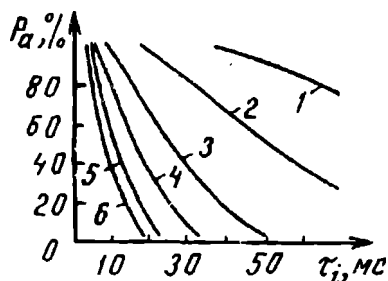


Рис. 4.13. Зависимости вероятности P_a закрепления частицы после столкновения ее с пузырьком от времени индукции τ_i при $d_b = 1$ мм; $u_b = 10$ см/с; $\mu = 10^{-3}$ Па·с; $\rho_p = 4 \cdot 10^3$ кг/м³ и крупности частиц $d_p = 5; 10; 20; 30; 50$ и 80 мкм - соответственно кривые 1-6

частицы в гидродинамическом поле пузырька получены для случая $d_p < d_b$. На первом (гидродинамическом) этапе движение частицы определяется силами инерции и вязкого сопротивления. Второй этап утончения пленки наступает тогда, когда ее толщина достигает критического значения h_0 , соответствующего началу интенсивного движения пленки внутрь пузырька. На втором этапе наряду с силами сопротивления тонкой пленки на частицу со стороны деформированной поверхности жидкости действует капиллярная сила. После подстановки выражений для определения указанных сил в уравнения динамики рассчитывают кинетику

уточнения пленки. Полученные данные свидетельствуют об уменьшении конечной толщины пленки и энергии частицы при уменьшении ее размера и скорости относительного движения частицы и пузырька, что является одной из причин плохой флотуемости крупных частиц.

Согласно модифицированной для случая гетерокоагуляции теории ДЛФО, уточнение межфазной пленки в случае крупных частиц осуществляется в процессе инерционного удара; при значительной относительной скорости частицы и пузырька возможны упругое отражение частицы и ее закрепление при повторных столкновениях. При уменьшении размера частицы механизм элементарного акта качественно меняется, и выдавливание жидкости происходит под действием прижимной гидродинамической силы. Однако субпроцесс закрепления в теории ДЛФО рассматривается на

основе анализа изотерм расклинивающегося давления, без учета структуры потоков. Продолжительность этого процесса ограничена временем контакта, что может существенно снижать вероятность закрепления частицы на пузырьке. По мере уточнения пленки вязкое сопротивление неограниченно возрастает. Следовательно, для уменьшения ее толщины до нуля необходимо бесконечное время. С учетом этого обычно вводят понятие критической толщины пленки $h_{кр}$, при достижении которой происходит ее спонтанное разрушение. Величину $h_{кр}$ можно не вводить, если учесть зависимость электрической и молекулярной компонент расклинивающего давления от толщины пленки и ввести их в уравнение баланса при расчете траектории частицы.

Увеличение интенсивности турбулентных пульсаций или проведение флотации в центробежном поле повышает скорость относительного движения частицы и пузырька. В результате возрастает вероятность столкновения и отрыва частиц от пузырька. В некоторых работах для определения влияния турбулентного перемешивания на столкновение частицы с пузырьком скорость относительного движения, входящую в формулу (4) (см. табл. 4.1), рассчитывают с учетом пульсационных составляющих (при $d_b \gg d_p > \lambda_0$) или в центробежном поле, возникаю-

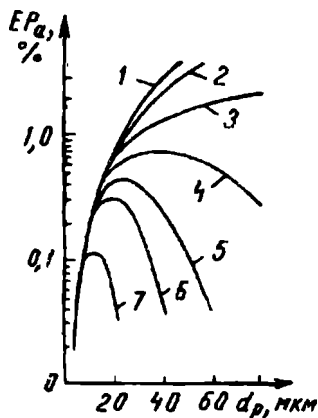


Рис. 4.14. Зависимость вероятности элементарного акта флотации EP_a от размера частицы d_p при $d_b = 1$ мм; $u_b = 10$ см/с; $\mu = 10^{-3}$ Па·с; $\rho_p = 4 \cdot 10^3$ кг/м³ и времени индукции $\tau_i = 0; 10; 15; 20; 25; 30$ и 50 мс - соответственно кривые 1-7

шем внутри турбулентного вихря (при $d_p < \lambda_0$). Такой подход, однако, не позволяет решить задачу, поскольку изменение структуры потоков при перемешивании влияет не только на число частиц, проходящих вблизи пузырька (это учитывается формулами для относительной скорости), но и на траектории частиц и пузырьков при гетерокоагуляции, т.е. на коэффициент захвата E . В этом случае его определяют с учетом гравитационного сноса с линий тока жидкости, градиентной коагуляции в неоднородном поле пульсационных скоростей, а также турбулентной миграции.

Результаты исследований Н.Н.Рудева с соавторами, свидетельствующие о слабом влиянии градиентной коагуляции, получены при коагуляции частиц в поле пузырька, в то время как следует рассматривать гетерокоагуляцию частицы и пузырька в поле неоднородных скоростей, вызванных вихревым движением жидкости. Вывод о том, что при концепции турбулентной диффузии получаются заниженные извлечения, не соответствует расчетам, приведенным самими авторами.

Вероятность закрепления частиц меняется при уменьшении скорости относительного движения. С одной стороны, опыты в статических условиях свидетельствуют о снижении времени индукции при увеличении силы, прижимающей частицу к пузырьку (при флотации роль этой силы играют силы инерции, тяжести или центробежные). С другой стороны, расчеты показывают, что уменьшение кинетической энергии частицы обуславливает неупругий удар и уменьшение конечной толщины пленки. Последнее повышает вероятность спонтанного разрыва пленки с образованием трехфазного периметра смачивания. Кроме того, с уменьшением размера и скорости относительного движения частицы снижается ее конечная энергия при ударе, а следовательно, падает вероятность отскока и возрастает вероятность закрепления при повторном ударе. Таким образом, снижение интенсивности перемешивания и напряженности силовых полей способствует улучшению общей структуры потоков оптимизации условий флотационных субпроцессов, что доказывает перспективность применения колонных аппаратов.

Влияние размера частиц на селективность флотации определяется зависимостью интенсивностей всех флотационных субпроцессов не только от минерального состава и поверхностных свойств, но и от крупности частиц. Важное значение имеет создание условий, обеспечивающих соотношение $F_a > F_o$ для флотируемого компонента и $F_a < F_o$ для депрессируемых частиц. Сила адгезии F_a зависит от поверхности частицы трехфазного периметра смачивания, который при прочих равных условиях прямо пропорционален диаметру частицы. Сила отрыва F_o , согласно уравнению Фрумкина-Кабанова, складывается из массы частицы в воде

(при закреплении частицы на нижнем полюсе пузырька), силы сопротивления, действующей со стороны обтекающей пузырек жидкости, и силы, обусловленной лапласовским избыточным давлением внутри пузырька. Масса и сила сопротивления пропорциональны размеру частицы в третьей степени, а сила, вызванная избыточным давлением, пропорциональна площади контакта и, следовательно, зависит от размера частицы по квадратичному закону. По данным С.С.Духина и Н.Н.Рулева (рис. 4.15), зависимость сил отрыва от размера частиц при близких плотностях разделяемых компонентов будет характерна для частиц различного минерального состава. Силы адгезии для извлекаемого и подавляемого компонентов различаются, о чем свидетельствуют отличия изотерм расклинивающего давления (зависимостей свободной энергии от толщины пленки жидкости). Легко понять, что в статических условиях (силы, действующие в системе, постоянны во времени) подавляемый компонент прочно закрепляется на пузырьке при $d_p < d_{p1}$, а извлекаемый - при $d_p < d_{p2}$. Следовательно, селективная флотация возможна для частиц класса крупности $-d_{p2} + d_{p1}$. Поскольку вид кривых, представленных на рис. 4.15, зависит от гидродинамических условий, диаметра пузырька и физико-химических факторов, количественный расчет флотационных условий на основе баланса сил не представляется возможным. Изложенный подход целесообразно использовать при поиске направлений оптимизации процесса.

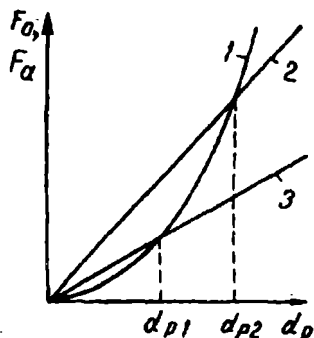


Рис. 4.15. Зависимость сил F_0 отрыва частицы от пузырька (кривая 1) и F_a адгезии для извлекаемого (кривая 2) и подавляемого (кривая 3) компонентов от размера частицы d_p

Для мелких пузырьков ($d_b < 1$ мм, $Re_b < 70$) коэффициент гидродинамического захвата можно рассчитать по формуле

$$E_c = k (d_p / d_b)^n.$$

Зависимости параметров k и n от диаметра пузырька d_b , построенные на основе расчетов З.Джанга и П.Хольтхема, представлены на рис. 4.16. Для интервала $80 \text{ мкм} < d_b < 260 \text{ мкм}$ ($0,2 < Re_b < 5$) адекватной расчетной формулы не получено. Для относительно крупных пузырьков ($d_b > 0,5$ мм) Г.Добби и Дж.Финч получили формулу

$$E_c = 1,627 E_0 [Re_b^{0,06} St^{0,54} G^{-0,16}],$$

применимую в интервале $20 < Re_b < 300$, $St = \rho_p d_p^2 u_b / (9 \mu d_b) < 0,8$; $G = u_p / u_b < 0,25$. Значение выражения в квадратных скобках не менее

0,614. Коэффициент захвата в случае $St \rightarrow 0$

$$E_0 = E_c + E_3,$$

где E_c , E_3 - члены, учитывающие влияние соответственно гравитационного осаждения (седиментации) и эффекта зацепления. Гравитационный член вычисляют по формуле

$$E_c = [G/(G + 1)] (1 + d_p/d_b) \sin^2 \theta_c,$$

а влияние эффекта зацепления -

$$E_3 = \frac{3(d_p/d_b)^2}{2(G + 1)} \left[1 + \frac{3/16 Re_b}{1 + 0,249 Re_b^{0,56}} \right].$$

Согласно С.Ву, $\theta_c = 78,1 - 7,37 \lg Re_b$. Размер пузырька влияет также на вероятность закрепления частицы P_a после столкновения. Исходя из концепции, что величина P_a определяется соотношением времени индукции τ_i и времени контакта t_c , получаем

$$P_a = \sin^2 \theta_n / \sin^2 \theta_c,$$

где $\theta_n = 9 + 8,1\rho_p + \theta_c(0,9 + 0,09\rho_p) - 360u_\theta \tau_i / (\pi(d_b + d_p))$,

u_θ - средняя скорость скольжения частицы по поверхности (зависит от степени ее заторможенности). Расчетная формула для θ_c приведена выше. Обычно значения u_θ и τ_i неизвестны, что затрудняет применение последней формулы в практических расчетах.

Формулы для определения вероятности столкновения частицы и пузырька в спокойных условиях обычно получают аппроксимацией данных численного расчета траекторий частиц. Выбор расчетных соотношений зависит от размера пузырька.

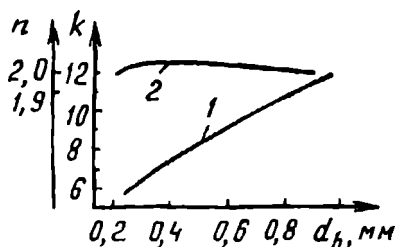


Рис. 4.16. Зависимости параметров k (кривая 1) и n (кривая 2) от диаметра пузырька

Адекватный расчет интенсивности элементарного акта флотации при изменении размера пузырьков - сложная задача. Необходимо поэтому обеспечить идентичный дисперсный состав пузырьков в рассчитываемом аппарате и машине для проведения лабораторных опытов. Если же это невозможно, то следует рассчитать соотношение вероятностей их столкновения и закрепления в данных аппаратах.

4.4. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЧАНОВЫХ (КОЛОННЫХ) ФЛОТАЦИОННЫХ МАШИН

При расчете оптимальных параметров колонной флотационной машины необходимо учитывать следующие факторы: влияние гидродинамических условий на элементарный акт флотации; связь параметров процесса с интенсивностью перемешивания пульпы и дисперсией времени пребывания частиц в камере; влияние условий процесса на вторичное обогащение в пенном слое; кинетические особенности флотации в свободных и стесненных условиях; вынос минерализованных пузырьков потоком в хвосты.

Большинство исследователей при анализе гидродинамического этапа элементарного акта флотации рассчитывают траекторию частицы на основе баланса сил тяжести, инерции и вязкого сопротивления без учета пульсационной составляющей скорости. Оценочные расчеты, однако, показывают, что даже для колонных аппаратов, в которых отсутствуют механические перемешивающие устройства, вследствие диссипации энергии всплывающих пузырьков частицам сообщается пульсационная скорость, соизмеримая со скоростью их седиментации. Известно, что уже при $Re_b = 20$ за пузырьком возникает вихревое течение, способное "засасывать" относительно мелкие частицы. При изменении типоразмера флотационной машины может изменяться не только скорость осаждения частиц на пузырьки, но и его механизм. Невозможность создания флотационной машины, оптимальной при обогащении сырья различного гранулометрического и химического состава, обусловлена различиями необходимых гидродинамических условий процесса.

Для определения константы скорости флотации в однофазном приближении (элементарный акт флотации необратим) при отсутствии перемешивания следует подставить полученные значения E_c в формулу $K_{CN} = 1,5v_g E_c / d_b$. Перемешивание влияет на механизм флотационного закрепления. Медкие частицы при интенсивном перемешивании сталкиваются с пузырьком либо вследствие дрейфа в турбулентном потоке (описывается уравнениями турбулентной диффузии), либо при "катапультировании" из турбулентных вихрей (уравнение Дж.Абрахамсона, примененное для расчета флотации Х.Шубертом). При уменьшении диссипации энергии определяющим является механизм осаждения частиц на пузырьки в результате действия гравитационных и инерционных сил.

Методы расчета одновременного действия диффузионного и седиментационно-инерционного механизмов осаждения частиц из потока не разработаны. Примем, что при относительно слабом перемешивании, характерном для колонных флотационных машин, инерционно-седи-

ментационный механизм оказывает определяющее влияние на закрепление минеральных частиц, а турбулентные пульсации скорости влияют лишь на относительную скорость движения частиц и пузырьков. В случае $\lambda_0 \approx d_b \gg d_p$ для колонных машин П.Саффманом и Дж.Тернером получена следующая формула:

$$K_{CN} = 2,5 \left[E_c \varphi (1 + d_p/d_b)^2 \right] \left\{ 1,3(\tau_p + \tau_b)^2 (\epsilon^3/\nu)^{1/2} + \right. \\ \left. + [(\tau_p + \tau_b)^2 g^2/3] + d_b^2 (1 + d_p/d_b)^2 \epsilon/(36\nu) \right\}^{1/2} d_b^{-1},$$

где τ_p, τ_b - время релаксации соответственно частицы и пузырька, $\tau \approx u/g$, u - скорость свободного движения частицы (пузырька) в пульсе; ϵ - удельная диссипация энергии $\sim gv$; ν - кинематическая вязкость. Первое слагаемое в квадратных скобках отражает интенсивность столкновений в поле центробежных сил, возникающих при движении частицы и пузырька внутри турбулентного вихря, размер которого близок к внутреннему масштабу турбулентности λ_0 ; второе слагаемое - число столкновений в единицу времени в результате действия силы тяжести; третье слагаемое - интенсивность коагуляции в поле постоянного сдвига с градиентом скорости, равным $\sqrt{\epsilon/\nu}$. Полагая, что вероятность устойчивого закрепления P_a определяется в основном свойствами материала и реагентным режимом и слабо зависит от типоразмера аппарата, можно записать $K_2 = K_1 K_{CN2}/K_{CN1}$, где K_1, K_2 - константы скорости флотации частиц данного класса флотируемости и крупности соответственно в лабораторной и промышленной флотационных машинах; K_{CN1}, K_{CN2} - расчетные значения интенсивности столкновений частиц данного размера в тех же аппаратах.

Исследование влияния микроструктуры потоков на результаты процесса предполагает расчет газосодержания в камере при данных расходах фаз, определение режима потока (гомо- или гетерогенный барботажный, снарядный или струйный) и интенсивности перемешивания, а также оценку показателей процесса с учетом неидеальности течения.

Заданное извлечение компонента или качество концентрата может быть достигнуто при различных наборах конструктивных и технологических параметров (высота и диаметр колонны, расход воздуха, подача и плотность пульпы). Однако при изменении режимов потока будут меняться другие показатели флотации. С учетом этого целесообразна следующая последовательность расчета оптимальных условий:

выбор нескольких значений параметров (например, расхода воздуха и диаметра аппарата);

расчет других параметров (высоты), обеспечивающих заданное извлечение;

сравнение возможных наборов параметров и выявление оптимально-

го в соответствии с определенным критерием.

Для оценки газосодержания в колонной флотационной машине целесообразно построить диаграмму, аналогичную приведенной на рис. 4.9. По оси ординат откладывается значение приведенной скорости воздуха v_g ; $\varphi = 1 - v_l$ при $v_l > 0$, что характерно для противоточного режима. Абсциссы точек пересечения прямой, соединяющей две указанные точки, с кривой потока дрейфа $u_{\text{др}}(1 - \varphi)^2$ определяют значения газосодержания φ . В зоне минерализации реализуется режим с меньшим значением φ . Если построенная прямая лежит над кривой потока дрейфа, то однородная барботажная структура при данных значениях v_l и v_g не образуется. В этом случае надо повторить расчет при меньшем значении v_g или v_l , снижая производительность или повышая плотность пульпы.

После выбора расхода воздуха, определения газосодержания и расчета константы скорости флотации в промышленном аппарате следует учесть отрицательное влияние перемешивания пульпы на показатели разделения.

Вследствие перемешивания пульпы в камере машины непрерывного действия время пребывания частицы в аппарате (время флотации) - случайная величина, распределение которой характеризуется ненулевой дисперсией.

Для прогнозирования показателей процесса с учетом обратного перемешивания разработаны две различные методики. В первой из них учитывается плотность распределения времени пребывания $f(t)$. Значение этой функции характеризует долю материала, находящегося в камере флотационной машины, время, близкое к t . Функция $f(t)$ зависит от структуры потоков в аппарате и не связана с флотационным процессом. Для ее экспериментального определения обычно используют метод трассера. Если известна кинетика флотации частиц в промышленном аппарате, то показатели процесса с учетом перемешивания можно рассчитать по формуле $\epsilon_n = \int_0^{\infty} f(t) \epsilon(t) dt$. Эта формула справедлива в том случае, когда скорость флотации не меняется при переходе от периодического к непрерывному режиму и флотация каждой частицы не зависит от плотности пульпы (взаимовлияние частиц отсутствует).

Особенностью чановых (колонных) флотационных машин является невозможность проведения опыта в периодическом режиме вследствие седиментации частиц. При расчете функции $\epsilon(t)$ следует провести кинетический опыт в лабораторной механической машине либо в колонной машине малого диаметра с несколькими перечистками концентрата.

Ниже приведен расчет показателей флотации в непрерывном аппарате большого объема по данным опыта в периодическом режиме.

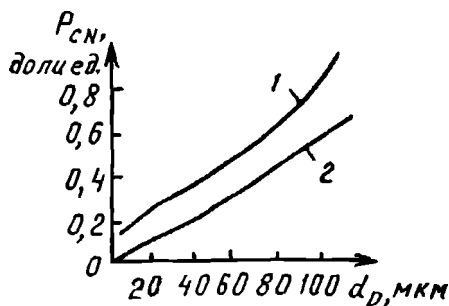


Рис. 4.17. Зависимость вероятности P_{CN} столкновения частицы с пузырьком от ее размера d_p в лабораторной (кривая 1) и промышленной колонной (кривая 2) флотационных машинах

Кинетический флотационный опыт был проведен с определением гранулометрического состава и распределения по флотируемости ценного компонента (табл. 4.2 и 4.3). Для каждого класса крупности была рассчитана вероятность столкновения с пузырьком воздуха в лабораторной и промышленной машинах. Результаты расчета графически представлены на рис. 4.17.

Значения кинетической константы K_2 спектров флотируемости узких классов крупности частиц, деформированных в результате масштабного перехода, рассчитаны по формуле $K_2 = K_1 K_{CN2}(d_p) / K_{CN1}(d_p)$ для средних значений интервалов K_1 и приведены в табл. 4.3. На рис. 4.18 изображено распределение f_θ безразмерного времени пребывания $\theta = t/\bar{t}$ в колонной машине диам. 0,5 м при $v_g = 1,5$ см/с, полученное в результате опытов с трассером. Прогнозируемые значения выходов и извлечений по классам крупности в аппарате большого объема рассчитывали по формулам

$$\begin{cases} \gamma_d = 1 - \sum_i \sum_j \varphi_{\gamma di} f(t_j) \exp(-K_{2di} t_j) \\ \epsilon_d = 1 - \sum_i \sum_j \varphi_{\epsilon di} f(t_j) \exp(-K_{2di} t_j), \end{cases}$$

где $\varphi_{\gamma di}$, $\varphi_{\epsilon di}$ — распределения класса крупности материала и ценного компонента соответственно по флотируемости.

Результаты расчетов при $t_{\phi л} = 3$ мин сведены в табл. 4.4. Выход и извлечение ценного компонента без учета взаимовлияния частиц, подсчитанные по соотношениям $\gamma = \sum_i f_\gamma(d_{pi} \gamma_{di})$ и $\epsilon = \sum_i f_\epsilon(d_{pi} \epsilon_{di})$, равны

Таблица 4.2

Флотируемость частиц в промышленном аппарате, мин⁻¹

Класс крупности, мкм	K_1		
	0,15	0,65	2
-20	0,04	0,16	0,50
-40+20	0,08	0,33	1,00
-70+40	0,10	0,43	1,33
-100+70	0,11	0,49	1,50
+100	0,13	0,57	1,75

соответственно 18,3 и 32,8%, в то время как экспериментальные значения этих величин при том же среднем времени флотации составляют соответственно 28,2 и 47,7%. Каждый класс крупности характеризуется своим значением коэффициента масштабного перехода, определяемого структурой потоков в аппарате и вероятностью элементарного акта флотации.

Следовательно, невозможно сохранить показатели флотации всех классов крупности при измерении размера аппарата. Для выбора параметров промышленного процесса можно предложить два подхода. Первый из них заключается в определении параметров, обеспечивающих неизменные показатели флотации частиц средней крупности. Более правильно использовать другой подход, согласно которому следует вычислить зависимости показателей флотации материала данной флотирруемости и гранулометрического состава от регулируемых параметров и с их помощью выбрать оптимальные условия процесса.

При увеличении высоты колонны перемешивание изменяется незначительно, поэтому форма распределения времени пребывания не меняется, т.е. значение $\bar{t}(t/T)$ не зависит от высоты аппарата $H = \bar{t}(u_p + u_l)$. На рис. 4.19 представлены расчетные кривые показателей флотации при различной высоте зогы минерализации, полученные на основе указанных допущений без учета ограниченности поверхности пузырьков.

Альтернативный метод учета интенсивности перемешивания при расчете флотационных машин - решение уравнений локального баланса фаз. В отличие от метода, основанного на использовании распределения времени пребывания, данный способ требует описания структуры потоков внутри аппарата. Чаще всего для описания переноса частиц в колонных аппаратах используют одномерную диффузионную модель. Эта

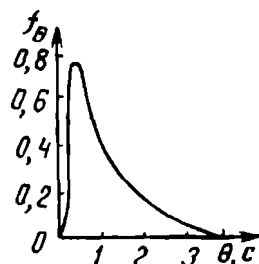


Рис. 4.18. Распределение f_θ безразмерного времени θ пребывания в колонной флотационной машине при $d_c = 0,5$ м и $v_g = 1,5$ см/с

Таблица 4.3

Распределение по флотирруемости и гранулометрический состав ценного компонента в питании флотации, %

Класс крупности, мм	Интервал флотирруемости K , мин ⁻¹				Содержание класса, %
	0	0-0,3	0,3-1	1-3	
-20	30	40	20	10	40
40+20	20	30	30	20	20
-70+40	10	30	30	30	20
-100+70	30	50	10	10	15
+100	60	30	10	0	5
Исходный продукт	25,5	37	22	15,5	100

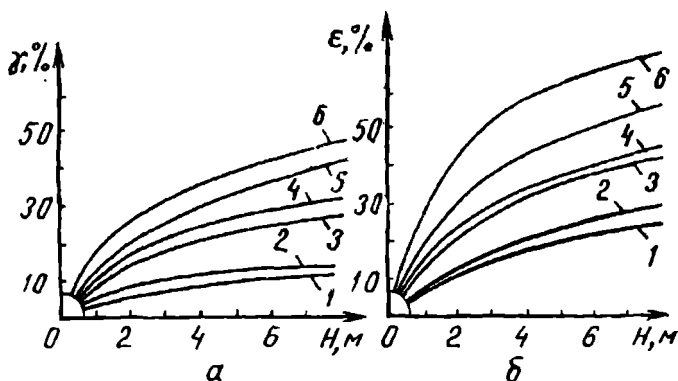


Рис. 4.19. Расчетные зависимости выхода (а) и извлечения (б) частиц различных классов крупности от высоты зоны минерализации H :

1 – -20 мкм; 2 – -300+100 мкм; 3 – -300+0 мкм; 4 – -100+70 мкм; 5 – -40+20 мкм; 6 – -70+40 мкм

модель справедлива при отсутствии макроциркуляции пульпы в колонне, т.е. при большом отношении высоты колонны к ее диаметру, равномерном распределении воздуха по сечению аппарата и не слишком интенсивной аэрации. В противном случае для описания переноса минеральных частиц следует применять более сложные модели, разработанные в химической технологии для описания барботажных аппаратов. Фактором, существенно ограничивающим область практических расчетов по этим моделям, является сложность определения их параметров на основе экспериментальных данных.

Большинство процессов, происходящих во флотационной пульпе, обладает марковским свойством, т.е. вероятность их осуществления для данной частицы не зависит от ее предыстории, числа других частиц и времени. В этом случае процесс флотации частиц с одинаковой флотоактивностью можно описать системой параболических уравнений. Аналогичные системы можно записать для каждого класса частиц. Если в ходе флотации пренебречь взаимным влиянием частиц нельзя, то по-

Таблица 4.4

Экспериментальные (числитель) и расчетные (знаменатель) показатели флотации в лабораторной колонной машине при $H = 3$ м и $t_{\text{фл}} = 3$ мин, %

Показатель	Класс крупности, мкм				
	-20	-40+20	-70+40	-100+70	+100
Выход концентрата	19,4	40,3	41,6	28	12,2
	7	26,5	30,8	21,2	10,1
Извлечение ценного компонента	41,6	56,5	66,5	36,7	22,7
	19,2	39,8	53,4	29,4	19,4

лучаемые системы становятся зависимыми, что затрудняет их анализ и решение. Для анализа стационарного режима работы флотационной машины следует принять левую часть уравнений локального баланса равной нулю и решить систему линейных обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка.

Если интенсивность элементарного акта флотации значительно превышает скорость деминерализации пузырьков и механического выноса частиц, то для описания установившегося процесса флотации частиц, характеризующихся значением кинетической константы K , можно использовать уравнение

$$(u_l + u_p)(dc/dz) + D(d^2c/dz^2) - Kc = 0.$$

Это уравнение имеет аналогичное решение:

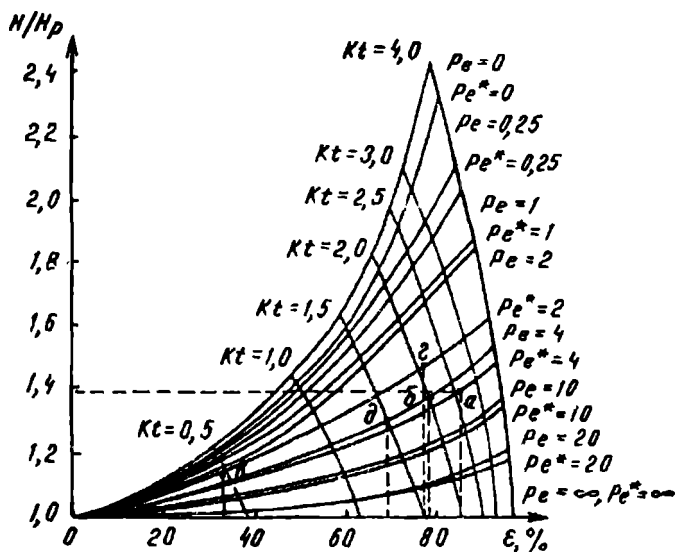
$$\epsilon = 1 - c(H)/c(0) = 1 - 4a \exp(Pe/2) [(1+a)^2 \exp(aPe/2) - (1-a)^2 \exp(-aPe/2)]^{-1},$$

где $a = \sqrt{1 + 4K\bar{t}/Pe}$; $Pe = (u_l + u_p)^2 \bar{t}/D$.

Последнее выражение представляет собой в указанных приближениях сепарационную характеристику колонной флотации, поскольку отображает зависимость распределения материала между продуктами сепарации от параметра разделения K . По расчетным данным, сепарационная характеристика в точке $\epsilon = 0,5$ круче, чем характеристика импеллерных машин $\epsilon = 1 - 1/(1 + K\bar{t})$, что свидетельствует о гидродинамических преимуществах колонной флотации по сравнению с флотацией в большеобъемных машинах с интенсивным перемешиванием.

Практическое применение уравнения возможно с использованием модифицированной номограммы (рис. 4.20). Рассмотрим способ ее применения на примерах.

Пример 1. В результате исследований на обогатимость в колонне малого диаметра ($Pe \rightarrow \infty$) получено, что при $t = 5$ мин и $v_g = 1,5$ см/с $\epsilon = 86\%$. Требуется рассчитать необходимую для достижения такого же извлечения высоту промышленной колонны диаметром $d_c = 0,5$ м при выбранном расходе воздуха $Q_g = 10,5$ м³/ч. Приведенная скорость воздуха в промышленной машине равна $v_g = Q_g/(9\pi d_c^2) = 1,5$ см/с. Равенство значений приведенных скоростей воздуха и одинаковый тип газораспределительных устройств в промышленной и лабораторной колонных машинах обеспечивают близкие аэрационные характеристики (газосодержание и дисперсный состав пузырьков) этих аэраторов. Следовательно, можно предположить одинаковую интенсивность флотационных субпроцессов в колоннах разных размеров при идентичных реагентных режимах ($K_{CN1} = K_{CN2}$). Рассмотрим сначала наиболее простой случай: частицы ценного компонента имеют равную флотиремость K , т.е. кинетика флотации в лабораторном периодическом аппарате близка к экспоненциальной. Объемная производительность операции по пыле составляет $Q_l = 10$ м³/ч при содержании твердого в питании 15%. Скорость потока пульпы $u_l = Q_l/[9\pi d_c^2(1 - \varphi)]$. По модели потока дрейфа установлено, что при указанных расходах газосодержание $\varphi = 10\%$. Следовательно, $u_l = 1,6$ см/с. В условиях противотока



Сначала проводят эксперимент. Для этого порцию материала, обработанного реагентами, импульсно вводят в поток жидкой фазы, непрерывно поступающей в лабораторную колонную машину малого диаметра. Определяют извлечение материала в концентрат $\epsilon_L(t)$. Хвосты флотации вновь подают в аппарат и находят $\epsilon_L(2t)$. Подобным образом определяют n значений $\epsilon_L(jt)$; $j = \overline{1, n}$.

Расчет осуществляют по следующей методике. Если значение критерия Пекле для лабораторной колонны $Pe_L = u_{pL} H_L / D_L > 20$, то режим течения близок к идеальному вытеснению и $\epsilon(jt) = \epsilon_L(jt)$. Если $Pe_L \leq 20$, то следует учитывать перемешивание в лабораторной колонне, для чего необходимо на диаграмме найти линию, соответствующую Pe_L , отметить на ней точки с абсциссами $\epsilon(t)$, $\epsilon(2t)$, ..., $\epsilon(nt)$ и по значениям (Kjt) в этих точках проследить изменение средней флотиремости $\bar{K}(t)$. Уравнение кинетики флотации материала описывается выражением

$$\epsilon(t) = 1 - \exp[-\bar{K}(t) t].$$

После этого одним из численных методов определяют распределение материала по флотиремости $f(K)$ на основе уравнения

$$\int_0^{K_{\max}} f(K) \exp(-Kt) dK = \exp[-\bar{K}(t) t].$$

В простейшем случае уравнение кинетики флотации можно аппроксимировать формулой А. Келсалла:

$$1 - \epsilon(t) = a_f \exp(-K_f t) + a_s \exp(-K_s t),$$

где a_f , a_s - доли быстро- и медленнофлотиремых фракций в питании; K_f , K_s - флотиремости этих фракций; $a_f = 1 - a_s$.

Минимизируя сумму квадратов разностей экспериментальных и расчетных извлечений и варьируя значения K_f и K_s в допустимых интервалах, рассчитывают

$$a_s = \left[\sum_{j=1}^n \epsilon_j c_j - \sum_{j=1}^n c_j + \sum_{j=1}^n \exp(-K_f t_j c_j) \right] / \sum_{j=1}^n c_j^2,$$

где $c_j = \exp(-K_f t_j) - \exp(-K_s t_j)$. Значение $\epsilon(t)$ определяют по формуле. Затем вычисляют извлечение быстро- и медленнофлотиремой фракции в зависимости от высоты H промышленной колонны. Для этого определяют значения u_p и D при данных d_c , Q_l и Q_g и вычисляют

$$K_s t = K_s H / (u_p + u_l); \quad K_f t = K_f H / (u_p + u_l).$$

По абсциссе точек пересечения изолиний критерия Пекле с кривыми, соответствующими значениям $K_s t$ и $K_f t$, определяют значения $\epsilon_s(H)$, $\epsilon_f(H)$ и общее извлечение $\epsilon(H) = a_s \epsilon_s(H) + a_f \epsilon_f(H)$. Исходя из этой зависимости, выбирают оптимальное значение высоты зоны минерализации H .

Пример 2. В результате обработки экспериментальных данных по флотированию в лабораторной колонне получим, что $K_c = 0,1 \text{ мин}^{-1}$, $a_c = 0,2$, $K_f = 0,5 \text{ мин}^{-1}$, $a_f = 0,3$. Промышленную флотацию проводили в аппарате и при условиях, описанных в предыдущем примере. Рассчитаем извлечение при высоте зоны минерализации $H = 5 \text{ м}$. Для этого сначала определим $t = H/(u_p + u_f) = 4,2 \text{ мин}$. Следовательно, $K_c t = 0,42$; $K_f t = 2,1$; $Pe = 2,5$. По номограмме определяем $\epsilon_s = 33\%$ (точка *в*) и $\epsilon_f = 78\%$ (точка *г*). Таким образом, при $H = 5 \text{ м}$ $\epsilon = 33 \cdot 0,2 + 78 \cdot 0,8 = 69\%$.

Аналогичным образом прогнозируют извлечение в колоннах других размеров. По результатам вычисления функций $\gamma(H)$ и $\epsilon(H)$ можно построить кривые обогатимости материала при изменении высоты зоны минерализации.

На основе результатов флотации при помощи этой же номограммы можно оценить значение критерия Пекле.

Пример 3. Предположим, что к колонне малого диаметра ($Pe \rightarrow \infty$), имеющей идентичные аэрационные характеристики с промышленной колонной, получено, что

$$K = -\ln(1 - \epsilon_a) \cdot t_a = 0,3 \text{ мин}^{-1}.$$

При флотации этого же материала в колонне больших размеров ($d_c = 0,8 \text{ м}$, $H = 6 \text{ м}$) оказалось, что при $\varphi = 15\%$ и $Q_f = 30 \text{ м}^3/\text{ч}$ $\epsilon = 70\%$. Среднее время пребывания в этой колонне

$$\bar{t} = \pi d_c^2 H (1 - \varphi) / (4 Q_f) = 3,14 \cdot 0,8^2 \cdot 6 (1 - 0,15) / (4 \cdot 30) \approx 5 \text{ мин}.$$

Следовательно, $Kt = 1,5$. Точка пересечения вертикальной прямой $\epsilon = 70\%$ с линией $Kt = 1,5$ соответствует значению числа Пекле $Pe = 4$ (точка *д*).

Каждая из методик расчета имеет свои преимущества. К преимуществам методики, основанной на применении функции распределения времени пребывания, относят использование всей функции распределения и кинетической кривой, отсутствие априорно заданной модели структуры потоков, относительную простоту расчетов. Преимущества диффузионной модели заключаются в возможности оценки параметров на основе известных эмпирических соотношений без постановки трудоемких опытов с трассером; получения поля концентраций фаз внутри аппарата; учета различных протекающих одновременно процессов: быстрой оценки показателей при помощи диаграмм и моделирования динамических характеристик. Таким образом, выбор методики расчета определяется объемом исходных данных и целью расчета.

Влияние высоты и структуры пенного слоя и зоны очистки на извлечение и качество концентрата. В противоточных колонных аппаратах в точке подачи питания образуется зона высокого газосодержания. Эта зона напоминает пенный слой, однако его структура отличается от структуры полиэдрической пены. По мнению некоторых исследователей, подтвержденному экспериментальными данными, вторичное обогащение в пенном слое имеет первостепенное значение при селективной

флотации. Однако разработанные модели не позволяют прогнозировать связи "параметры процесса - структура пены - показатели флотации". Извлечение в зоне очистки зависит от ее высоты и расхода воды в подпennyй слой, а интенсивность осыпания частиц из пены - от толщины, структуры и способа удаления концентрата. Общее извлечение

$$\epsilon_m = \epsilon_m \epsilon_o \epsilon_f / [1 - \epsilon_m (1 - \epsilon_o) - \epsilon_m \epsilon_o (1 - \epsilon_f)],$$

где ϵ_o , ϵ_f - частные извлечения в зоне очистки и пенном слое соответственно.

Проверка нагруженности и плавучести пузырьков проводится на основе сравнения общей площади поверхности пузырьков и площади поверхности, которая должна быть заполнена частицами при расчетном выходе, а также подъемной силы наиболее мелких пузырьков и силы тяжести закрепившихся на них частиц. При этом необходимо учитывать, что с уменьшением размера пузырька возрастают коэффициент гидродинамического захвата и степень заполненности поверхности. В случае, когда данный аэрационный режим не обеспечивает необходимой площади поверхности пузырьков или их плавучести, следует изменить параметры аппарата или процесса и провести новый расчет.

При расчете колонных флотационных машин обязательно выполнение следующих условий:

при заданных значениях подачи пульпы и выхода концентрата площадь поверхности воздушных пузырьков достаточна для закрепления частиц на нижней полусфере;

подъемная сила пузырьков достаточна для транспортирования частиц в пену;

мелкие минерализованные пузырьки не увлекаются потоком в хвосты.

Первое и второе условия ограничивают минимальную степень аэрации, а третье - наименьший размер транспортирующего пузырька. Мелкие пузырьки могут играть роль "носителя" при флотации по коалесцентному механизму.

Площадь поверхности пузырьков, образующихся в единицу времени, должна быть не менее

$$S = 3Q_l c_s \gamma (2 - \epsilon_o) / (2\rho_p \xi d_p),$$

где ξ - произведение коэффициента сферичности и плотности упаковки частиц на поверхности. Значение S должно по меньшей мере вдвое превышать скорость образования поверхности, которая равна $6Q_g$. Из второго условия следует соотношение

$$Q_g \rho_l \geq |Q_l c_s \gamma (\rho_p - \rho_l) / \rho_p| (2 - \epsilon_o).$$

Таким образом, отношение расходов воздуха и пульпы Q_g/Q_l должно быть не меньше наибольшего из значений, рассчитываемых по выраже-

$$c_s \gamma (2 - \varepsilon_o) d_b / (4\rho_p \xi d_p);$$

$$c_s \gamma (\rho_p - \rho_l) (2 - \varepsilon_o) / (\rho_p \rho_l).$$

В случае $c_s = 300$ г/л; $\gamma = 0,4$; $\varepsilon_o = 0,6$; $d_b = 0,1$ см; $\rho_p = 3,5$ г/см³; $\rho_l = 1$ г/см³; $d_p = 50$ мкм; $\xi = 0,7$ (значения, типичные для флотации сульфидов), согласно первому условию, $Q_g/Q_l \geq 0,34$, а согласно второму - $Q_g/Q_l \geq 0,21$. Обычно в колонных флотационных машинах $Q_g/Q_l = 1-2$. Важное значение имеет, однако, не только общий расход воздуха, но и дисперсный состав пузырьков, поскольку интенсивная подача крупных пузырьков уменьшает скорость флотации и ухудшает ее гидродинамические условия. Однако, как показано в работах Г.Добби и Дж.Финча, конструкторы не должны стремиться к максимальной диспергации воздуха, обуславливающей "захлебывание" колонны при пониженной степени аэрации. Кроме того, при недостатке транспортных пузырьков снижается извлечение ценного компонента вследствие выноса тонкодисперсных нагруженных пузырьков в хвосты. При малой скорости несущего потока пульпы нагруженный пузырек движется вверх, если

$$m(d_b) (\rho_p - \rho_l) / \rho_p < \pi d_b^3 \rho_l / 6,$$

где $m(d_b)$ - масса частиц на пузырьке размером d_b . Если вероятность столкновения частицы с мелкими пузырьками можно рассчитать по формуле, положив $n = 2$ ($d_b > 0,2$ мм) и $u_s \gg u_p + u_b$, то масса частиц на пузырьке слабо зависит от его диаметра $m(d_b) = Q_l c_s \gamma / N$, где $N = 6Q_g / (\pi \bar{d}_b^2)$ - число пузырьков, проходящих через сечение колонны в единицу времени. После подстановки получаем

$$m(d_b) = (Q_l / Q_g) \pi c_s \gamma \bar{d}_b^3 / 6.$$

При заполненной нижней полусфере скорость дальнейшей минерализации резко уменьшается, следовательно, максимальное значение массы минеральной нагрузки равно $m_{\max}(d_b) = \pi d_p d^{b2} \xi \rho_p / 3$ (принято, что $d_b \gg d_p$). Подставляя это значение, получаем, что критический размер пузырька

$$d_{bk} = d_b [(Q_l / Q_g) c_s \gamma (\rho_p - \rho_l) / \rho_l \rho_p]^{1/3}.$$

Если пузырек предельно минерализован $m(d_b) \geq m_{\max}(d_b)$, то $d_{bk} = 2d_p \xi \rho_p / \rho_l$. Пузырьки размером менее d_{bk} движутся вниз и могут быть вынесены в хвосты.

Пр и м е р. Рассчитаем d_{bk} при $d_p = 50$ мкм; $d_b = 0,2$ см; $\xi = 0,7$; $\gamma = 0,4$; $c_s = 300$ г/л; $\rho_p = 3,5$ г/см³, $Q_g/Q_l = 1,5$. В соответствии с выражением $d_{bk} = 0,09$ см для пузырька такого размера $m(d_{bk}) = 0,3$ мг; $m_{\max}(d_{bk}) = 0,5$ мг. Следовательно, пузырьки диаметром менее 0,9 мм будут некоторое время подниматься в пульпе, замедляя свое движение по мере

минерализации, а затем под действием минеральной нагрузки изменят направление движения на противоположное.

Если скорость несущего потока жидкости значительна, то нисходящий поток могут формировать и более крупные пузырьки. Предполагая полную занятость поверхности пузырька, М.Сцатковский и У.Фрейбергер получили следующее уравнение для определения d_{bk} с учетом скорости потока пульпы u_l :

$$\rho_l g d_{bk}^3 - \pi (\rho_p - \rho_l) g d_p d_{bk}^2 - 18 d_{bk} \mu u_l - 36 d_p \mu u_l = 0.$$

Если сила сопротивления, действующая на пузырек, описывается уравнением $F_c = cu_b^n$, то относительное уменьшение скорости его подъема при минерализации

$$u_b/u_{b\infty} = [(\pi d_b^3 \rho_l g - 6m(d_b)g)/(\pi d_b^3 \rho_l g)]^{1/n},$$

где $u_{b\infty}$ - скорость подъема неминерализованного пузырька диаметром d_b . Если $u_{b\infty}$ рассчитывается по формуле Стокса, то в последней формуле $n = 1$.

П р и м е р. Рассчитаем зависимость показателей колонной флотации при перемешивании медного концентрата ($\alpha_{Cu} = 20\%$) от высоты аппарата. Колонна имеет диаметр $d_c = 0,5$ м, расход пульпы $Q_p = 5$ м³/ч, подача воздуха - $Q_g = 8$ м³/ч, размер пор аэратора при рабочем давлении $d_o = 0,2$ мм, $\sigma = 5 \cdot 10^{-3}$ Н/см. Для оценки флотуемости материала используем методику Келсалла, заключающуюся в определении доли быстро- и медленно флотирующихся фракций в лабораторном аппарате. Оказалось, что $K_{as} = 0,2$ мин⁻¹, $K_{af} = 1$ мин⁻¹. Распределение материала и ценного компонента между фракциями характеризуется следующими значениями: $a_{ys} = 0,8$; $a_{yf} = 1 - a_{ys} = 0,2$; $a_{es} = 0,3$; $a_{ef} = 0,7$. Содержание твердого в пульпе - 400 г/л, средняя крупность частиц - 40 мкм, плотность частиц - 5 г/см³. В лабораторной колонной флотационной машине малого диаметра установлен аэратор того же типа, что и в промышленной; при проведении флотационного опыта газосодержание, измеренное методом отсечки, составляло $\varphi = 15\%$.

Процесс флотации существенно зависит от крупности пузырьков. При относительно небольшом расходе воздуха средний диаметр пузырька можно оценить по формуле $d_b = [6d_o\sigma/(\rho_l g)]^{1/3} = 0,18$ см. По мере подъема дисперсный состав пузырьков меняется вследствие дробления и коалесценции, однако при достаточной концентрации вспенивателя и отсутствии механического перемешивания интенсивность этих процессов невелика.

Интенсивность элементарного акта флотации и значение кинетической константы при идентичном дисперсном составе пузырьков пропорциональны газосодержанию φ . Определим на основе модели потока дрейфа значение φ в промышленном аппарате:

$$v_g(1 - \varphi) + v_l\varphi = u_{b\infty}\varphi(1 - \varphi)^n.$$

Для пузырька размером $d_b = 1,8$ мм с заторможенной поверхностью $u_{b\infty} = 17$ см/с, $n = 2$. С учетом заданных расходов пульпы и воздуха и диаметра колонны находим, что приведенные скорости пульпы и воздуха составляют $v_p = 0,7$ см/с; $v_g = 1$ см/с. Из диаграммы находим $\varphi_n = 9\%$. Следовательно, в промышленном колонном аппарате $K_s = K_{as}\varphi_n/\varphi_n = 0,1$ мин⁻¹, $K_f = K_{af}\varphi_n/\varphi_n = 0,6$ мин⁻¹.

Оценим теперь коэффициенты диффузии. По эмпирической формуле $D = 274$ см²/с. По методике, описанной выше, при помощи номограммы (см. рис. 4.20) строим зависимость показателей флотации от высоты аппарата без учета ограненности поверхности (рис. 4.21).

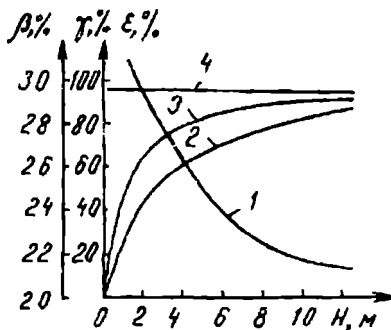


Рис. 4.21. Зависимость показателей флотации от высоты аппарата:

1 — содержание ценного компонента в концентрате; 2 — выход концентрата; 3 — извлечение ценного компонента в концентрат; 4 — максимально достижимый при данной аэрации выход концентрата

Площадь поверхности пузырьков, образующихся в единицу времени, можно оценить, исходя из средней крупности пузырьков:

$$S_b = 6Q_g / \bar{d}_b = 1,1 \text{ м}^2/\text{с}.$$

Следовательно, площадь, занимаемая в единицу времени частицами, не должна превышать $0,5 \text{ м}^2/\text{с}$. Рассчитаем максимальный выход концентрата, соответствующий данной поверхности. Принимаем $\varepsilon_0 = 0,7$, $\xi = 0,8$, тогда

$$\gamma_m = 2S \rho_p \xi d_p / [3Q_c c_s (2 - \varepsilon_0)] = 95,7\%.$$

Таким образом, поверхность пузырьков не является лимитирующим фактором при расчете показателей флотации. Определим теперь размер (мм) пузырьков нулевой плавучести. Согласно $d_{bk} = 1,1 \gamma^{1/3}$ при $\gamma = 50\%$ (что соответствует $H = 2,8 \text{ м}$) пузырьки диаметром мельче $0,9 \text{ мм}$ будут тонуть. С увеличением высоты колонны в нисходящее движение будет вовлекаться все большая доля воздуха.

ГЛАВА 5. АВТОМАТИЗАЦИЯ И КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССА ФЛОТАЦИИ В ПНЕВМАТИЧЕСКИХ МАШИНАХ С КАМЕРАМИ БОЛЬШОГО ОБЪЕМА

Отечественная практика создания систем автоматизации и контроля чановых (колонных) флотомашин

Совершенствование технологических процессов обогащения и создание наиболее эффективных флотомашин с камерами большого объема невозможны без решения вопросов автоматизации, так как достижение наилучших технико-экономических показателей, закладываемых при разработке комплекса "технология-оборудование", возможно лишь при условии, что данный комплекс оснащен средствами автоматического контроля и управления.

Основные направления автоматизации пневматических чановых (колонных) флотационных машин имеют целый ряд специфических

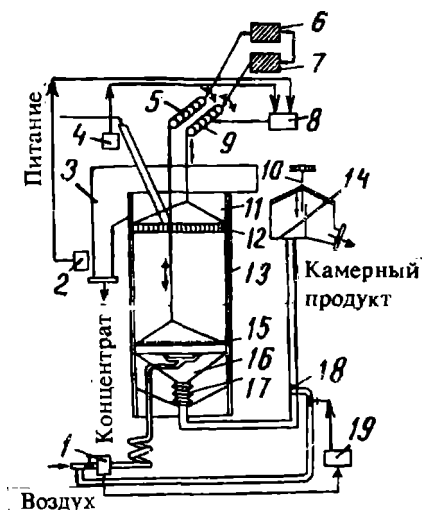
особенностей, определяемых дисперсным составом газовой фазы по высоте машины; раздельным регулированием расхода воздуха в диспергаторе, высоты пенного слоя и аэродинамических параметров в каждой камере; положением загрузочного устройства на границе раздела пенного слоя и пульповоздушной среды; плотностью пульповоздушной среды; регулированием без остановки машины высоты камеры и энергетических воздействий (электрических, магнитных полей и др.) на обогащаемый материал, а также раздельной подачей реагентов в различные емкости камеры с учетом степени флотуемости твердых частиц.

В настоящее время разработан ряд систем автоматизированного контроля процесса флотации в чановых (колонных) машинах.

На рис. 5.1 приведена одна из систем автоматического регулирования расхода воздуха в чановой машине, подаваемого в устройство для разгрузки камерного продукта, в зависимости от расхода воздуха в противоточной камере (а.с. 1233946 СССР). Исходная пульпа, обработанная реагентами, поступает в загрузочное устройство, которое равномерно распределяет пульпу по всему сечению камеры машины. Воздух, подаваемый в камеру через диспергаторы, образует пульповоздушную смесь. В случае необходимости изменения степени аэрации пульпы регулируют расход подаваемого в диспергаторы воздуха, который фиксируется расходомером, и сигнал поступает на регулятор расхода воздуха, подаваемого в устройство разгрузки камерного продукта через диспергаторы. Регулятор поддерживает соотношение расхода воздуха, подаваемого в камеру машины и в устройство для разгрузки камерного продук-

Рис. 5.1. Система автоматического регулирования высоты зоны минерализации камеры флотомашин:

1 - расходомер воздуха; 2 - анализатор содержания ценного компонента; 3 - приемник пенного продукта; 4, 6, 8, 18 - датчики; 5, 9 - приводные устройства; 7 - функциональный преобразователь; 10, 14 - разгрузочные устройства; 11 - камера машины; 12 - загрузочное устройство; 13 - направляющие; 15 - диспергаторы; 16 - приемник камерного продукта; 17 - гофрированный шланг; 19 - регулятор расхода воздуха



та. Степень аэрации пульпы обуславливает изменение высоты пенного слоя и соответственно соотношений высот зон очистки и минерализации.

Система регулирования соотношения высот зон минерализации и очистки работает следующим образом. При перемещении диспергаторов приводным устройством изменяется соотношение высот зон очистки и минерализации. Сигнал, пропорциональный перемещению диспергаторов по высоте, с датчика перемещения поступает на вход функционального преобразователя. Выходной сигнал с него подается на вход приводного устройства, которое по направляющим перемещает загрузочное устройство. Система автоматического регулирования обеспечивает заданное соотношение высот зоны минерализации и зоны очистки с учетом сигнала от регулятора.

При изменении гранулометрического состава исходной пульпы, плотности, степени аэрации и других параметров процесса возникает необходимость оперативного регулирования высоты камеры машины. Особенности ее конструкции - жесткое соединение диспергаторов с приемником камерного продукта, а также соединение разгрузочного устройства с приемником камерного продукта эластичным гофрированным шлангом.

Диспергаторы и связанный с ними приемник камерного продукта устанавливают на предварительно выбранную высоту камеры машины. Содержание полезного компонента в пенном продукте контролируют расходомером, расположенным в приемнике пенного продукта, и регулируют его изменением высоты камеры. С помощью устройства перемещают диспергаторы и связанный с ними приемник камерного продукта. Через гофрированный шланг осуществляется непосредственная связь приемника камерного продукта с устройством для его разгрузки. Для повышения эффективности этой системы регулирования процесса флотации в колонной машине представляется целесообразным ввести коррекцию на перемещение диспергаторов по высоте камеры машины, определяя датчиком гранулометрический состав исходной пульпы.

На рис. 5.2 приведена система автоматической стабилизации высоты загрузки исходной пульпы над уровнем пенного слоя.

При необходимости изменения высоты пенного слоя в камере машины над переливным патрубком включают двигатель перемещения сливного устройства. Через редуктор он перемещает сливной порог в заданном направлении (вверх или вниз) и на требуемое расстояние, фиксируемое по углу поворота ротора сельсина. На блок управления поступают электрические сигналы с сельсина и датчика, фиксирующего направление и расстояние, на которое перемещается загрузочное устройство по направляющим. С выхода блока сигнал поступает на вход блока запаз-

дывания, который обеспечивает выдержку времени, необходимую для установления нового уровня пенного слоя в камере машины. Сигнал с блока воздействует на двигатель загрузочного устройства. При этом двигатель через редуктор обеспечивает перемещение загрузочного устройства, аналогичное (в том же направлении и на такое же расстояние) перемещению сливного порога. В момент, когда загрузочное устройство достигает уровня сливного порога, сигналы, поступающие на блок с датчиков, компенсируются, в результате чего исчезает сигнал, воздействующий на блок запаздывания, и перемещение загрузочного устройства прекращается. Сигнал запаздывания обратно пропорционален производительности сепаратора по исходной руде.

Рассмотренная система автоматического регулирования разработана с учетом специфических особенностей ведения процесса пенной сепарации и колонной флотации: регулирование высоты пенного слоя и необходимость стабилизации высоты загрузочного устройства над пенным слоем (а.с. 1103902 СССР).

На рис. 5.3 приведена система автоматического регулирования длины пути обогащаемого материала в пенном слое при изменении аэрационных характеристик ведения процесса. Система работает следующим образом. Пульпа, обработанная реагентами, поступает в загрузочное приспособление, из которого она равномерно подается на пенный слой. Сфлотированные минеральные частицы удаляются с пенным слоем через разгрузочное приспособление, а несфлотированный материал выпадает из пенного слоя и разгружается через отделения камерного продукта. В момент пуска машины отсекабель, расположенный в камере, устанавливается в положение, определяемое экспериментально и обеспечивающее получение двух концентратов требуемого качества. При регулировании скорости движения пенного слоя изменением расхода воздуха, подаваемого в аэраторы через патрубок, смещается положение зоны пенного слоя, из которой выпадают частицы определенной круп-

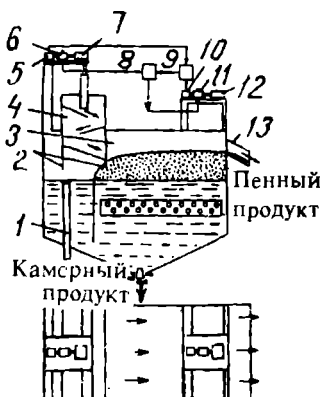


Рис. 5.2. Система автоматической стабилизации высоты загрузки пульпы над уровнем пенного слоя:

1 - переливной патрубок; 2 - направляющие; 3 - камера флотационной машины; 4 - загрузочное устройство; 5 - датчик; 6 - двигатель; 7 - редуктор; 8 - блок запаздывания; 9 - блок управления; 10 - ротор сельсина; 11 - двигатель; 12 - редуктор; 13 - сливное устройство

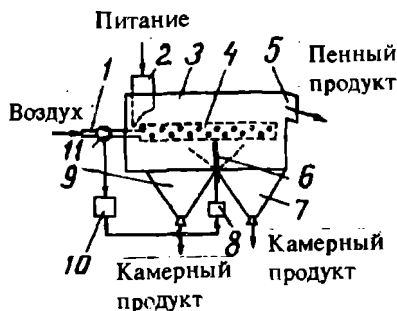


Рис. 5.3. Система автоматического регулирования длины пути обогащаемого материала в пенном слое:

1 - патрубок; 2 - загрузочное приспособление; 3 - камера флотомашин; 4 - аэратор; 5 - разгрузочное приспособление; 6 - отсекающий механизм; 7, 9 - отделения камерного продукта; 8 - исполнительный механизм; 10 - расходомер воздуха; 11 - расходомер воздуха

ности требуемого качества. Изменение расхода воздуха фиксируется расходомером, сигнал с которого поступает на регулятор, а с него - на исполнительный механизм, корректирующий угол установки отсекающего механизма в соответствии с изменением расхода воздуха, подаваемого в аэраторы.

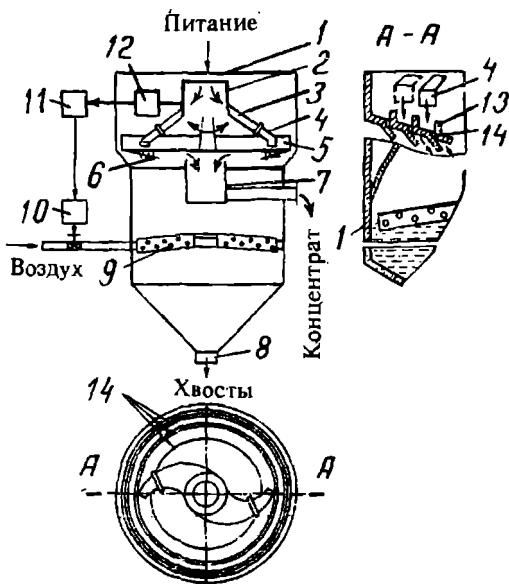
При увеличении расхода воздуха скорость движения пены к разгрузочному приспособлению возрастает. Отсутствие системы регулирования привело бы к тому, что материал, ранее выпадавший в отделение 9, начал бы попадать в отделение 7, где происходит накопление или разгрузка материала более высокого качества, чем в отделении 9. Однако система регулирования отклоняет отсекающий механизм к разгрузочному приспособлению, вследствие чего качество получаемых концентратов сохраняется в заданных пределах.

При уменьшении расхода воздуха скорость движения пенного слоя к разгрузочному приспособлению снижается. Соответственно изменяются траектории движения частиц в пенном слое, материал более высокого качества попадает в отделение 9. Выход второго концентрата при этом снижается. Уменьшение расхода воздуха, обусловленное требуемой степенью аэрации процесса флотации, фиксируется расходомером, и отсекающий механизм отклоняется в сторону загрузочного приспособления, благодаря чему качество получаемых концентратов и их выход остаются на заданном уровне (а.с. 1227247 СССР).

Характерная особенность ведения процесса пенной сепарации - высокое содержание твердого в пульпе. Разработана система автоматического регулирования плотности пульпы на основе стабилизации удельной производительности машины пенной сепарации регулированием длины зоны загрузки камеры (рис. 5.4). При отсутствии питания периферийные части улиткообразных течек сегнерова колеса находятся над той из кольцевых щелей между ограничителями, которая ближе всех

Рис. 5.4. Система автоматического регулирования удельной производительности флотомашины:

1 - камера флотомашины; 2 - сегнерово колесо; 3 - улиткообразные течки; 4 - периферийные части; 5 - кольцевой желоб; 6 - ограничители; 7 - пеносборник; 8 - специальное устройство; 9 - аэратор; 10 - исполнительный механизм; 11 - регулятор; 12 - датчик; 13 - ограничители; 14 - кольцевые щели



остальных щелей от центра камеры машины. При подаче пульпы в сегнерово колесо оно начинает вращаться, что обусловлено реактивным моментом, возникающим при истечении пульпы из улиткообразных течек, которые равномерно распределяют пульпу по кольцевому желобу. К кольцевому желобу крепят ограничители. Под действием центробежных сил упругие периферийные части улиткообразных течек начинают деформироваться (разгибаться), изменяя тем самым расстояние от точки подачи питания на пенный слой пеносборника.

В случае оптимального расхода питания периферийные части улиткообразных течек устанавливаются над средней частью кольцевого желоба, при этом удельная производительность машины соответствует оптимальной. При увеличении расхода пульпы возрастают скорость вращения сегнерова колеса и соответственно центробежные силы, действующие на периферийные части улиткообразных течек. Вследствие их дополнительной деформации питание на пенный слой начинает поступать через кольцевую щель, более удаленную от пеносборника, что увеличивает длину зоны загрузки камеры машины при сохранении постоянной ее удельной производительности.

При уменьшении расхода пульпы скорость вращения сегнерова колеса и центробежные силы, действующие на периферийные части улиткообразных течек, уменьшаются. В этом случае периферийные части те-

чек деформируются (отгибаются) к центру камеры машины, и питание на пенный слой начинает поступать через кольцевую щель, расположенную ближе к пеносборнику, вследствие чего длина зоны загрузки уменьшается, причем удельная производительность машины остается постоянной. Хвосты разгружаются через специальное устройство.

Кроме стабилизации удельной производительности в этой же машине предусмотрена система автоматического регулирования степени аэрации в соответствии с подачей обогащаемого материала. Эта система реализована следующим образом. Частота вращения сегнерова колеса контролируется датчиком, сигнал с которого поступает на регулятор, обеспечивающий через исполнительный механизм необходимое изменение расхода воздуха, подаваемого в аэраторы.

Однако процесс флотации в настоящее время остается менее автоматизированным по сравнению с другими технологическими процессами из-за отсутствия высокочастотных датчиков контроля качества продуктов на всех стадиях флотации и адекватных математических моделей, определяющих сам процесс. Опыт эксплуатации флотационных пневматических машин, а также анализ опубликованных данных и патентов показали, что в настоящее время отсутствуют какие-либо принципиально новые разработки систем автоматического регулирования процесса флотации. Как правило, на всех действующих и вновь разрабатываемых флотомашинах применяют или закладывают в проекты давно известные системы автоматического регулирования параметров. Широко используют системы регулирования уровня и плотности пульпы в камере машины; расхода реагентов, подаваемых во флотацию, а также уровня пенного слоя в камере машины; автоматического контроля содержания ценных компонентов в исходной пульпе, концентрате, промпродуктах и хвостах.

Для реализации систем автоматического регулирования процесса в пневматических машинах разработаны специальные датчики уровня пульпы и пены, а также датчик для измерения плотности и крупности пузырьков пены.

Для измерения верхнего уровня минерализованной пены в камере флотомашин целесообразно применение емкостного датчика (рис. 5.5), представляющего плоский конденсатор, одной обкладкой которого является стационарно установленная в корпусе изолированная пластина, а другой - гидратная пленка, находящаяся на поверхности пены. При колебаниях уровня пены изменяется расстояние между пластинами и, следовательно, емкость конденсатора. Для повышения чувствительности и уменьшения габаритов конденсатора датчик работает в комплексе с высокочастотным генератором и электронным сигнализатором.

ром уровня.

Известно, что плотность и крупность пузырьков пены существенно влияют на извлечение ценного компонента, качество концентрата и производительность машин. Для автоматического контроля плотности и крупности пузырьков пены разработан датчик, принцип действия которого основан на зависимости диэлектрической проницаемости двухфазной пены от соотношения в ней объемов жидкости и воздуха.

Следовательно, при постоянных площади пластин и расстоянии между ними емкость конденсатора будет зависеть только от диэлектрической проницаемости пены.

Датчик плотности пены (рис. 5.6) состоит из двух погруженных в пену изолированных пластин конденсатора 2, которые подключены к прибору контроля емкости 1.

Система автоматического регулирования плотности пены приведена на рис. 5.7. Пульга подается в контактный чан, где обрабатывается реагентами, а затем - во флотомашину, работу которой регулируют путем стабилизации толщины пенного слоя и поддержания на заданном уровне плотности двухфазной пены. Толщину пенного слоя стабилизируют регулированием уровней пены и жидкости. Уровень пены измеряют электродным или емкостным датчиком, подключенным к регулятору. При отклонении уровня пены от заданного значения регулятор через исполнительный механизм и регулирующий орган изменяет подачу воздуха в аэраторы. Регулятор обеспечивает также поддержание высоты перелива пены через сливной порог. Уровень пены регулируют переливом через щель или воздействием на шланговое устройство, через которое разгружаются хвосты. Плотность двухфазной пены под минерализованным слоем в зоне сливного порога измеряют емкостным датчиком, принцип действия которого основан на зависимости диэлектрической проницаемости пены от соотношения в ней объемов воздуха и жидкости. Этот датчик подключен к регулятору, который при отклонении плотности пены от заданного значения через исполнительный ме-

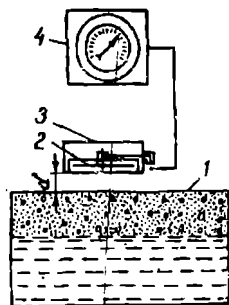


Рис. 5.5. Датчик верхнего уровня минерализованной пены в камере флотомашин:

1 - гидратная пленка; 2 - изолированная пластина; 3 - корпус; 4 - сигнализатор уровня

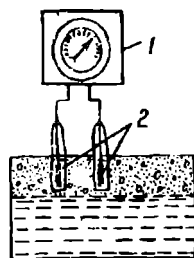


Рис. 5.6. Датчик плотности пены

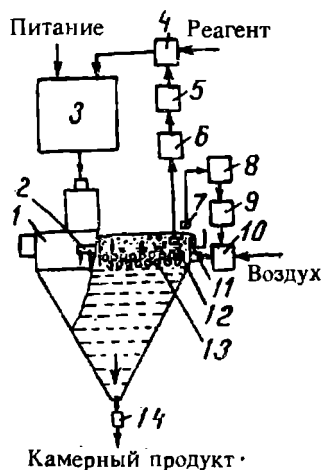


Рис. 5.7. Система автоматического регулирования плотности пены:

1 - флотомашина; 2 - щель; 3 - контактный чан; 4 - штатив; 5, 9 - исполнительные механизмы; 6, 8, 10 - регуляторы; 7, 12 - емкостные датчики; 11 - сливной порог; 13 - аэраторы; 14 - шланговое устройство

ханизм и питатель изменяет дозировку реагента-пенообразователя в контактный чан.

Датчик ДУ-1М (рис. 5.8) предназначен для систем контроля и регулирования уровня пульпы во флотомашинах. Уровень пульпы измеряется поплавком, на котором установлены трубка из немагнитного материала и стальной сердечник, помещенный внутри индукционного преобразователя. Датчик работает в комплекте с типовым электронным регулирующим прибором, выходные сигналы поступают на приборы контроля.

Техническая характеристика датчика ДУ-1М

Диапазон измерения уровня, мм	0-60
Напряжение питания, В	6
Измеряемая плотность среды, кг/см ³	0,95-1,4
Максимальная погрешность, %	±1,

На рис. 5.9 изображен датчик уровня пульпы, состоящий из поплавка, закрепленного на штоке 1. На втором конце штока расположен изолированный контакт 2. Шток помещен в направляющей трубе 3 и при нажатии на поплавок может передвигаться на 10-15 мм. На верхнем конце направляющей трубы установлены два контакта 4, подключенные в электрическую цепь для питания катушки промежуточного реле. Длина поплавкового устройства определяется допустимым отклонением уровня пульпы в камере от заданного. Замер уровня пульпы может производиться через определенные промежутки времени, устанавливаемые опытным путем. Для исключения залипания датчика пульпой он

соприкасается с ней только в момент замера уровня.

Подъем и опускание датчика осуществляются специальным электроприводом. Включение двигателя на опускание датчика производится посредством модернизированного командного электропневматического прибора типа КЭП-12У. Электрическая схема уровнемера пульпы представлена на рис. 5.10. Нажатием кнопки "пуск" в цепи, включающей катушки *СП* контактора *СД*, создается цепь: фаза ноль - контакты кнопки "стоп" - нормально-закрытый контакт *ПД* - кнопка "пуск" - включающая катушка *СП* - фаза *А*. При этом замыкаются главные контакты контактора *СД* в цепи электродвигателя и происходит опускание датчика вниз. Поплавок датчика, достигая поверхности слоя руды в башне, замыкает контакты *1-1* в цепи катушки промежуточного реле, срабатывание которого вызывает размыкание нормально закрытых контактов *2-2* и замыкание контактов *3-3*. Опускание датчика прекращается, и контактами *3-3* замыкается цепь: фаза ноль - кнопка "стоп" - контакты *СП* - контакты *3-3* - катушка *ПД* - фаза *А*. Катушка *ПД* замыкает главные контакты контактора *ПД*, и двигатель производит подъем датчика. В момент начала подъема размыкаются контакты *1-1* и восстанавливается цепь катушки *СП*. Высота подъема датчика ограничивается концевым выключателем *КВ*. При подъеме датчика до установленной высоты ограничителем на подъемном канатике размыкаются контакты *4-4* и замыкаются контакты *5-5*. Контакты *4-4*

выключают двигатель *Д*, а контакты *5-5* включают однофазный синхронный двигатель *КЭП*. Распределительный валик *КЭП* приходит в

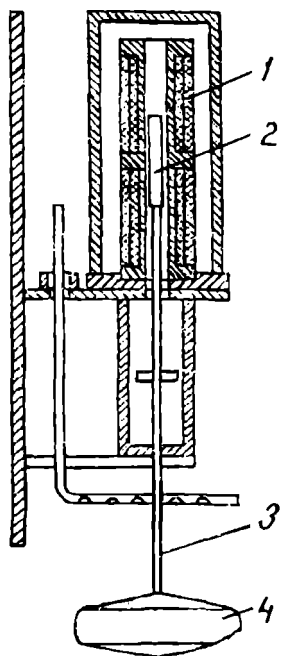


Рис. 5.8. Система контроля и регулирования уровня пульпы:

1 - индукционный преобразователь; 2 - сердечник; 3 - трубка; 4 - поплавок

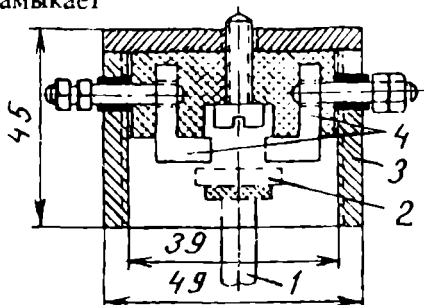
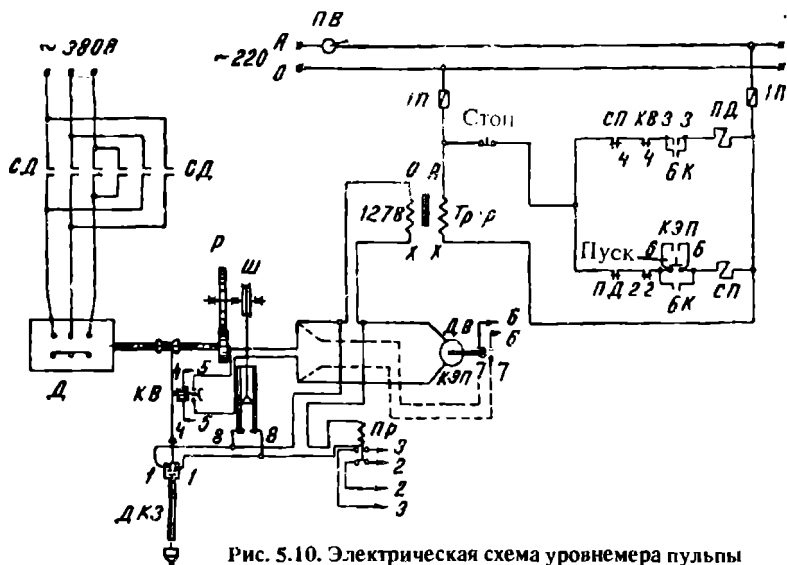


Рис. 5.9. Датчик уровня пульпы в камере



движение и через установленное время замыкает контакты 6-6 цепи катушка СП-двигатель Д, датчик опускается в камеру. При этом двигатель КЭП продолжает работать в течение 20-30 с, шунтируясь контактами 7-7. В дальнейшем работа схемы продолжается автоматически в заданном режиме. В тех случаях, когда уровень пульпы в камере ниже установленного, включение двигателя Д на подъем датчика происходит грузчиком указателя глубины, замыкающего контакты 8-8. Схема надежна в работе и рекомендуется для контроля уровня пульпы в пределах 1,0-1,5 м.

Для контроля уровня пульпы в более широких пределах Г.П.Петренко разработан датчик (рис. 5.11), имеющий форму полого цилиндра диам. 50-70 мм. К нижнему концу цилиндра шарнирно закреплен поплавок; к верхнему прикручивается контактная головка. Выводы от контактов выполнены двужильным гибким кабелем, который является проводником тока и одновременно служит тросом для подъема и опускания датчика. Свободный конец кабеля закрепляется на барабане лебедки. Токоведущие жилы кабеля присоединяются к двум контактным кольцам, вращающимся вместе с барабаном. На контактные кольца накладываются щетки, которые включены в цепь питания катушки промежуточного реле. Включение промежуточного реле происходит в момент, когда датчик опускается на слой руды и наклоняется. В этом случае контакты датчика соединяются через ртутный контакт и создают цепь

тока.

Датчик автоматического регулятора уровня слива (рис. 5.12) представляет собой небольшую камеру, вваренную в сливную трубу. В камере установлены два электрода и охранное кольцо. При увеличении или уменьшении слива изменяется уровень пульпы в камере датчика. При замыкании контактов нижнего или верхнего уровня автоматически срабатывает электрическая задвижка, установленная на трубопроводе, и изменяет подачу воды во флотомашину в зависимости от уровня в ней пульпы.

При испытаниях опытно-промышленной флотомашины объемом 100-200 м³ установлено, что наиболее узким местом оказывается эрлифт. Поэтому проведены экспериментальные исследования эрлифта применительно к условиям его работы в камере флотомашины.

Датчик автоматического регулирования эрлифта (рис. 5.13) представляет собой флажок, установленный в желобе пенного продукта. При отсутствии перелива пульпы из эрлифта в желоб флажок опускается. На оси флажка закреплен сельсин-датчик, электрически связанный с сельсин-приемником, установленным в диспетчерском пункте. Опускание флажка передается с помощью сельсинов на диспетчерский пункт. Кроме того, при опускании флажка замыкаются контакты реле (РС) и включается электропривод задвижки водопровода дополнительной воды для эрлифта. Под действием гидростатического давления столба пульпы в обсадной трубе происходит подъем водовоздушной эмульсии в трубе эрлифта. При определенной скорости движения воды в заборной трубе эрлифта происходит также подъем зерен повышенной крупности. Выдаваемая из камеры эрлифтом пульпо-воздушная смесь направляется в сепаратор-воздухоотделитель (деаэрационная камера) для отделения воздуха от пульпы. Наличие обсадной трубы с нижним колпаком позволяет регулировать плотность выдаваемой пульпо-воздушной смеси и производительность эрлифта путем переме-

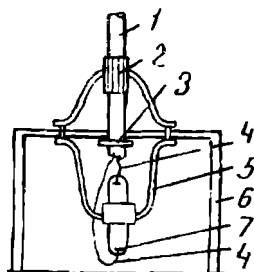


Рис. 5.11. Датчик уровня пульпы:

1 - двухжильный гибкий кабель; 2 - дополнительная кабельная и контактная головки; 3 - крепление кабеля к головке; 4 - подключение кабеля; 5 - крепление стеклянной колбы контакта; 6 - корпус контактной головки; 7 - рудный контакт

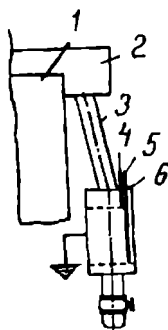
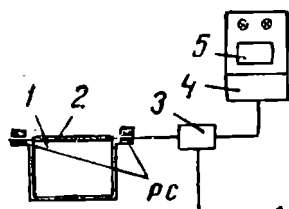


Рис. 5.12. Датчик автоматического регулирования уровня слива:

1 - камера флотомашины; 2 - сливной желоб; 3 - труба для слива; 4 - электрод верхнего уровня; 5 - электрод нижнего уровня; 6 - охранный контакт



В схему электропривода задвижки

Рис. 5.13. Датчик автоматического регулирования эрлифта:

1 - флажок; 2 - ось флажка; 3 - сельсин-датчик; 4 - диспетчерский пункт; 5 - сельсин-приемник

ной незначительной ($\frac{H}{h} > 3$). Наиболее выгодное значение коэффициента

погружения $K = \frac{H}{h}$ находится в пределах 1,9-3,0. В обсадной трубе

камеры столб пульпы поддерживается постоянным. Поэтому динамический уровень пульпы равен статистическому, что также несколько снижает расход энергии на работу эрлифта.

Исследование зависимости производительности эрлифтов различных типов от положения заборной трубы позволило установить, что лучшие показатели по производительности и расходу воздуха получаются при повышении заборной трубы над нижним уровнем колпака на 100-110 мм. Наиболее высокая производительность эрлифта в открытом исполнении получается при оптимальном положении заборной трубы и расходе воздуха порядка $75 \text{ м}^3/\text{ч}$, по пульпе - до 30 т/ч и по руде - до $11-15 \text{ т/ч}$. Удельный расход сжатого воздуха по пульпе и руде соответственно составляет 1,2 и $2,4 \text{ м}^3/\text{т}$; свободного воздуха - 2,5 и $5,1 \text{ м}^3/\text{т}$; плотность пульпы - $1,4-1,5 \text{ г/см}^3$, что соответствует содержанию твердого от 44 до 49%.

Увеличение и уменьшение расхода воздуха против оптимального ухудшают показатели работы эрлифта.

Применение флотационных пневматических машин с камерами большого объема позволяет осуществить более полную автоматизацию процесса флотации с использованием всех управляющих факторов, так как машины данного типа легко управляемы в условиях изменения режимов процесса. Наиболее важной особенностью флотационных

щения ее по вертикали. Пульпа, находящаяся в башне, создает подпор эрлифту, что значительно меняет условия забора пульпы. При недостаточном количестве воды в месте забора работа эрлифта ухудшается и может быть прервана.

При подъеме из камеры пульпы, содержащей сравнительно крупные зерна руды, потери в эрлифте на различные сопротивления составляют большую величину, чем при перекачках однородных жидкостей и пульп. Увеличение потерь на сопротивление влечет за собой снижение КПД установки.

В камере высота подъема h по сравнению с глубиной погружения H является величи-

пневматических машин конструкции института "Гинцветмет" является возможность регулирования расхода воздуха и степени его дисперсности.

Ряд систем автоматического контроля и регулирования процесса флотации в чановых (колонных) машинах, разработанных институтом "Гинцветмет", рассмотрен ниже.

На Кентауской обогатительной фабрике комбината "Ачполиметалл" разработана и внедрена система автоматизации флотационной пневматической машины ФП-40. Функциональная схема (рис. 5.14) основана на использовании в качестве датчика уровня (ДУ) поплавкового уровнемера (УКП-2) конструкции комбината (рис. 5.15). Уровнемер УПК-2 состоит из чувствительного элемента - поплавка 1, преобразователя 2, преобразующего линейное перемещение поплавка в электрический сигнал переменного тока, демпферного устройства 3, которое сглаживает пульсации поплавка от колебаний поверхности пульпы.

Поплавок датчика уровня помещен в успокоительную трубку, установленную в стенке флотомашины на высоте 800-1000 мм ниже пульпового ввода. Линейное перемещение поплавка преобразуется в сигнал переменного тока посредством трансформаторной катушки.

Сигнал с датчика уровня поступает на вторичный самопишущий прибор КСД-3 (ВП) и далее через переключатель (П) - на вход аналогового регулятора (РА) типа РПИБ или Р-25. Регулятор вырабатывает управляющее воздействие на исполнительный механизм в зависимости от сигнала рассогласования между заданным значением уровня пульпы и текущим его значением. Заданное значение устанавливается посредством задатчика (ЗД), входящего в состав регулятора. Управляющие сигналы с регулятора посредством бесконтактного реверсивного пускателя типа ПБР-2 включают исполнительный механизм типа МЭО-10. Исполнительный механизм посредством привода в зависимости от сигнала регулятора опускает или поднимает шиберную заслонку распределительного ящика.

Разработанная система регулирования уровня пульпы смонтирована и испытана на двух флотомашинах ФП-40. Результаты работы систем регулирования уровня пульпы показали достаточную их надежность, повыше-

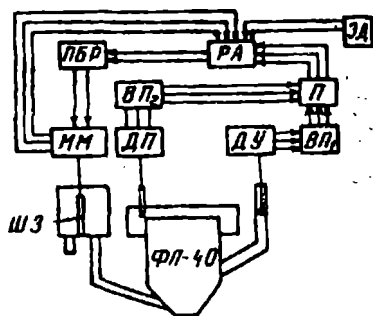


Рис. 5.14. Схема автоматической системы регулирования уровня пульпы в пневматической флотомашине ФП-40 на Кентауской обогатительной фабрике

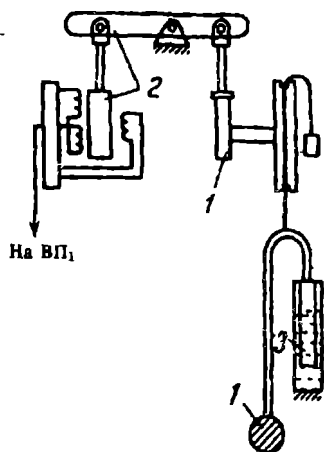


Рис. 5.15. Уровнемер поплавковый УПК-2

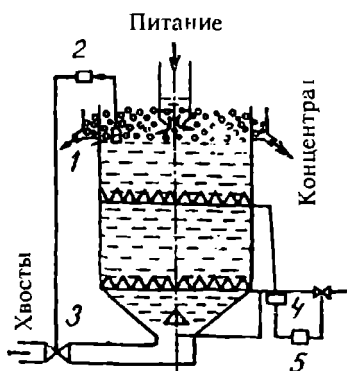


Рис. 5.16. Схема регулирования расхода и давления подаваемого воздуха и уровня пульпы в камере пневматической флотомашинки на Ангренской золотоизвлекательной фабрике

ние качества регулирования уровня пульпы и как следствие - улучшение технологических показателей работы машин и условий труда.

На Ангренской золотоизвлекательной фабрике машина ФП-100 снабжена системой автоматизации регулирования расхода и давления воздуха, подаваемого в аэратор, что позволяет управлять процессами вторичной минерализации пены, качеством и выходом концентрата, а также регулировать уровень пульпы (рис. 5.16).

Регулирование давления и расхода воздуха обеспечивает получение требуемого по технологии гранулометрического состава пузырьков. Уровень пульпы регулируется за счет постоянной разгрузки камерного продукта (хвостов) из машины. Измерение уровня производится поплавковым датчиком 1, сигналы с которого поступают на регулирующий прибор 2. При отклонении уровня от заданного значения регулирующий прибор через исполнительный механизм воздействует на запорно-регулирующее устройство 3. Для стабилизации аэрации пульпы и предохранения от разрыва отверстий резиновых трубок в систему включен регулятор давления воздуха. При изменении давления сигнал с манометра 4 поступает на регулирующий прибор 5, который через исполнительный механизм воздействует на клапан, восстанавливающий этот параметр.

На Сорской обогатительной фабрике внедрена система автоматизации машины ФП-40, аналогичная системе автоматизации машины ФП-100 на Ангренской золотоизвлекательной

тельной фабрике. Внедрение системы обеспечило стабилизацию уровня и аэрации пульпы, в результате чего улучшены показатели процесса и условия труда. Однако исследования флотации в промышленных условиях в машине ФП-40 показали, что, кроме указанных факторов, для полной автоматизации этой флотомашины необходимо обеспечить регулирование и других параметров технологического режима (время флотации, высота пены, скорость, плотность пульпы, крупность пузырьков пены).

Опыт обслуживания колонных аппаратов в Приморском производственном объединении "Бор" позволяет говорить о насущной необходимости автоматизации схемы чановой флотации шламов корпуса тяжелых суспензий. Это обусловлено в первую очередь нетрадиционностью входных параметров чановых флотомашин (расход питания, гранулометрический состав, содержание полезного компонента в исходном питании и др.), а также сложностью контроля и регулирования самого процесса флотации, что связано со специфическими особенностями конструкции колонной флотомашин.

На рис. 5.17 приведена схема автоматизации чановых аппаратов корпуса тяжелых суспензий. Схема автоматизации колонных аппаратов высотой 8 м позволила облегчить условия эксплуатации технологического оборудования. В результате внедрения схемы автоматизации колонной флотации шламов датолитовой руды корпуса тяжелых суспензий ППО "Бор" за девять месяцев 1992 г. по сравнению с предыдущим годом извлечение борного ангидрида в товарный концентрат увеличилось на 0,2%, расход мылонафта, триполифосфата и соды уменьшился соответственно на 0,011, 0,027 и 0,04 кг/т. Схема автоматизации колонной флотации реализована в комплексе ЭВМ СМ-2М, пульта МП-8000М, выполняющего функции интерфейса с объектом управления, локальных средств автоматизации, средств связи и отображения информации.

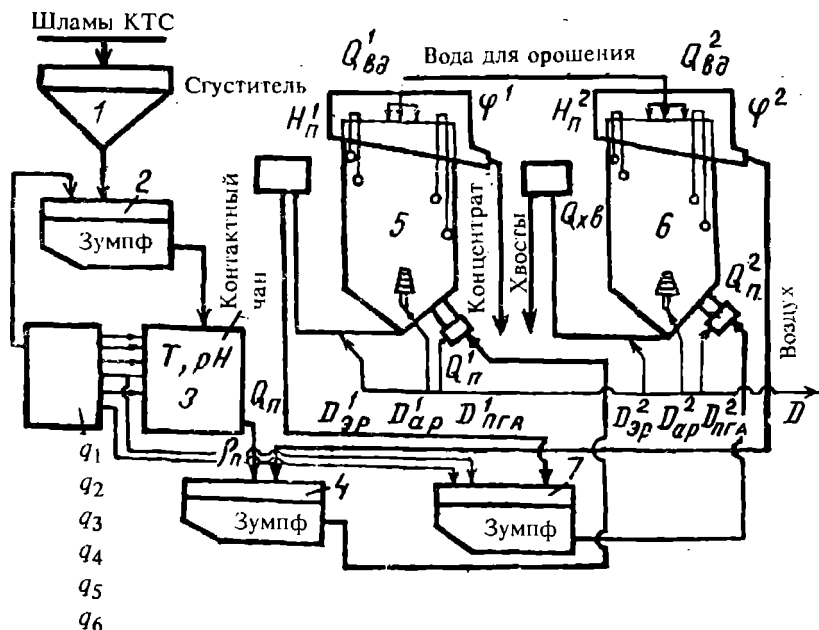


Рис. 5.17. Схема автоматизации чановых флотомашин обогащения первичных шламов в Приморском ПО "Бор":

Параметры контроля: Q_n - объемный расход пульпы; ρ_n - плотность пульпы; pH - щелочность пульпы; $Q_{хв}$ - объемный расход хвостов; Q_n^1 - объемный расход пульпы на основную флотацию; Q_n^2 - объемный расход пульпы на контрольную флотацию; H_n^1 - уровень пульпы на основной флотации; H_n^2 - уровень пульпы на контрольной флотации; φ^1 - газосодержание на основной флотации; φ^2 - газосодержание на контрольной флотации; D - давление воздуха в схеме колонной флотации; $D_{ПГА}^1$ - давление воздуха в ПГА основной флотации; $D_{ПГА}^2$ - давление воздуха в ПГА контрольной флотации; $D_{ар}^1$ - давление воздуха в шайбовый аэратор основной флотации; $D_{ар}^2$ - давление воздуха в шайбовый аэратор контрольной флотации; $D_{эр}^1$ - давление воздуха в эрлифт основной флотации; $D_{эр}^2$ - давление воздуха в эрлифт контрольной флотации; $Q_{ва}^1$ - расход воды на орошение основной флотации; $Q_{ва}^2$ - расход воды на орошение контрольной флотации; T - температура пульпы в контактном чане; q_1 - расход соды; q_2 - расход триполифосфата в контактный чан для основной флотации; q_3 - расход мылонафта в контактный чан для основной флотации; q_4 - расход мылонафта в контактный чан для контрольной флотации; q_5 - расход жидкого стекла в контактный чан для основной флотации; q_6 - расход жидкого стекла в зумпф

ГЛАВА. 6. ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ И ВНЕДРЕНИЕ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ФЛОТАЦИОННЫХ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ МАШИН НА ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ ФАБРИКАХ

Флотационные пневматические машины с камерами большого объема являются перспективным флотационным оборудованием, о чем свидетельствуют результаты крупномасштабных испытаний и промышленной эксплуатации различных модификаций этих машин (см. гл. 1, табл. 1.4). За последние годы эти машины широко применяются при флотации руд цветных, редких, благородных, черных металлов, угля, горно-химического сырья и других полезных ископаемых в различных операциях флотации (в основной, контрольной, перечистной, доизвлечения ценных компонентов из хвостов флотации), а также для очистки природных и сточных вод различных производств.

Исследования и промышленное внедрение большеобъемных флотационных машин чанового (колонного) типа проводятся в нашей стране и за рубежом в течение четверти века. За это время накоплен значительный опыт их эксплуатации. Разработаны различные конструкции флотационных пневматических машин с объемом камер от 1 до 220 м³ и лабораторные машины с объемом камер 0,2; 0,5; 1,0; 20; 50; 200 л.

Ниже рассмотрены результаты промышленных испытаний и внедрение этого типа машин на обогатительных фабриках.

6.1. ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ И ВНЕДРЕНИЕ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ФЛОТАЦИОННЫХ МАШИН ЧАНОВОГО (КОЛОННОГО) ТИПА НА ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ ФАБРИКАХ ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Опытно-промышленная фабрика Приморского ГОКа

Фабрика перерабатывает руды месторождения Восток-2, характеризующиеся четко выраженными процессами окисления. Окисленные минералы представлены в основном гидроксидами железа: гётитом, лимонитом. Преобладающим породообразующим минералом является кварц, в меньшем количестве встречаются слюды - мусковит и серицит; Рудные минералы - шеелит, вольфрамовые охры, пирит, халькопирит,

пирротин. Шеелит находится в виде густой вкрапленности в кварце, гётите, слюде; крупность зерен шеелита до 1-1,5 мм. Халькопирит образует включения неправильной формы размером от 0,05 до 2,0 мм и находится в тесном взаимопрорастании с рудными минералами в виде тонкой вкрапленности и прожилков. Из вторичных минералов вольфрама наиболее распространенным является тунгстит. Висмутовые минералы представлены висмутитом и самородным висмутом.

На фабрике проведены испытания опытно-промышленных образцов флотомашин ФП-10, ФП-6,3 и ФП-1, изготовленных в механических мастерских Приморского ГОКа. Схема флотации была полностью оснащена машинами пневматического типа: в цикле основной шеелитовой флотации - ФП-10, контрольной - ФП-6,3 и в первой перемешке шеелитового концентрата - ФП-1 (рис. 6.1).

Ниже приведена техническая характеристика флотомашин ФП-10, установленной на ОПФ Приморского ГОКа:

Расход воздуха, м ³ /м ³ объема пульпы	1,0-1,3
Рабочая высота камер, м	4,3
Высота пенного слоя, м	0,2-0,3
Время флотации, мин	20-30
Избыточное давление воздуха, МПа	0,12-0,14

Показатели работы опытного образца машины ФП-10 сравнивали с показателями операций основной, контрольной и двух перемешных флотаций шеелита в 14-камерной машине Механобр-5 при одинаковом питании. Средняя плотность исходной пульпы составляла 28%, тонина помола руды - 58-65% класса -0,074 мм.

В период промышленных испытаний получены практически идентичные технологические показатели на обеих машинах при снижении времени флотации в машине ФП-10 в 1,3-1,5 раза и лучшей флотируемости классов -0,044 мм (табл. 6.1, 6.2).

В процессе испытаний отрабатывали режим работы трубчатого эластичного аэратора как основного узла, определяющего гидродинамические параметры машины, а также проверяли работоспособность всех

Т а б л и ц а 6.1

Сравнительные данные по флотации окисленных убогих руд в различных флотомашин

Показатели	Механобр-5 (14 камер)	ФП-10
Производительность по потоку пульпы, т/ч	7,0	8,9
Объем машин, м ³	19,0	10,0
Извлечение WO ₃ в концентрат, %	44,48	45,0
Содержание WO ₃ в отвальных хвостах, %	0,48	0,48

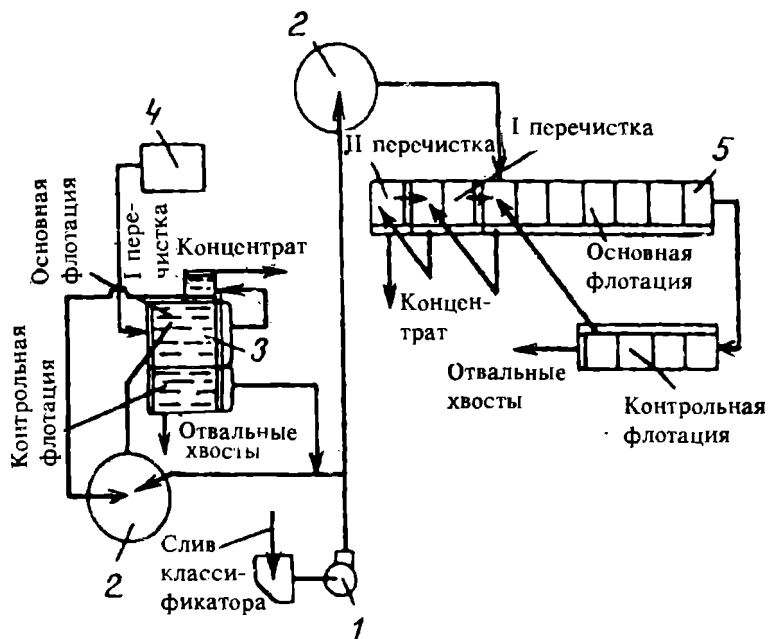


Рис. 6.1. Схема цепи аппаратов промышленных испытаний пневматических флотомашин ФП-10, ФП-6,3 и ФП-1 в цикле шеелитовой флотации на ОПФ Приморского ГОКА:

1 - песковый насос; 2 - контактные чаши; 3 - флотомашину ФП-10; ФП-6,3 и ФП-1; 4 - компрессор; 5 - флотомашину Механобр-5

Таблица 6.2

Распределение триоксида вольфрама по классам крупности хвостов флотации в различных флотомашинах

Класс, мм	Механобр-5			ФП-10		
	γ	β	ϵ	γ	β	ϵ
0,25	3,9	0,09	0,51	2,65	0,24	1,19
0,10	33,8	0,48	23,74	24,61	0,24	12,57
0,074	11,5	0,54	8,93	7,43	0,54	8,75
0,044	7,4	0,75	8,12	6,19	0,56	7,50
-0,044	43,4	0,92	58,70	59,12	0,55	70,00
Исходный	100,0	0,63	100,0	100,0	0,43	100,0

узлов и деталей машины в условиях продолжительной эксплуатации.

При определении расхода электроэнергии при флотации в пневматической машине ФП-10 учитывали фактически потребляемую мощность компрессора. Аналогичные замеры были проведены у каждого электродвигателя приводов импеллеров машин Механобр-5 и двух электродви-

гателей привода пеносъемника. В результате оказалось, что потребление мощности машиной ФП-10 составило 60 кВт, а Механобр-5 - 80 кВт.

В процессе испытаний машина ФП-10 работала в следующем технологическом режиме:

Плотность слива гидроциклона, % тв.	25-40
Производительность по потоку пульпы, м ³ /ч	24-30
Содержание класса -0,074 мм в питании, %	60
Расход воздуха, м ³ /ч	40
Удельный расход воздуха, м ³ /м ³ объема камеры	1
Расход реагентов, г/т:	
ксантогенат	250
сосновое масло	50-100

Сравнительные результаты, полученные в механических машинах Механобр-5 (14 камер) с двумя перемешивателями концентрата и во флотомашинах пневматического типа с одной перемешивкой концентрата (при одинаковом объеме машин, равном 18 м³), приведены в табл. 6.3.

Таблица 6.3

Сравнительные данные шеелитовой флотации в различных флотомашинах, %

Продукт	Механобр-5		ФП-10; ФП-6,3; ФП-1	
	Содержание WO ₃	Извлечение WO ₃	Содержание WO ₃	Извлечение WO ₃
Концентрат	8,3	50	11,6	61
Хвосты	0,54	50	0,41	39
Исходный	1,066	100	1,06	100

Поскольку повышенное содержание сульфидов в руде приводит к резкому снижению извлечения триоксида вольфрама и качества шеелитового концентрата, то для вывода сульфидов перед шеелитовой флотацией также испытана флотомашинa ФП-10. В приведенном режиме машинa проработала 25 смен. Для сравнения взят период работы фабрики на идентичной по содержанию триоксида вольфрама и серы руде. Следует отметить, что в период промышленных испытаний наблюдались колебания содержания триоксида вольфрама в исходной руде, что сказывалось на его извлечении в концентрат.

На рис. 6.2 показана зависимость извлечения триоксида вольфрама от содержания его в руде при работе фабрики без пневматической флотомашины (кривая 1) и с ней (кривая 1'), на рис. 6.3 - распределение потока минеральных частиц по высоте камеры машинны.

Таким образом, установка в голову шеелитовой флотации флотомашинны ФП-10 позволяет увеличить извлечение триоксида вольфрама и в большей степени реагировать на изменение его содержания в руде, что требует более строгого ведения технологического процесса.

Промышленные испытания пневматической флотомашинны ФП-10

послужили основанием для создания флотационной пневматической машины с объемом камеры 40 м^3 , опытный образец которой был изготовлен также на Приморском ГОКе по эскизным чертежам автора.

Особенностями флотомашины ФП-40 являются простота конструкции, большая глубина, смещенное в сторону расположение аэратора, соединение резиновых трубок посредством резиновых манжет. Вследствие подъема пульпы на большую высоту и значительного снижения при этом давления в пульпе во флотационных машинах этого типа происходит интенсивное выделение воздуха из раствора, что содействует более быстрой и избирательной флотации.

Пульпа поступает сверху в центр камеры через загрузочное устройство на расстоянии 1 м от верхнего борта съема пены (рис. 6.4). Разгрузка концентрата производится самотеком через кольцевой желоб, установленный внутри камеры, а разгрузка хвостов - в нижней части камеры с помощью шибера или эрлифта. В нижней части камеры по всей площади установлен трубчатый резиновый аэратор с волнообразным расположением трубок. Воздух под давлением 0,14-0,18 МПа проходит в резиновые перфорированные трубки и предотвращает поступле-



Рис. 6.2. Зависимость извлечения WO_3 от его содержания в руде при работе фабрики без машины ФП-10 (I) и с машиной ФП-10 (II):

линии регрессии: 1, 1' - опытная; 2, 2' - теоретическая

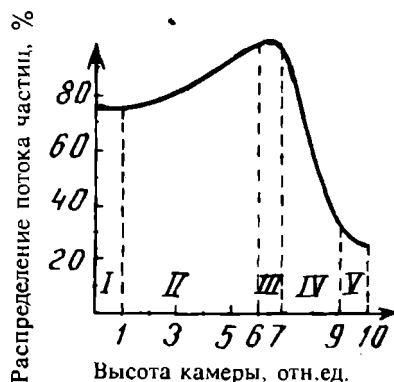


Рис. 6.3. Распределение потока частиц по высоте камеры пневматической флотомашин:

I - камерный продукт; II - нижняя зона; III - средняя зона (подача питания); IV - верхняя зона (подпленный слой); V - пенный продукт

Таблица 6.4

Результаты дофлотации хвостов в флотомашине Механобр-5 и ФП-40

Показатели	Механобр-5 (14 камер)	ФП-40
Содержание WO_3 :		
в питании	0,62	0,62
в концентрате	7,00	5,00
в хвостах	0,47	0,24
Извлечение WO_3	25,6	60,00

Таблица 6.5

Результаты очистки слывов сгустителей в флотомашине ФП-10

Расход, м ³ /ч		Содержание взвеси, г/л		Степень очистки, %
воды	воздуха	в питании	в камерном продукте	
27	27	1,56	0,48	69,1
27	26	1,69	0,51	70,2
27	25	3,01	0,82	73,5
27	24	2,14	0,67	68,8
26	26	3,11	1,01	64,5
26	25	4,92	1,80	63,6
26	24	1,54	0,61	63,0
25	25	4,48	2,12	53,5
25	24	2,72	1,17	57,0
24	24	2,84	1,60	44,1
24	23	5,25	3,05	41,9

Таблица 6.6

Результаты очистки оборотных вод в флотомашине ФП-40 и в гидроциклоне

Расход, м ³ /ч		Содержание взвеси, г/л			Степень очистки, %	
воды	воздуха	в питании гидроциклона	в питании машины ФП-40	в камерном продукте машины ФП-40	в машине ФП-40	в гидроциклоне
30	30	-	13,5	7,95	41,0	-
30	28	-	11,6	6,67	43,1	-
30	26	-	13,3	8,04	37,9	-
28	28	-	11,4	5,11	55,4	-
26	26	-	14,8	5,56	63,1	-
26	24	-	9,4	4,83	51,4	-
210	30	28,4	12,0	7,85	57,8	35,8
210	28	25,3	12,2	7,31	51,7	40,0
210	26	28,8	10,9	6,08	62,2	43,7
28	28	34,8	14,8	8,45	57,5	44,0
28	26	22,9	8,5	4,12	62,8	51,7
28	24	29,3	9,3	4,87	68,3	47,8
26	26	23,2	9,8	5,61	57,8	42,7
25	24	25,1	9,6	5,88	61,8	38,4
26	22	28,4	12,1	7,85	57,4	35,6
24	24	28,0	9,4	6,31	64,5	34,8
24	22	27,6	11,3	7,25	59,0	32,7

ние в них пульпы.

В результате испытаний пневматических флотомашин чанового типа на ОПФ Приморского ГОКа было подтверждено, что благодаря их значительным объемам и компактности целесообразно оборудовать машинами этого типа флотационные отделения современных фабрик большой производительности, а также использовать для доизвлечения ценных компонентов из отвальных хвостов (табл. 6.4) и очистки сливов сгустителей и оборотных вод (табл. 6.5 и 6.6).

Данные, приведенные в табл. 6.6, подтверждают возможность эффективной и дешевой очистки оборотных вод в пневматических машинах.

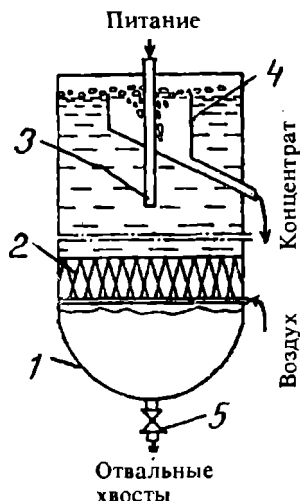


Рис. 6.4. Пневматическая флотомашини ФП-40:

1 - камера; 2 - трубчатый эластичный аэратор; 3 - устройство для подачи питания; 4 - желоб для разгрузки концентрата; 5 - устройство для разгрузки хвостов

Чорух-Дайронская обогатительная фабрика

На фабрике перерабатывают два типа руды: медно-молибдено-вольфрамовую и медно-молибденовую. Медно-молибдено-вольфрамовая руда представлена гранодиоритами, содержащими кварц и другие минералы; медно-молибденовая руда - пироксенами, амфиболами и хлоритизированной породой. Основные промышленные минералы - шеелит, молибденит, халькопирит. Шеелит образует весьма неравномерную вкрапленность в пироксенах и амфиболах. Размер кристаллов шеелита от 0,05 до 0,15 мм. Молибденит наблюдается в форме тонкопластинчатых выделений в кварце или полевом шпате; чаще образует гнездообразные или прожилковые агрегаты. Размер молибденита - 0,01-5,00 мм. Халькопирит находится в виде отдельных вкраплений или прожилковых скоплений в участках, обогащенных вкрапленностью пирита; ассоциирует преимущественно с пиритом в виде сростков, нередко в виде вклю-

чений в нем размером от 0,1 до 3 мм. Ковеллин, халькозин, борнит встречаются в виде зерен неправильной формы размером от 0,01 до 0,5 мм. Кроме меди, молибдена и вольфрама промышленно ценными компонентами являются золото и серебро.

Фабрика работает по схеме, включающей двухстадийное дробление до 20 мм, измельчение до крупности 50% класса -0,074 мм, коллективно-селективную флотацию. Каждый тип руды обогащается отдельно. Объединенный коллективный концентрат после перемешивания направляется на селекцию; хвосты коллективной флотации медно-молибденовой секции являются отвальными. Хвосты коллективной контрольной флотации вольфрамовой секции поступают на шеелитовую флотацию. Доводка шеелитового концентрата осуществляется гидрометаллургическим методом. В цикле селективной флотации депрессируются пирит, магнетит, минералы меди и пустой породы. В качестве депрессоров применяют сернистый натрий и жидкое стекло. Концентрат селективной флотации направляется в цикл молибденовой доводки, а хвосты селекции - на медную флотацию. На фабрике получают шеелитовый, медный

и молибденовый концентраты и отвальные хвосты шеелитовой и медно-молибденовой секций.

Усовершенствованный вариант пневматической флотомашины чанового типа ФП-10 (рис. 6.5), изготовленной в механической мастерской Чорух-Дайронского рудоправления, представляет собой камеру прямоугольного сечения с коническим дном, выполненную из листового стали. Большое внимание при конструировании и эксплуатации этого образца машины ФП-10 было уделено созданию рациональной конструкции загрузочного устрой-

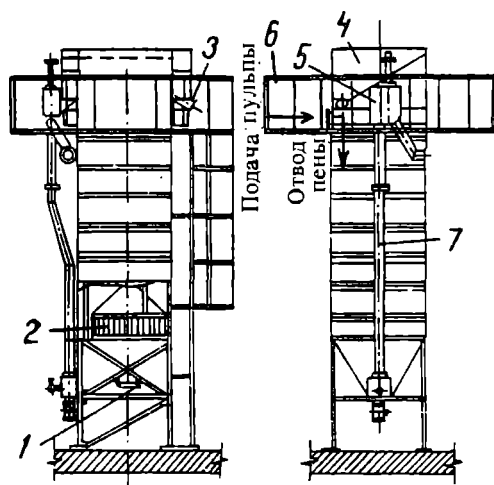


Рис. 6.5. Усовершенствованный вариант пневматической флотомашины ФП-10:

1 - вспомогательный аэратор; 2 - основной аэратор; 3 - желоб для разгрузки концентрата; 4 - корпус машины; 5 - шиберное устройство для регулирования уровня пульпы; 6 - карман для подачи исходного питания; 7 - разгрузочный карман для хвостов

ства, обеспечивающего равномерное распределение пульпы по всей ширине камеры и наиболее рациональный сьем пены. Разгрузочный карман аналогичен по своей конструкции подобным устройствам во флотомашинах других типов и снабжен специальным шибером для регулирования уровня пульпы в камере, а также приспособлением для сброса крупной песковой фракции камерного продукта. Подача воздуха в машину осуществлялась от рудничной компрессорной. В камере установлены два аэратора - основной и вспомогательный, последний используется при запуске машины в случае ее внезапной остановки под нагрузкой. Во вспомогательный аэратор предусмотрена подача воздуха и воды. Расход диспергируемого воздуха в рабочих условиях составлял около $0,7-1,2 \text{ м}^3$ на 1 м^3 поступающей в камеру пульпы, производительность по потоку пульпы машины ФП-10 - от 1 до $10 \text{ м}^3/\text{мин}$. Удельный расход воздуха на 1 т перерабатываемой руды в 3 раза меньше, чем в механических флотомашинах Механобр-6.

Конструктивные и технологические особенности этого образца машины ФП-10 позволяют легко регулировать процесс, а также осуществлять его комплексную автоматизацию, что практически невозможно при применении других типов флотационных машин, где автоматизации подвергаются отдельные, как правило, второстепенные операции. Существенное значение при оценке машин и аппаратов имеют не только технологические достоинства и особенности конструкции, но и расход материалов для изготовления. С этой точки зрения машина ФП-10 обладает существенным преимуществом. Так, масса ее одной камеры составляет 3,4 т, в то время как аналогичная по объему механическая машина Механобр-6 весит 14,2 т.

Промышленные испытания усовершенствованного варианта флотомашины ФП-10 на Чорух-Дайронской обогатительной фабрике проводились в цикле контрольной медно-молибденовой флотации на хвостах основной и контрольной флотации для доизвлечения меди и молибдена, а также на дофлотации благородных металлов из отвальных хвостов. В цикле контрольной медно-молибденовой флотации машина ФП-10 сравнивалась с 6-камерной машиной Механобр-6 объемом $19,6 \text{ м}^3$.

Из приведенных в табл. 6.7 данных видно, что в цикле контрольной медно-молибденовой флотации машина ФП-10 (одна камера) заменяет шесть камер машины Механобр-6 при идентичных условиях флотации, но меньшем времени флотации.

Для дофлотации благородных металлов из отвальных хвостов они предварительно классифицировались в короткокonusном гидроциклоне. Шламная фракция сбрасывалась в отвал, а песковая поступала во фло-

Таблица 6.7

Результаты промышленных испытаний флотомашин Механобр-6 и ФП-10 в цикле контрольной медно-молибденовой флотации

Флотомашина, расход реагентов, г/т	Производительность по питанию		Содержание в питании, %		Время флотации, мин	Продукт	Выход, %	Содержание, %		Извлечение, %	
	т/ч	м ³ /мин	твердого	класса, мм				Мо	Сu	Мо	Сu
Механобр-6	36,07	1,6	30,2	58-62	12,2	Хвосты основной флотации	100,0	0,015	0,077	100,0	100,0
Кх-5						Концентрат	4,32	0,126	0,65	36,48	36,52
ЖС-40						Отвальные хвосты	95,68	0,0099	0,05	63,52	63,48
Т66-20											
ФП-10	36,2	1,63	29,8	58-62	6,1	Хвосты основной флотации	100,0	0,016	0,08	100,0	100,0
Кх-5						Концентрат	4,75	0,14	0,68	41,61	40,42
ЖС-40						Отвальные хвосты	95,25	0,0098	0,05	58,39	59,58
Т66-20											
ФП-10	40,5	2,13	26,3	55-58	4,7	Хвосты контрольной флотации	100,0	0,009	0,064	100,0	100,0
						Концентрат	2,25	0,16	0,85	38,84	29,8
						Отвальные хвосты	97,75	0,0058	0,046	61,16	70,2
ФП-10	34,32	1,84	25,9	55-58	5,4	Хвосты контрольной флотации	100,0	0,013	0,056	100,0	100,0
Кх-20						Концентрат	2,87	0,188	0,54	41,88	27,53
Т66-20						Отвальные хвосты	97,13	0,0077	0,042	58,12	72,47
ФП-10	35,24	1,52	30,8	57-59	6,5	Хвосты контрольной флотации	100,0	0,0084	0,054	100,0	100,0
						Концентрат	3,64	0,082	0,28	35,6	18,7
						Отвальные хвосты	96,36	0,0056	0,046	64,4	81,3

Таблица 6.8
распределение золота в отвальных хвостах, %

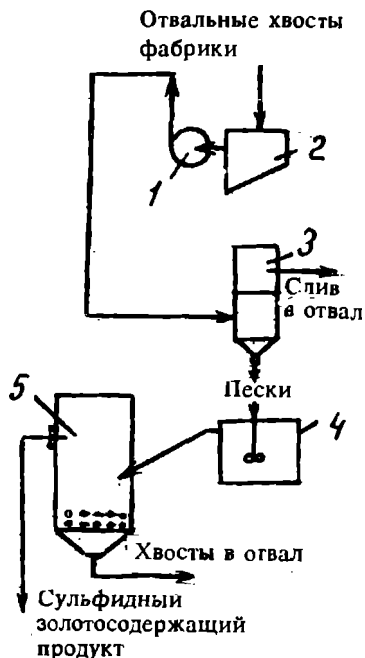
Формы нахождения золота	Распределение
Вскрытое, с чистой поверхностью	15,6
В сростках (извлекаемое цианированием)	43,6
Покрытое пленками и ассоциированное с окисленными минералами	9,4
Ассоциированное с сульфидами	7,5
Тонковкрапленное в кварце	23,7
Всего	100,0

Таблица 6.9
Результаты дофлотации благородных металлов из отвальных хвостов, %

Продукт	Выход	Извлечение	
		Au	Ag
Концентрат	0,33	34,30	19,92
Хвосты	15,47	30,15	25,23
Пески гидроциклона	15,80	64,45	45,15
Слив гидроциклона	84,20	35,55	54,85
Исходный	100,00	100,0	100,0

Рис. 6.6. Схема цепи аппаратов промышленных испытаний пневматической флотомашины ФП-10 для доизвлечения ценных компонентов из отвальных хвостов на Чорух-Дайронской обогатительной фабрике:

1 - зумпф; 2 - насос; 3 - гидроциклон diam. 500 мм; 4 - контактный чан; 5 - флотомашина ФП-10



томашину ФП-10 (рис. 6.6).

Формы нахождения и распределения золота в отвальных хвостах и результаты дофлотации благородных металлов из них приведены в табл.

6.8 и 6.9.

Результаты промышленных испытаний на Чорух-Дайронской обогатительной фабрике показали возможность доизвлечения меди и молибдена в цикле контрольной флотации и благородных металлов из отвалных хвостов.

Флотомашина ФП-10 защищена авторским свидетельством N 867424.

Сорская обогатительная фабрика

Фабрика перерабатывает медно-молибденовые руды одноименного месторождения. Основная часть руды представлена пегматитами с преобладанием в них полевого шпата над кварцем со значительным количеством слюды - биотита и серицита. Самым распространенным минералом в руде является полевой шпат, в меньших количествах - кварц, кальцит, флюорит, апатит, тальк и другие. Из рудных минералов присутствуют пирит, молибденит, халькопирит, галенит, сфалерит, магнетит. Основными минералами, имеющими промышленное значение, являются молибденит и халькопирит.

Технологическая схема фабрики включает трехстадиальное дробление до 16 мм с предварительным грохочением перед третьей стадией и контрольным грохочением; измельчение до крупности 45% класса -0,074мм; коллективно-селективную флотацию. Коллективный медно-молибденовый концентрат доизмельчается до крупности 75% класса -0,074 мм и поступает на селективную флотацию, осуществляемую с депрессией пирита, минералов меди и пустой породы сернистым натрием и жидким стеклом. Концентрат второй перечистки селективной флотации направляется в цикл молибденовой доводки, а хвосты селекции - в цикл доводки медного концентрата, куда подаются те же реагенты, что и на селективную флотацию, а в цикл медной доводки дополнительно - известь.

Приведенная схема позволяет получить молибденовый концентрат с содержанием 47-48% Мо при извлечении не ниже 88,8% и медный концентрат с содержанием 15-18% Cu при извлечении не ниже 45% от исходной руды.

На фабрике установлены флотационные машины механического ФМР-25 (объем камеры 3,2 м³) и пневмомеханического типов ФПР-40 (объем камеры 2,8 м³).

На Сорской обогатительной фабрике проведены промышленные испытания пневматической чановой флотомашины ФП-40, изготовлен-

ной в мастерских Сорского комбината.

Машина ФП-40 (рис. 6.7) представляет собой цилиндрический корпус с коническим дном, внутри которого имеются два аэратора: основной, изготовленный из перфорированных резиновых трубок, и вспомогательный - из набора резиновых шайб. Вспомогательный аэратор служит для предотвращения оседания крупного материала на дне машины, а также для запуска ее под нагрузкой в случае длительных остановок.

Исходная пульпа поступает в верхней части машины в подпленный слой через кольцевой периферийный загрузочный желоб, позволяющий равномерно распределять ее по всему сечению камеры. Загрузка машины может осуществляться в центре и комбинированно. Концентрат разгружается самоотекм через сливной порог в кольцевой желоб, хвосты - через нижнее разгрузочное устройство. Машина снабжена устройством автоматического контроля уровня пульпы.

На первом этапе машина ФП-40 испытывалась в цикле основной коллективной медно-молибденовой флотации в двух вариантах с самоотечным и принудительным съемами пены, а также с центральной и периферической загрузкой (рис. 6.8). Одна машина ФП-40 в цикле основной флотации заменяла как 12 камер флотомашин ФМР-25, так и 12 камер машины ФПР-40 (табл. 6.10).

Сравнительные испытания проводились при производительности машин по потоку пульпы, $\text{м}^3/\text{мин}$: ФП-40 - от 2 до 6; ФПР-40 - от 4 до 6; ФМР-25 - от 2 до 4. Содержание твердого в исходном питании составляло 40-42%, крупность измельчения - 13-17% класса +0,21 мм и 43-48% класса -0,074 мм, рН - 9-10,5.

Расход воздуха на машины составлял, $\text{м}^3/\text{мин}$ на 1 м^3 объема камеры: ФПР-40 - 0,8-0,9; ФП-40 - 0,2. За период испытаний удельная потребляемая мощность, отнесенная к 1 м^3 объема камеры, составила,

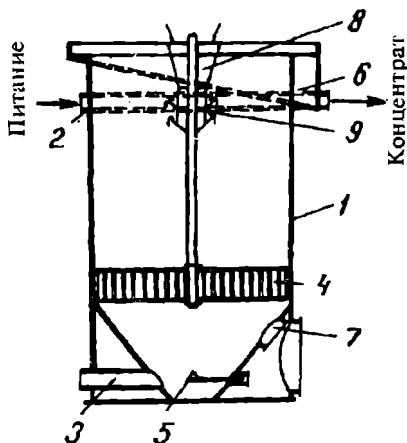


Рис. 6.7. Пневматическая флотомашин ФП-40:

1 - камера; 2 - периферийный загрузочный желоб; 3 - разгрузка хвостов; 4 - основной аэратор; 5 - вспомогательный аэратор; 6 - желоб для разгрузки концентрата; 7 - люк для осмотра машины; 8 - пеноотбойник; 9 - вспомогательный аэратор

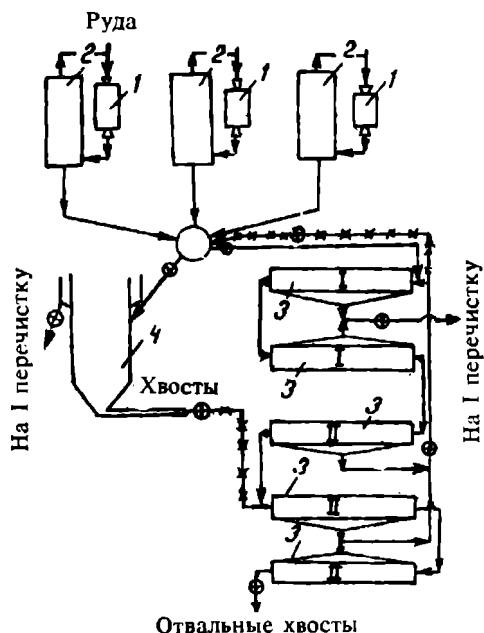


Рис. 6.8. Схема цепи аппаратов промывочных испытаний пневматической флотомашины ФП-40 на Сорской обогатительной фабрике:

1 - шаровые мельницы; 2 - спиральные классификаторы; 3 - машины ФПР-40; 4 - машины ФП-40

● - точки отбора проб; ж - питание машины ФП-40; / - основная медно-молибденовая флотация; II - контрольная медно-молибденовая флотация

Таблица 6.10

Техническая характеристика флотомашин, установленных на Сорской обогатительной фабрике

Параметры	ФМР-25	ФПР-40	ФП-40
Длина камеры, м	2,2 (26,4)*	2,2 (26,4)	3,5
Занимаемая площадь, м ² /м ³ объема камеры	1,26	1,09	0,3
Объем камеры, м ³	2,5	3,2	40,0
Масса камеры, кг	710	500	250
Расход воздуха, м ³ /мин	1,88	2,21	1,2
Расход электроэнергии, кВт·ч	1,2	2,0	0,4
Количество, шт.:			
камер	12	12	1
электродвигателей	14	14	1

* В скобках указана общая длина 12 камер.

кВт: для ФП-40 - 1,3; для ФПР-40 - 3,8.

Рабочий объем 12-камерной машины ФПР-40 составил 28,8 м³. При испытаниях рабочий объем машины ФП-40 доводился до 29 м³ путем подъема аэратора на 500 мм от его нижнего положения. При сравнительных испытаниях в машины ФПР-40 и ФМР-25 реагенты подавались полностью и контактированию подвергался весь материал, а при подключении машины ФП-40 только 60% питания контактировало с реагентами, причем сернистый натрий в основную флотацию не подавался.

Первая и вторая секции, оборудованные машинами ФМР-25 и ФПР-40, соответственно состояли из 12 камер в основной флотации и 18 камер - в контрольной; третья секция - из 1 камеры

машины ФП-40 в основной флотации и 18 камер ФПР-40 - в контрольной.

Изменение дебита потока исходного питания от 2 до 4 м³/мин не влияло на технологические показатели работы машины ФП-40, что является отличительной положительной чертой по сравнению с многокамерными флотационными машинами механического и пневмомеханического типов. Результаты работы машины ФП-40 практически идентичны результатам, полученным в машинах ФМР-25 и ФПР-40 (при одинаковом их объеме). В машине ФП-40 качество концентрата выше, что объясняется низкой турбулентностью потоков пульпы и большой частотой столкновения частиц с пузырьками, достаточной для их минерализации и выпадения механически захваченных частиц породы в камерный продукт (табл. 6.11). Приведенные результаты получены на опытном промышленном образце машины ФП-40 при первом освоении методов ее регулирования в условиях частого изменения режима работы. При отработке условий ведения процесса и надлежащем подборе реагентного режима машина ФП-40 обеспечивает более высокие показатели.

Таблица 6.11

Результаты испытаний различных типов флотомашин в основной флотации, %

Показатели	ФМР-25	ФПР-40	ФП-40
I период			
Содержание Мо в питании	0,0685	0,0687	0,0623
Выход концентрата	7,317	7,075	4,36
Содержание Мо в:			
концентрате	0,85*	0,90*	1,313**
хвостах	0,0068	0,0054	0,0054
Извлечение Мо (от питания)	90,79	92,68	91,88
II период			
Содержание Мо в питании	0,0685	0,063	0,065
Выход концентрата	7,317	5,99	4,25
Содержание Мо в:			
концентрате	0,85*	0,97*	1,40**
хвостах	0,0068	0,0052	0,0056
Извлечение Мо (от питания)	90,79	92,22	91,54
III период			
Содержание Мо в питании		0,064	0,065
Выход концентрата		5,27	4,72
Содержание Мо в:			
концентрате		1,08	1,22
хвостах		0,0074	0,0077
Извлечение Мо (от питания)		88,90	88,46

* Концентрат направляли на перешлифку, где извлечение снижалось на 0,7-1,3%.

** Концентрат направляли непосредственно в цикл селективной флотации.

Предварительный технико-экономический анализ, выполненный по результатам относительно длительных промышленных испытаний на первом этапе, показывает, что установка только одной камеры машины ФП-40 взамен 12 камер ФМР-25 или ФПР-40 за счет снижения энергетических и эксплуатационных затрат, повышения качественных показателей, уменьшения занимаемых площадей, надежности и простоты обслуживания обеспечит большой экономический эффект.

На втором этапе исследований на одной из секций фабрики были установлены последовательно две машины ФП-40 в увязке (рис. 6.9) с действующей схемой флотации: одна - в основной коллективной флотации, вторая - в контрольной медно-молибденовой, хвосты которой направлялись в голову четвертой контрольной флотации другой секции, что не позволило определить необходимое количество камер ФПР-40

для получения отвальных хвостов. Кроме того, на опытную секцию работали только две мельницы (использование 3-й мельницы было связано с серьезной реконструкцией), а на этапную секцию - три мельницы, поэтому изучить работу машин ФП-40 на различных нагрузках не представилось возможным.

Одновременно с отбором проб измерялись производительность по потоку пульпы, расход реагентов, воздуха и его давление в аэраторах

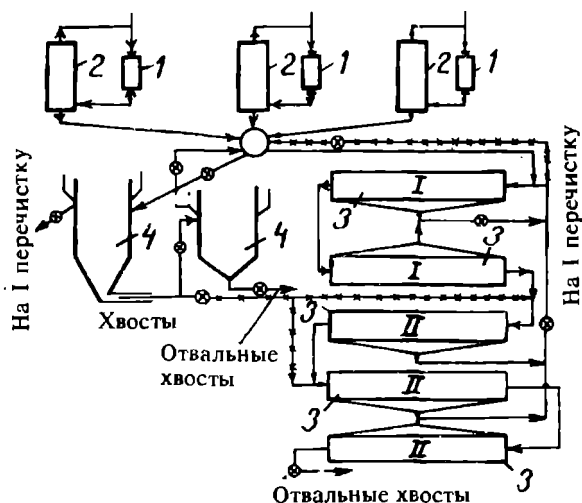


Рис. 6.9. Схема цепи аппаратов промышленных испытаний двух пневматических флотомашин ФП-40 на Со-рской обогатительной фабрике:

1 - шаровые мельницы; 2 - спиральные классификаторы; 3 - машины ФПР-40; 4 - машины ФП-40; ● - точки отбора проб; ⊗ - питание машины ФП-40; I - основная медно-молибденовая флотация; II - контрольная медно-молибдено-вая флотация

(табл. 6.12). Точки отбора проб (см. рис. 6.9) - слив классификатора каждой мельницы; кольцевой желоб сливной трубы коллективного концентрата; разгрузочный карман хвостов 1-й машины ФП-40; кольцевой разгрузочный желоб концентрата 2-й машины ФП-40; разгрузочный карман хвостов 2-й машины ФП-40. Реагенты (керосин, бутиловый ксантогенат ОПСБ и МИБК) подавались в виде эмульсии в измельчение и машину ФП-40.

Как показали испытания, наиболее эффективна работа пневматических машин в сочетании с предварительной агитацией пульпы в контактном чане. На эталонной секции роль контактного чана выполняла первая камера каждой машины, а на опытной секции контактного чана не было, поэтому большую часть реагентов подавали в мельницы.

Как следует из данных табл. 6.12, получить отвальные хвосты по молибдену (основному товарному продукту, стоимостная доля которого составляет 97%) не удалось. Потери молибдена в хвостах контрольной флотации в машине ФП-40 происходят в классе +0,160 мм за счет как частично раскрытых, так и нераскрытых сростков с нерудными минералами, а в классе -0,16 мм - за счет единичных сростков и свободных зерен молибденита. Медь теряется в классе +0,16 мм за счет сложных сростков медных минералов с нерудными, а в классах -0,16 +0,074 мм и -0,074 +0,032 мм - в основном за счет свободных зерен и сростков халькопирита с нерудными минералами и отчасти с пиритом и магнетитом. В классе -0,032 мм медь теряется до 80% за счет свободных зерен медных минералов (халькопирита, ковеллина и др.). Прирост извлечения молибдена от руды при дофлотации хвостов машиной ФП-40 составил 4,7%, меди - 7%, то есть для достижения фабричных показателей фронт флотации, состоящий из двух флотомашин ФП-40, недостаточен.

На основании результатов промышленных испытаний второго этапа установлено, что пневматическая машина чанового типа ФП-40 в сравнении с машинами ФПМ-25 и ФПР-40 дает более богатые по качеству концентраты при более низком (на 3-5%) извлечении; объемная производительность машин ФП-40 на 30% ниже машин ФПР-40, а потребляемая мощность составляет 60% их мощности. Машина ФП-40 имеет малую установочную площадь на 1 м³ объема.

Полученные показатели достигнуты на недостаточно освоенных машинах новой конструкции при отсутствии предварительного контакта с реагентами и неотработанного реагентного режима. Для получения более высоких показателей необходима была установка на секции третьей флотомашин ФП-40.

Поэтому на имеющихся свободных площадях фабрики была смонти-

Таблица 6.12

Основные параметры работы опытной и эталонной секций

Секция	Количество смен	Производительность		Содержание в питании, %	Расход реагентов, г/т				Рабочий объем машины, м ³	Время флотации, мин	Расход воздуха, м ³ /мин
		т/ч	по потоку пы, м ³ /мин		кислород	бутиловый ксантогенат	МИБК + ОПСБ	сернисто натрия			
Эталонная	36	140	4,3	39,0	45,0	65,0	2,9	27,8	76,7	21,7	61,0
Эталонная	36	140	4,3	39,0	35,0	60,0	2,7	25,2	46,8	13,0	37,0
Эталонная	12	103	3,6	36,5	44,0	65,0	2,9	27,8	76,7	21,3	61,0
Опытная	52	100	3,3	37,5	44,0	90,0	3,0	47,2	64,0	19,4	23,8
Опытная	34	100	3,3	36,8	45,0	86,8	3,1	48,8	64,0	19,4	23,9
Опытная	18	100	3,3	38,8	43,0	82,9	3,3	44,3	64,0	19,4	23,6

Таблица 6.13

Технологические показатели работы опытной и эталонной секций, %

Секция	Содержание				Извлечение в концентрат			
	Питание		Концентрат		Хвосты		Мо	
	Mo	Cu	Mo	Cu	Mo	Cu	Mo	Cu
Эталонная	0,0583	0,062	0,89	0,73	0,0052	0,0166	91,09	73,2
Эталонная	0,0583	0,062	0,89	0,73	0,0078	0,0220	86,80	64,5
Эталонная	0,0580	0,063	0,65	0,60	0,0053	0,0140	90,90	77,0
Опытная	0,0640	0,067	1,65	1,10	0,0083	0,0220	86,60	67,1
Опытная	0,0650	0,065	1,30	1,31	0,0081	0,0176	88,50	72,9
Опытная	0,0600	0,069	1,30	1,69	0,0104	0,0310	82,90	55,0

рована самостоятельная секция, оборудованная тремя машинами ФП-40 общим объемом 110 м^3 , в которых осуществлялись основная и контрольная флотации с получением отвальных хвостов и грубого концентрата (рис. 6.10).

Машины ФП-40 были оснащены системами автоматического поддержания заданного уровня пульпы и разгрузки хвостов, а также аэраторами из резиновых перфорированных элементов типа МБС размером 25×5 . Параллельно работала 30-камерная флотомашина ФПР-40 общим объемом 100 м^3 по той же схеме.

Исходным питанием на сравниваемых секциях являлся слив классификатора крупностью 37-44% класса $-0,074 \text{ мм}$ и 15-20% класса

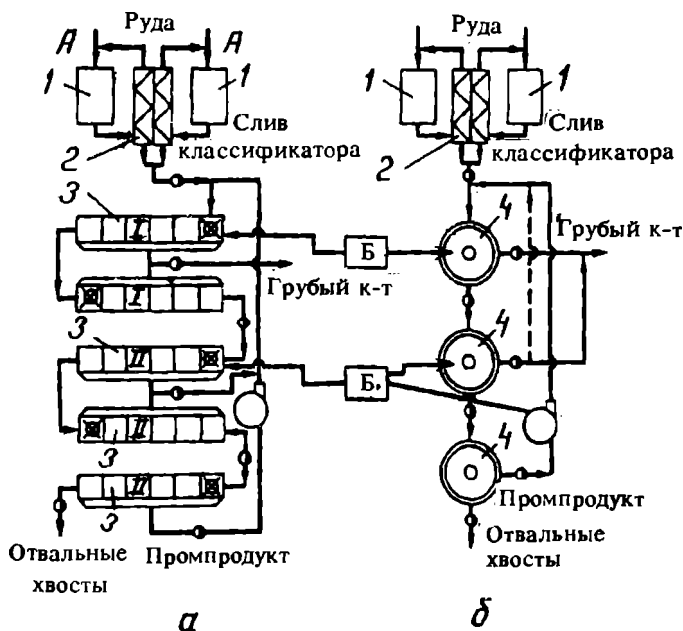


Рис. 6.10. Схема цепи аппаратов промышленных испытаний трех пневматических флотомашин на Сорской обогатительной фабрике:

а - схема измельчения и коллективной флотации в машинах ФПР-40; б - схема измельчения и коллективной флотации в машинах ФП-40; 1 - шаровая мельница; 2 - классификатор; 3 - флотомашина; 4 - насос; 5 - точки отбора проб.

Реагентный режим: А - керосин, ОПСБ; Б - Na_2S , ксантогенат, керосин, ОПСБ, жидкое стекло;

I - основная медно-молибденовая флотация; II - контрольная медно-молибденовая флотация

+0,21 мм с содержанием твердого 38-45% при производительности по потоку пульпы 3,5 м³/мин и более при идентичном расходе реагентов.

С применением машин ФП-40 получен богатый молибденовый концентрат при более низком извлечении, чем в машинах ФПР-40, что обусловлено отсутствием предварительного кондиционирования исходного питания с реагентами.

В начале процесса флотации наблюдается существенное отставание извлечения металлов в машинах ФП-40 по сравнению с машинами ФПР-40, а в конце процесса флотации извлечение металлов становится практически одинаковым (рис. 6.11). Кроме того, в исходном питании, поступающем на секцию машин ФП-40, содержание труднофлотируемого класса +0,21 мм было на 2-5% выше, а класса -0,074 мм - на 2-3% ниже, чем в исходном питании, поступающем на секцию машин ФПР-40 (табл. 6.14). Это также отрицательно отразилось на результатах работы секции, оборудованной машинами ФП-40. Изданных табл. 6.14 следует, что с уменьшением крупности извлечение возрастает.

Во время испытаний в длительном непрерывном режиме отказа в работе узлов машин ФП-40 не наблюдалось, аэрирующие элементы не имели износа и разрывов, система автоматического поддержания уровня пульпы в машине работала надежно и устойчиво. Расход электроэнергии, занимаемые производственные площади и металлоемкость для

сравниваемых машин ФП-40 и ФПР-40 соответственно составили: 2,4 и 4,5 кВт·ч/т; 150 и 440 м²; 0,25 и 0,5 т/м³.

По результатам испытаний на Сорской обогатительной фабрике установлено, что применение пневматических флотомашин позволяет при одинаковом извлечении повысить качество концентрата, снизить расход электроэнергии, металлоемкость и высвободить производственные площади, кроме того, в конструкции машины ФП-40 внесены усовершенствования, обеспечивающие

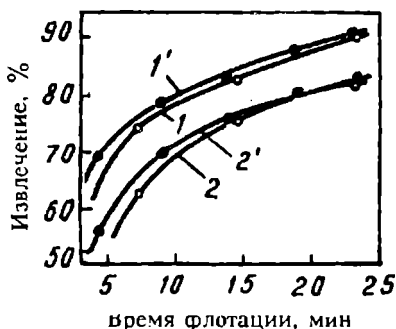


Рис. 6.11. Зависимость извлечения молибдена и меди в концентрат от времени флотации:

1', 2' - в машинах ФП-40; 1, 2 - в машинах ФПР-40;

—○— — извлечение Cu; —●— — извлечение Mo

Таблица 6.14

распределение молибдена по классам крупности в продуктах флотации в машинах ФП-40 и ФПР-40, %

Крупность, м.к	Питание		Отвальные хвосты		Извлечение Мо в концентрат	
	выход	распреде- ление	выход	распреде- ление	от класса	от питания
ФП-40						
+0,30	8,5	3,2	11,0	19,7	38,5	1,2
+0,21	8,3	3,8	10,6	16,1	58,3	2,2
+0,16	14,3	7,5	15,6	19,4	74,1	5,6
+0,074	22,8	19,6	24,5	13,5	93,1	18,2
+0,05	3,3	3,5	3,2	2,2	93,6	3,3
-0,051	42,8	62,4	35,1	29,1	95,3	59,5
ФПР-40						
+0,30	6,2	1,6	8,1	10,9	38,5	0,6
+0,21	7,6	2,6	9,6	11,5	58,6	1,6
+0,16	14,0	7,2	15,4	16,1	79,3	5,7
+0,074	22,6	17,9	22,4	17,1	91,3	16,3
+0,051	3,9	4,4	3,9	2,3	95,2	4,2
-0,051	45,7	66,3	40,1	42,1	94,1	62,4

поддержание твердой фазы во взвешенном состоянии в зависимости от времени флотации, требуемого для крупных частиц.

Жирекенская обогатительная фабрика

Рудной базой обогатительной фабрики служат молибденовые руды одноименного месторождения. Месторождение характеризуется большими запасами и простым вещественным составом руды, относительно высоким содержанием чистого крупночешуйчатого молибденита, извлечение которого может обеспечить получение молибденового концентрата высокого качества, пригодного для применения в вакуумной технике и при синтезе полупроводников с заданными свойствами; присутствуют повеллит, молибдит. Основным промышленным минералом является молибденит. На долю окисленных форм приходится до 40% от общего содержания молибдена в руде. Размер зерен молибденита от 0,01 до 0,1 мм. Медные минералы представлены халькопиритом, халькозином, ковеллином, купритом, блеклой рудой. Содержание меди в руде около 0,1%, молибдена - от 0,055 до 1,5%. Вмещающие породы на 60% представлены калиево-натриевыми полевыми шпатами. Руды характеризуются наличием большого количества глинистого материала.

Обогатительная фабрика построена по проекту института "Механобр", включающему ряд прогрессивных решений, учитывающих особенности минералогического состава перерабатываемой руды. Так, например, в схему рудоподготовки включены операции мокрого рудного

самоизмельчения крупнодробленой руды, додробливание продукта критической крупности в инерционных дробилках. Впервые в цветной металлургии в проекте предусмотрена установка большеобъемных флотационных пневматических машин чанового типа ФП-10 и ФП-80. Первая очередь Жирекенской обогатительной фабрики введена в действие в 1988 г., вторая очередь - в 1989 г.

Одностадийное дробление руды до крупности 300 мм осуществляется в щековой дробилке. Дробленая руда ленточным конвейером загружается в два бункера силосного типа, из которых пластинчатыми питателями и системой ленточных конвейеров подается в мельницу мокрого самоизмельчения диам. 9 м, объемом 180 м³. Разгрузка мельницы поступает в спиральный классификатор, пески которого направляются в шаровую мельницу, работающую в замкнутом цикле с гидроциклоном

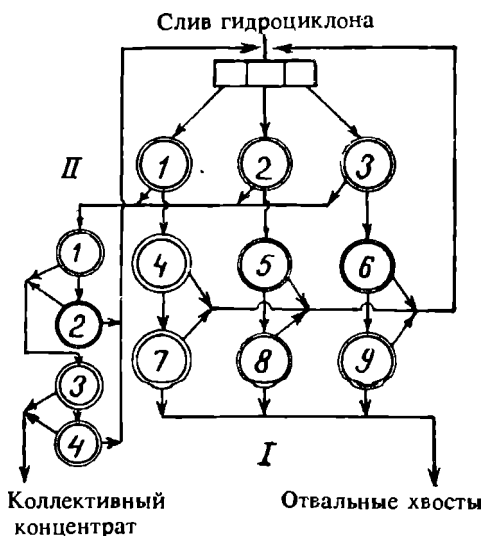


Рис. 6.12. Схема цепи аппаратов промышленных испытаний пневматических флотомашин ФП-80 и ФП-10 на Жирекенской обогатительной фабрике:

I - секция, оборудованная машинами ФП-80: 1, 2, 3 - основная молибденовая флотация; 4, 5, 6 - 1-я контрольная флотация; 7, 8, 9 - 2-я контрольная флотация;

II - секция, оборудованная машинами ФП-10: 1, 2 - 1-я перемешивающая флотация; 3 - 2-я перемешивающая флотация; 4 - контрольная флотация

диам. 1000 мм. Измельчение осуществляется до крупности 61% класса - 0,074 мм. Пульпа двух- и трехструйными пульподелителями направляется в цикл флотационного обогащения, включающий коллективную молибденово-медную флотацию, две перемешивающие концентрата и две контрольные флотации хвостов. В коллективном цикле флотации в каждой секции установлено девять пневматических машин ФП-80 и четыре флотомшины ФП-10, изготовленные Усольским заводом горного оборудования (см. гл. I, рис. 1.18 и рис. 6.5).

Флотомшины ФП-80 на каждой секции размещены по три в три параллельно работающих нитки, из которых одна является резервной (рис. 6.12). В каждой

нитке машины расположены каскадно с перепадом по высоте 1,5-1,6 м. В первой нитке машин ФП-80 (1, 2, 3) осуществляется основная коллективная флотация, в двух последующих - первая (4, 5, 6) и вторая (7, 8, 9) контрольные флотации.

Флотомашины ФП-10 расположены в одну нитку тоже каскадно с перепадом по высоте 1,5 м. В этих машинах осуществляется первая (1, 2), вторая (3) перечистки коллективного концентрата и контрольная флотация (4).

Для обеспечения пневматических машин сжатым воздухом установлен центробежный нагнетатель Э200-31-1, паспортная характеристика которого приведена ниже:

Производительность, м ³ /мин	200
Давление, Па:	
начального всасывания	$0,9807 \cdot 10^{-5}$
нагнетателя	$2,94 \cdot 10^{-5}$
Мощность, кВт:	
потребляемая	460
установочная	580

Полученный концентрат после второй перечистки с помощью пульпоподъемной камеры перекачивается в цикл селекции; камерные продукты возвращаются в трехструйный пульподелитель и затем в голову процесса. Селекция коллективного концентрата осуществляется в механических флотомашинах ФМР-10 и ФМР-2,5.

Еще в начальный период работы Жирекенской обогащательной фабрики отмечался недостаточный фронт в цикле селективной флотации, который не обеспечивал получение стабильных показателей: извлечение молибдена в цикле селекции колебалось от 60 до 95%.

С целью стабилизации работы цикла селекции институтом "Гинцветмет" были выданы рекомендации по расширению фронта основной молибденовой флотации с установкой флотационной пневматической машины ФП-6,3 в дополнение к действующим. Выбор типа флотационной техники обусловлен отсутствием в достаточном количестве производственных площадей, в то время как флотомашины чанового типа, занимая относительно мало места, в полном объеме позволяют использовать высоту здания. До настоящего времени в литературных источниках не было сведений об использовании этих флотов машин в цикле селекции молибденово-медных концентратов. Флотационная пневматическая машина ФП-6,3 (рис. 6.13) изготовлена на фабрике по чертежам, разработанным в институте "Гинцветмет". Флотомашина ФП-6,3 оборудована аэратором кольцевого типа с диспергирующим элементом. В период

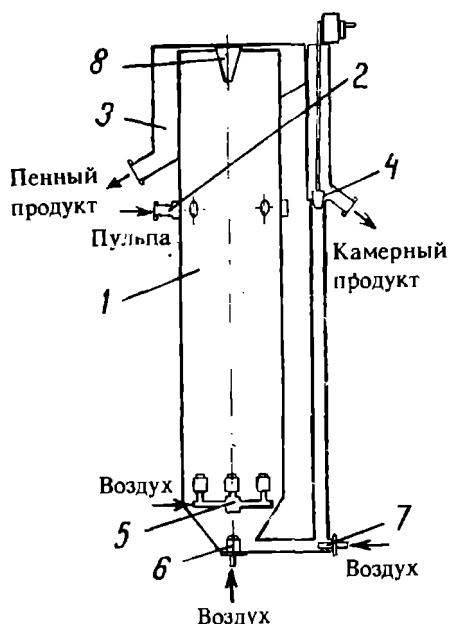


Рис. 6.13. Пневматическая флотомашина ФП-6,3:

1 - камера; 2 - загрузочное устройство; 3 - пенный желоб; 4 - разгрузочное устройство; 5 - основной аэратор; 6 - вспомогательный аэратор; 7 - эрлифтный аэратор; 8 - пеноотражатель

концентрат составило 86,51-91,72%.

Таким образом, на основании приведенных данных можно сделать вывод, что техническое решение по расширению фронта флотации цикла селективной флотации путем установки флотационной пневматической машины ФП-6,3 без значительных затрат обеспечило прирост извлечения молибдена в готовый концентрат на 6-8%.

В 1991 г. на Жирекенской фабрике прошла испытания машина ФП-1 в медном цикле. Медный цикл включает основную и контрольные флотации, четыре переотсадки медного концентрата после обработки его сернистым натрием и флотацию в машине ФП-1 с получением молибденового (пенный продукт) и медного (камерный продукт) концентратов при содержании, %: Cu - 16,3 и Mo - 21,6 в одноименных концентратах.

испытаний при давлении сжатого воздуха 0,05-0,10 МПа расход диспергированного воздуха в камеру флотомашин составил от 1,0 до 3,5 м³/мин (см. гл. 2, рис. 2.14 и 2.17). Флотационная пневматическая машина ФП-6.3 принята в промышленную эксплуатацию на Жирекенской обогатительной фабрике в 1990 г.

В различные периоды работы фабрики были проведены опробования усовершенствованной схемы цикла селективной флотации в сравнении с проектной схемой (рис. 6.14). За период испытаний извлечение молибдена в готовый кондиционный концентрат составило по усовершенствованной схеме 94,3-97,8%, причем на долю флотомашин ФП-6,3 приходится 88,21-91,40% при содержании 28,27-35,88%. В те же периоды работы обогатительной фабрики по проектной схеме извлечение молибдена в

Флотационная машина ФП-1 (рис. 6.15) изготовлена также по чертежам Гинцветмета непосредственно на фабрике из труб стандартного диаметра, аэратор - из перфорированной эластичной резиновой трубки размером 25х5 мм, навитой по спирали. Технические характеристики флотомашин ФП-1 и ФП-6,3, прошедших испытания на Жирекенской обогатительной фабрике, приведены в табл. 6.15.

Разработаны и готовятся к промышленной эксплуатации на фабрике оригинальные конструкции каскадной ФП-220 и пульсационной флотационных пневматических машин (см. гл. 1, рис. 1.19 и рис. 1.20), обеспечивающих те же технологические показатели при традиционной высоте аппарата.

Институтом "Гинцветмет" на фабрике выполнен комплекс работ по совершенствованию конструкций пневматических флотационных машин в целях повышения их удельной производительности, сокращения энергоемкости (рис. 6.16), упрощения конструкций, сокращения производственных площадей, создания оптимальных условий для минерализации пузырьков воздуха, равномерного распределения воздуха по объему камеры, возможности регулирования расхода и диспергирования воздуха, повышения эффективности обогащения минералов предельных классов крупности.

Для решения указанных задач наиболее перспективными являются флотационные пневматические машины чанового типа, работающие по принципу противоточного движения минеральных частиц и пузырьков

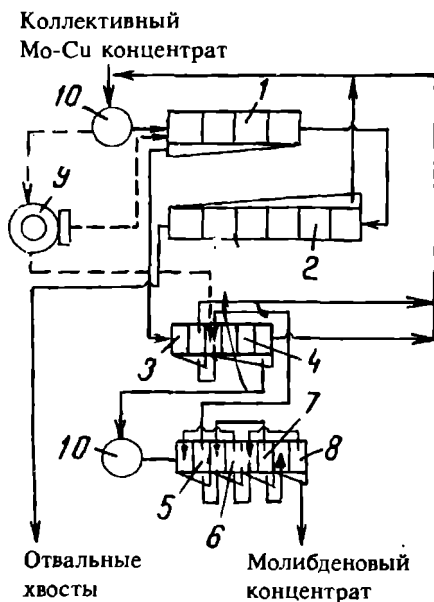


Рис. 6.14. Схема цепи аппаратов промышленных испытаний пневматической флотационной машины ФП-6,3 в цикле селекции медно-молибденовых концентратов на Жирекенской обогатительной фабрике:

1 - основная молибденовая флотация; 2 - контрольная молибденовая флотация; 3, 4, 5, 6, 7, 8 - 1-я, 2-я, 3-я, 4-я, 5-я и 6-я переключки концентрата; 9 - машина ФП-6,3; 10 - контактные чаны

— проектная схема селекции; --- усовершенствованная схема селекции

Таблица 6.15

Техническая характеристика флотомашин ФП-1 и ФП-6.3, разработанных Гинцвелем и установленных на Жирекенской обогатительной фабрике

Параметры	ФП-1	ФП-6.3
Объем камеры, м ³	1,0	6,3
Производительность по потоку пульпы, м ³ /мин	До 0,33	До 1,5
Избыточное давление на входе в аэратор, МПа	0,15	0,15
Расход воздуха на камеру (без эрлифта), м ³ /мин	До 0,5	До 3,2
Удельная энергоемкость, кВт/м ³	-	-
Удельная металлоемкость, кг/м ³	580	343
Масса камеры, кг	580	2160
Габаритные размеры, мм:		
диаметр	500	1200
высота	5000	5000

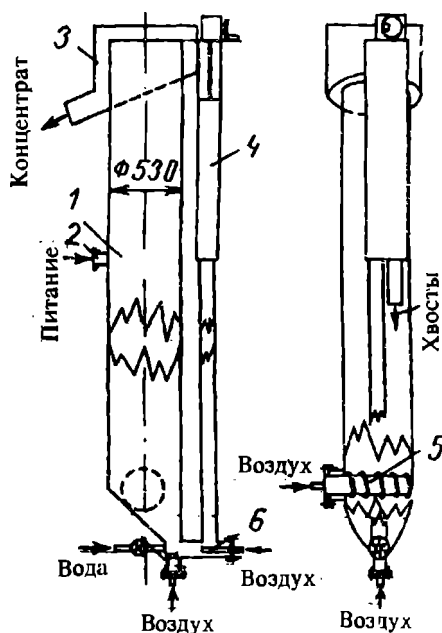


Рис. 6.15. Пневматическая флотомашина ФП-1:

1 - камера; 2 - загрузочное устройство; 3 - пенный желоб; 4 - разгрузочное устройство; 5 - трубчатый аэратор; 6 - вспомогательный кольцевой аэратор

воздуха. В противоточных пневматических флотационных машинах обеспечиваются высокая вероятность столкновения частиц с пузырьками воздуха, высокая вероятность слипания и сохранности минерализованных комплексов пузырек - частица. Другой особенностью флотационных пневматических машин противоточного типа является удаленность подачи питания в зоне минерализации от разгрузки камерного и пенного продуктов, что способствует повышению эффективности флотации и возможности использования процессов вторичной концентрации в пенном слое. В противоточных машинах в связи с отсутствием специальных перемешивающих устройств для поддержания частиц во взвешенном состоянии не создаются турбулентные потоки пульпы, а следовательно, воз-

никающие инерционные силы, разрушающие комплекс пузырек-части-

ца, незначительны.

На фабрике были проведены работы по модернизации машин ФП-80 в цикле коллективной флотации при работе их под повышенной нагрузкой (рис. 6.17, рис. 6.18). Начато переоборудование флотационных пневматических машин ФП-80 с заменой кольцевых и трубчатых аэраторов газлифтными, изготовленными по чертежам института "Гинцветмет" (см. гл. 3, рис. 3.14).

Газлифтные аэраторы установлены на второй нитке флотомашин первой секции в коллективном цикле флотации. Результаты опробования второй нитки флотационных машин ФП-80, оснащенных аэраторами газлифтного типа, при работе в период испытаний с повышенной нагруз-

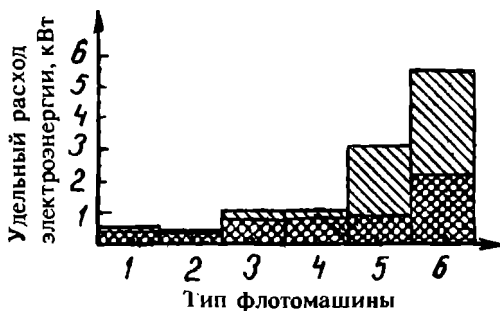


Рис. 6.16. Удельный расход электроэнергии при флотации во флотомашинах различных типов: 1 - ФП-80 (1 камера); 2 - ФП-80 (2 камеры); 3 - ФП-10; 4 - ФП-6,3; 5 - ФПМ-16 (1 камера); 6 - ФМ-10 (6 камер): - на 1 м³ объема питания; - на 1 т питания флотации

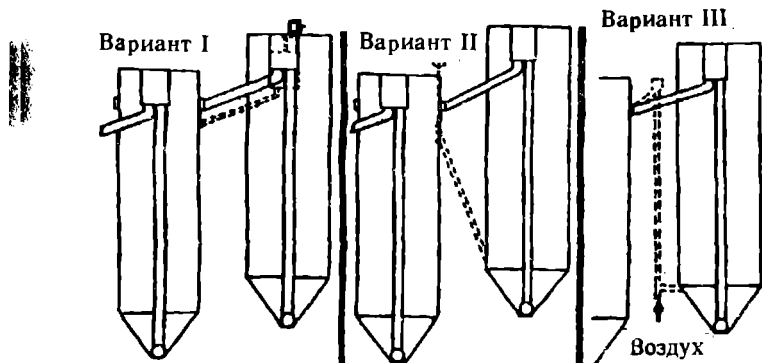


Рис. 6.17. Варианты модернизации пневматических флотомашин на Жирекенской обогатительной фабрике для увеличения пропускной способности:

вариант I - опускание разгрузочного кармана, врезка трубы диам. 325 мм в стенку кармана и дно кармана дополнительной трубы диам. 159-219 мм; вариант II - врезка дополнительной трубы диам. 159-219 мм в верхнюю часть камеры машины и ниже загрузочного пояса нижней части камеры машины; вариант III - установка дополнительного эрлифта

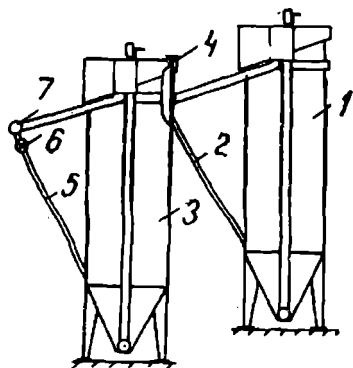


Рис. 6.18. Схема установки пневматической флотомашины ФП-80 в коллективной флотации на Жирекенской обогатительной фабрике для работы при повышенной нагрузке:

1 - камера машины для основной коллективной флотации; 2, 5 - дополнительные разгрузочные трубы; 3 - камера машины для 1-й контрольной флотации; 4 - шиберный механизм; 6 - шланговый затвор; 7 - хвостовая труба для подачи питания в машину ФПМ-16 2-й контрольной флотации

кой показали, что из питания флотации с содержанием молибдена 0,0796% получены коллективный концентрат с содержанием молибдена 3,042% при извлечении 66,42% и концентрат контрольной флотации с содержанием молибдена 0,558% при извлечении 10,35%. Таким образом, суммарное извлечение молибдена составило в обеих операциях 76,77%, что можно объяснить заглублением помолы до 61,93% вместо 70% по проекту. В концентрат коллективной флотации извлекается 56,34% класса +0,2 мм и 63,46% класса -0,2+0,14 мм, в концентрат контрольной флотации - 14,4 и 7,81% соответственно. Потери молибдена в хвостах первой контрольной флотации на 24,24% связаны с классом +0,2 мм и на 15,02% - с классом -0,2+0,14 мм.

Схема установки газлифтного аэратора в флотомашине ФП-80 приведена в гл. 1 на рис. 1.17. Сжатый воздух, подаваемый через патрубок и коллектор в пространство, образуемое внутренним и наружным корпусами, поступает через отверстия внутрь смесителя и создает область пониженного давления, то есть область эффективного засасывания пульпы через конус. Аэрированная пульпа с высокой скоростью устремляется вверх на отражательные диски, где происходит эффективное диспергирование воздуха и далее в камеру флотации. В отражательных дисках выполнены отверстия различных диаметров от большего (в нижней части) к меньшему (в верхней части), создавая условия для равномерного распределения пульпы, аэрированной воздухом, в объеме флотомашины. Газлифтные аэраторы обеспечивают более интенсивную флотацию ценного минерала. Установка газлифтного аэратора в машине ФП-80 при меньшем в 1,9 раза расходе воздуха обеспечивает более высокое извлечение молибдена в основной коллективной флотации по сравнению с нижним кольцевым и верхним трубчатым аэратором (рис. 6.19).

В период испытаний на фабрике в работе находились две нитки фло-

томашин, причем дополнительная машина отрегулирована на минимальную нагрузку - до 40-60 т/ч, а нагрузка на основную нитку повышалась постепенно до 280 т/ч. Дальнейшее повышение нагрузки было невозможно из-за конструктивных недоработок пульподелителя, который не справлялся с установленной на основную нитку нагрузкой, и резкого загрубления помола в цикле измельчения из-за недостаточного фронта классификации. Таким образом, работа основной нитки машин при повышенной

нагрузке в период промышленных испытаний осуществлялась при среднем потоке пульпы 13-15 м³/мин (220-240 т/ч). При этом не наблюдалось осаждения материала при повышенном потоке и загрубленном помоле. Машины работали надежно и стабильно. В период испытаний расход воздуха в машине ФП-80 основной операции составлял 11 м³/мин, контрольной - 13 м³/мин.

Проведенный на фабрике комплекс работ по совершенствованию и внедрению принципиально нового флотационного оборудования позволил увеличить извлечение молибдена в кондиционный концентрат.

Руководством фабрики принято решение о модернизации всех остальных ниток флотомашин обеих секций по предложенной схеме с решением вопроса о расширении фронта классификации для повышения нагрузки на мельницы ММС до 300 т/ч и обеспечения требуемой тонины помола 65-70 % класса -0,074 мм.

Тырнаузская обогатительная фабрика

Сырьевой базой Тырнаузской обогатительной фабрики являются вольфрамо-молибденовые (скарны и скарнированные мраморы) и молибденовые (роговики и гранитоиды) руды одноименного месторождения. В скарновых рудах главные рудные минералы представлены тонковкрапленными шеелитом, молибдошеелитом и молибденитом среди пироксенов, гранатов, кварца. В роговиках оруденение имеет штокверковый характер и связано с густой сетью кварцевых и других прожилков.



Рис. 6.19. Извлечение молибдена в цикле основной коллективной флотации во флотомашине ФП-80 с различными азэраторами: штриховка - газифицированный азэратор; вертикальные линии - нижний кольцевой и горизонтальные линии - верхний трубчатый азэраторы

На верхних горизонтах месторождения руды сильно окислены, полезные минералы представлены повеллитом, реже молибденитом. Наиболее высокое содержание молибдена и триоксида вольфрама наблюдается в скарных рудах. Помимо молибдена и вольфрама в рудах присутствуют медь, висмут, золото, серебро, селен, теллур, флюорит. Около 50% молибдена, поступающего в процесс обогащения, представлено молибденитом, 30% повеллитом, 11% молибдошеелитом и 8% - охрами.

Обогатительная фабрика введена в действие в 1940 г. В годы войны она была полностью разрушена и восстановлена в 1944 г. В последующие годы осуществлялось расширение фабрики с вводом новых секций и увеличением ее производительности. Технологическая схема обогащения включает трехстадиальное дробление и измельчение в одну стадию; на новых секциях после одностадийного дробления применяют мокрое самоизмельчение. Измельченная руда поступает в цикл молибденовой, а затем шеелитовой флотации; черновые концентраты направляют на доводку.

С целью снижения потерь цветных, редких и благородных металлов, а также эксплуатационных затрат Гинцветметом совместно с руководством Тырнаузского вольфрамо-молибденового комбината и фабрики было принято решение о проведении укрупненных промышленных испытаний пневматических флотационных машин чанового типа как более простых в обслуживании, экономичных по расходу электроэнергии и занимающих меньшую производственную площадь.

На первом этапе в главном корпусе фабрики была смонтирована укрупненная лабораторная пневматическая флотомашинa объемом 13 л (рис. 6.20). Пробы продуктов отбирались из промышленных потоков пульпы методом пересечения потока щелевым пробоотборником объемом 1 л из слива промежуточного вольфрамового сгустителя, хвостов первой молибденовой перемешки и контрольной медно-висмутовой флотации, питания основной медно-висмутовой флотации и третьей молибденовой перемешки. Общая масса проб - 40 л. Каждая отобранная проба флотировалась в открытом цикле в этой флотомашине без предварительной обработки. Расход пульпы в машине составлял 3 л/мин, воздуха - 4,5-5 л/мин, давление воздуха в аэраторах - 0,15 МПа. Высота пенного слоя поддерживалась в пределах 110-150 мм. Продукты флотировались до истощения пенного слоя. Время флотации - 10-12 мин.

В период проведения исследований фабрика работала в следующем режиме. Крупность измельчения - 63% класса -0,074 мм; содержание, %: Mo - 43,9; WO₃ - 37,0 в одноименных концентратах; в медно-висмутовом концентрате: Cu - 3,92; Bi - 0,312; в хвостах фабрики: Mo - 0,012;

WO_3 - 0,03. Расход реагентов, г/т: олеат натрия - 154, керосин - 59, ксантогенат - 4, сернистый натрий - 104, сода - 11,66, жидкое стекло - 19,36; НК-750 (за сутки).

Потери вольфрама со сливами промежуточного вольфрамового сгустителя на обогащательной фабрике составляли 1-3%. Для снижения потерь были проведены исследования возможности доизвлечения вольфрама из сливов промежуточного сгустителя в лабораторной пневматической машине с переводом шламовой шеелитовой части в пенный продукт. При этом 60,6% вольфрамовых минералов доизвлекается в концентрат с содержанием WO_3 0,6%. При тщательном подборе аэрогидродинамических параметров лабораторной пневматической флотомашин и оптимального реагент-

ного режима флотации установлена возможность доизвлечения до 0,5-1,5% WO_3 от руды в концентраты с повышенным его содержанием.

В хвостах медно-висмутитового цикла содержится 0,3% меди, 0,04% висмута и благородные металлы. В результате дофлотации хвостов медно-висмутитового цикла в лабораторной пневматической флотомашине получен концентрат, содержащий 1,51% Cu и 0,14% Bi с извлечением 94,2 и 81,1% соответственно. Кроме того, в концентрат извлекается 32,1 Au и 30,6% Ag. При перерасчете концентрата можно получить кондиционный медно-висмутитовый концентрат с повышенным содержанием в нем благородных металлов. Учитывая, что потери меди с хвостами медно-висмутитового цикла составляют до 15%, дофлотацией хвостов в лабораторной пневматической флотомашине доизвлекают от руды 8% Cu и 12% Bi.

Питание медно-молибденовой флотации в условиях фабрики имело

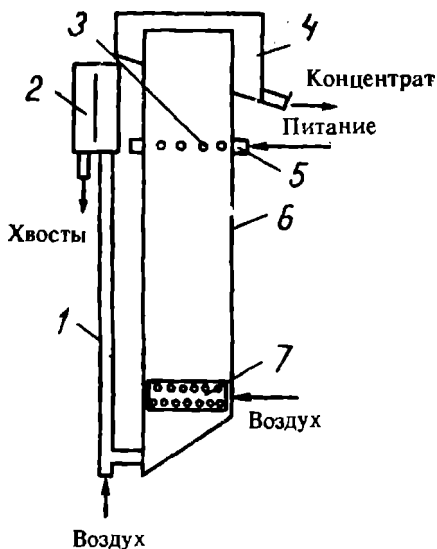


Рис. 6.20. Лабораторная пневматическая флотомашин объемом 13 л:

1 - эрлифт; 2 - разгрузочный карман; 3 - питающие отверстия; 4 - пенный желоб; 5 - питающий коллектор; 6 - корпус; 7 - аэратор

плотность 4-5% твердого, что негативно сказывалось на процессе флотации в механических флотомашинах. В связи с этим исследовалась возможность ведения основной медно-молибденовой флотации в лабораторной пневматической флотомашине без операции предварительного сгущения. При этом из питания плотностью 4,16% твердого можно выделить концентрат, содержащий 1,68% Cu и 0,5% Bi при извлечении от операции 93,5 и 97,3% соответственно. Извлечение меди по действующей схеме в данной операции составляет 78%. В отличие от работающих на фабрике механических флотомашин степень концентрации ценных металлов при флотации в лабораторной пневматической флотомашине в 2-2,5 раза выше. Таким образом, можно сделать вывод, что операция основной медно-молибденовой флотации может быть успешно осуществлена в пневматических флотомашинах без предварительного сгущения. Прирост извлечения меди от операции составил 15%.

Третья перерешетка молибденового концентрата осуществляется в механических и пневматических флотомашинах после пропарки. Степень концентрации в пневматических машинах выше, чем в механических, без снижения извлечения. В лабораторной пневматической флотомашине был получен концентрат, содержащий 1,05% Mo при извлечении 88,7%. Степень концентрации составила 3 против 2,5 в механических флотомашинах. Хвосты первой молибденовой перерешетки содержали до 0,13% молибдена, а также золото и серебро. В операции первой перерешетки установлена флотационная машина ФМР-25, камерный продукт которой подвергался исследованиям. При дофлотации хвостов первой молибденовой перерешетки в лабораторной пневматической машине получен концентрат с содержанием 0,115% Mo и 0,162% WO₃ при извлечении 45,6 и 32,8% соответственно. При этом извлечение меди и висмута в концентрат составило 51,9 и 47,1% соответственно.

На основании полученных положительных результатов в лабораторной пневматической флотационной машине чанового типа было принято решение об изготовлении промышленного образца флотационной пневматической машины ФП-25 в механических мастерских Тырныаузской обогатительной фабрики по чертежам, разработанным Гинцветметом. Высота камеры машины - 11 м, диаметр - 1,72 м, объем камеры - 6,3-25 м³, площадь поперечного сечения - 2,32 м². Машина ФП-25 за счет возможности перемещения по высоте аэракторов может работать так же, как машины ФП-6,3 и ФП-10. Согласно техническим условиям машина ФП-25 предназначалась для флотации исходного питания с содержанием класса -0,074 мм не менее 40%. Машина ФП-25 (рис. 6.21) представляет собой цилиндрическую камеру 1, имеющую

сборный желоб 2 пенного продукта, устройство для разгрузки хвостов типа шибберного кармана 3. Для ввода пульпы в машину на высоте 1500 мм от сливного пенного порога установлен периферийный питающий коллектор 4, имеющий отверстия 5 для равномерного распределения пульпы по всему сечению камеры. Машина снабжена регулятором уровня пульпы 6 и в нижней части - вспомогательным аэратором 7 из набора резиновых шайб.

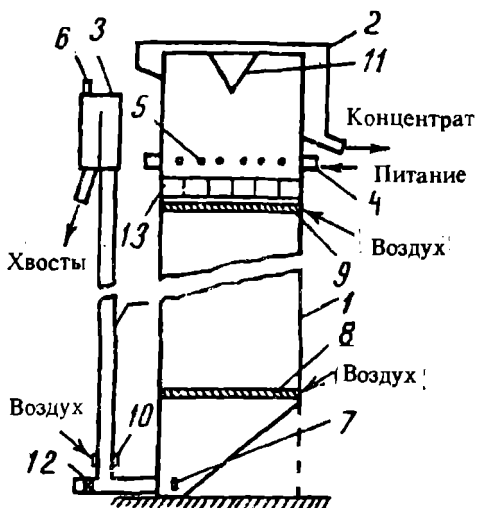


Рис. 6.21. Пневматическая флотомашина ФП-25

На стыке конической и цилиндрической частей машины установлен аэратор 8 из набора перфорированных трапециевидных колец и неперфорированных конических колец в комбинации с цилиндрическим диспергатором воздуха из полиэтлена с заданной пористостью. В верхней части ниже сливного порога пенного продукта на высоте 4000 мм установлен верхний трубчатый аэратор 9 из перфорированных резиновых трубок МБ размером 25х5 мм. Подвод воздуха в аэраторы и эрлифт 10 осуществляется от компрессора через ресивер (масло-влагодетелитель). Расход воздуха - до 4 м³/мин при рабочем давлении 0,15 МПа. Для ускорения разгрузки пенного продукта установлен пеноотбойник 11, для выпуска пульпы - патрубков 12. Вертикальный решетчатый успокоитель 13 радиального типа разделяет машину на ячейки, что позволяет интенсифицировать флотацию при движении частиц и пузырьков навстречу друг другу через ячейку успокоителя. Автоматическое поддержание уровня пульпы в машине было разработано специалистами фабрики.

Схема цепи аппаратов с установкой в коллективном цикле медно-молибденовой флотации пневматической машины ФП-25 в увязке с действующей схемой показана на рис. 6.22. В период испытаний машины

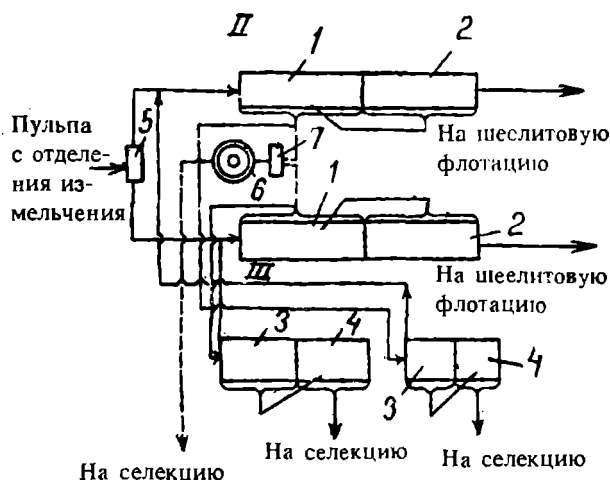


Рис. 6.22. Схема цепи аппаратов промышленных испытаний пневматической флотомашины ФП-25 на Тырнаузской обогатительной фабрике:

1 - машина ФПМ 12,5 (6 камер, основная медно-молибденовая флотация); 2 - машина ФПМ-12,5 (6 камер, контрольная медно-молибденовая флотация); 3 - машина ФМР-25 (2 камеры); 1-я медно-молибденовая перешистка); 4 - машина ФМР-25 (2 камеры, 2-я медно-молибденовая перешистка); 5 - пульпоотделитель; 6 - флотомашина ФП-25 (1 камера); 7 - буферный бак питания машины ФП-25; — - действующая схема технологической обвязки машины ФПМ-12,5; - - - схема технологической обвязки при испытаниях машины ФП-25

1-ю и 4-ю камеры (табл. 6.16). При одинаковых значениях производительности и извлечения расход электроэнергии на 1 т исходного питания в машине ФП-25 в 1,2 раза меньше, чем в машине ФМР-25. Объем и площадь производственного помещения в случае установки машин ФП-25 сокращаются в 2-4 раза. В период промышленных испытаний случаев отказа машины, выхода из строя аэраторов и забивания эрлифта не наблюдалось.

В результате проведенных испытаний установлено, что операция основной флотации медно-висмутового цикла может быть успешно осуществлена в пневматической флотационной машине чанового типа без предварительного сгущения питания флотации. Удельный расход электроэнергии в машине ФП-25 в 1,2 раза меньше, чем в машине ФМР-25; выход концентрата во флотационной пневматической машине практически равен выходу концентрата в механических машинах, а качество

работали на фабричном питании (пенный продукт основной медно-молибденовой флотации третьей секции). Испытания показали, что при работе на потоках пульпы $3,2 \text{ м}^3/\text{мин}$ получены близкие технологические показатели, а суммарный расход сжатого воздуха в машинах ФП-25 и ФМР-25 составил соответственно 3 и $3,6 \text{ м}^3/\text{мин}$ на

Таблица 6.16

Результаты сравнительных испытаний флотомашин ФП-25 и ФМР-25 в цикле перемешки медно-молибденового концентрата

Флотомашина	Число отработанных смен	Производительность		Содержание Мо в концентрате, %	Извлечение Мо в концентрат, %
		т/ч	м ³ /мин		
ФП-25	10	50	3,2	3,36	52,48
ФМР-25	10	50	3,2	2,28	50,49

Примечание. Руды перерабатывались смешанные, содержание окисленного молибдена составляло 40%.

концентрата и извлечение выше. При этом капитальные затраты на изготовление пневматической машины и эксплуатационные расходы значительно ниже.

Талнахская обогатительная фабрика

Талнахская обогатительная фабрика (ТОФ) перерабатывает пирротиновые медно-никелевые руды Талнахского и Октябрьского месторождений с получением медного, никелевого и пирротинового концентратов. Медно-никелевые руды содержат до 70% сульфидов.

Для вскрытия ценных компонентов требуется измельчение руды до крупности 90% класса -45 мкм. Технологическая схема обогащения предусматривает предварительное разделение руды гравитационным методом на тяжелую и легкую фракции с последующим флотационным обогащением на отдельных секциях. Легкая фракция обогащается по коллективно-селективной схеме с получением медного и никелевого концентратов. Тяжелая фракция с содержанием 3,5-5,0% Cu и 2,7-3,1% Ni обогащается по схеме прямой селективной флотации с последовательным выделением медного, никелевого и пирротинового концентратов.

На 3-й секции обогатительной фабрики была установлена пневматическая флотационная машина ФП-80 (см. гл. 1, рис. 1.18).

Сжатый воздух в аэраторы подавался по гибким рукавам диам. 75-80 мм от ресивера. Машина ФП-80 была оснащена системой автоматического поддержания уровня пульпы, включающей поплавковый датчик, регулятор уровня и исполнительный механизм с электрическим приводом. Для опорожнения машины при ремонте и осмотре предусматривался аварийный сброс пульпы через задвижку. Промышленные испытания флотомашин ФП-80 в первой основной флотации проводились в увязке со схемой цепи аппаратов медного цикла 3-й секции в сравнении с двумя параллельно работающими машинами ФМР-63.

Верхний и нижний аэраторы флотомашин ФП-80 были оснащены

трубчатыми аэрирующими элементами из резиновой трубки МБС размером 25x5 мм с однослойным хлопчатобумажным кордом. Воздух в аэраторы подавался от сети шахтного компрессора. Для очистки воздуха от пыли перед машиной был установлен фильтр из стекловолокна. Дополнительной подачи реагентов в машину не производилось. Давление воздуха в ресивере машины ФП-80 составляло 0,3-4,5 МПа, на нижнем аэраторе - 0,2-0,35 МПа и верхнем - 0,12-0,22 МПа; расход воздуха - 15-16 м³/мин.

Испытаниями установлено, что технологический процесс на фабрике характеризовался неустойчивостью по основным параметрам (производительности, плотности питания, расходу реагентов, содержанию готового класса -0,044 мм и металлов в питании флотации). На работе флотомашин ФП-80 отрицательно сказались колебания давления воздуха в сети - от 0,3 до 0,45 МПа, а иногда до 0,2 МПа. Механические неисправности флотомашин ФМР-63 в операциях второй и третьей перемешки приводили к получению некондиционного концентрата и, как следствие, к снижению расхода аэрофлота и пенообразователя, а также к снижению выхода пенного продукта в операциях основной медной флотации. Отрицательно повлияла на работу флотомашин также неудовлетворительная очистка воздуха от пыли, что привело к снижению эффективности работы аэраторов флотомашин ФП-80 из-за засорения пор твердыми частицами и повышенного износа диспергирующих элементов. При крупности исходного питания более 80% класса -0,044 мм извлечение меди в концентрат с применением машин ФП-80 составило 48%, а ФМР-63 - 49%. При крупности исходного питания 65% класса -0,044 мм извлечение меди снижается до 30%.

При условии обеспечения требуемого технологического режима и поддержания основных параметров в заданных пределах, а также удовлетворительной очистки воздуха флотомашин ФП-80 может обеспечить извлечение меди в грубый медный концентрат, равное извлечению, получаемому при флотации в 8 камерах флотомашин ФМР-63.

Перед испытаниями флотомашин была оснащена нижним кольцевым аэратором с аэрирующими элементами из резиновых колец или пористых полиэтиленовых цилиндров. Верхний аэратор был оснащен перфорированными трубчатыми элементами из резиновой трубки МБС размером 16x4 мм общей длиной 180 м. Давление сжатого воздуха в ресивере составляло при испытаниях 0,46-0,56 МПа, на нижнем аэраторе - 0,135-0,15 МПа при установке аэрирующих элементов из резиновых колец и 0,21-0,27 МПа при установке аэрирующих элементов из пористых полиэтиленовых цилиндров. Давление на верхнем аэраторе - 0,17-

0,19 МПа.

Производительность медного цикла в период испытаний колебалась от 300 до 600 т/ч по руде и от 700 до 1000 м³/ч по объему пульпы при колебаниях плотности в питании от 29 до 45% твердого. Расход реагентов был нестабильным, особенно бутилового аэрофлота в аэрацию. Значительные колебания основных параметров, а также отсутствие возможности регулирования рН пульпы приводили к колебаниям не только конечных показателей, но и характеристик промежуточных продуктов медного цикла, в частности, пенного продукта основной медной флотации, направляемого на перечистку. Так, содержание меди изменялось от 16 до 24%, а плотность - от 29 до 45% твердого. Количество этого продукта ориентировочно изменялось от 125 до 260-270 т/ч по твердому и от 250 до 460-480 м³/ч - по объему.

При испытаниях получен медный концентрат удовлетворительного качества по содержанию как меди, так и никеля. Однако извлечение меди в концентрат колебалось в широких пределах - от 22,7 до 50%, что обусловлено нестабильностью технологического процесса в голове медного цикла и низкими пенообразующими свойствами пульпы из-за отсутствия регуляторов среды, а также недостаточного расхода реагентов. При этом извлечение меди в концентрат от руды в флотомашине ФП-80 в среднем на 8,11% ниже, чем в флотомашине ФМР-63. Причем колебаний извлечения по сменам в машине ФП-80 больше, чем в машине ФМР-63. Это обусловлено нестабильностью технологического процесса и разными объемами сравниваемых флотомашин ФМР-63 и ФП-80: 189 и 80 м³ соответственно.

На основании результатов испытаний установлено, что при существующих условиях на 3-й секции ТОФ пневматическая флотомашина ФП-80 в операции первой медной перечистки ориентировочно эквивалентна 14-16 камерам флотомшины ФМР-63 (при пропускной способности 350-380 м³/ч). Для достижения более высоких технологических показателей в флотомашине ФП-80 необходимы стабилизация технологического процесса и обеспечение удовлетворительного пенообразования. Дополнительная разгрузка камерного продукта через регулирующую задвижку ниже разгрузочного кармана обеспечит пропускную способность машины ФП-80 по потоку пульпы более 380-400 м³/ч.

Кентауская обогатительная фабрика

Сырьевой базой фабрики являются свинцово-цинково-баритовые руды Миргалимсайского и Жайремского месторождений, а также свинцово-цинковые руды Миргалимсайского месторождения.

Испытания пневматических флотомашин чанового типа проводились на труднообогатимых рудах Жайремского месторождения, содержащих до 50% окисленных минералов. Минералы свинца представлены галенитом, церусситом, англезитом; в небольших количествах имеются труднофлотируемые минералы, такие, как плюмбоарозит. Цинковые минералы - сфалерит, смитсонит, марматит и гидроцинкат; нерудные минералы - барит, кальцит, доломит, кварц; имеются глинистые включения. В руде присутствуют в значительном количестве водорастворимые соли, преимущественно сульфаты и ионы марганца и цинка. Количество солей колеблется от 2,0 до 3,0 кг/т руды. В руде присутствуют первичные шламы, до 20% класса -0,044 мм, кроме того, в процессе измельчения руда склонна к повышенному шламообразованию.

Промышленный образец флотационной машины ФП-40 был изготовлен в механических мастерских комбината "Ачполиметалл" (см. рис.

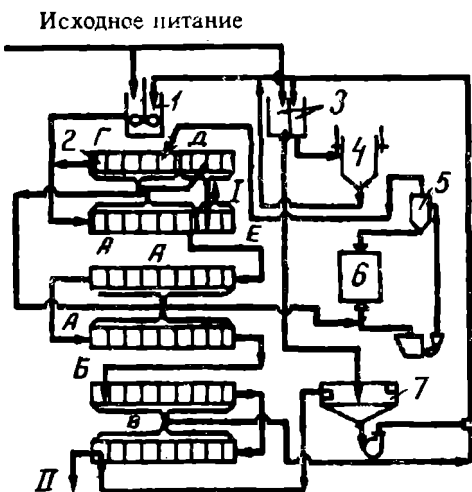


Рис. 6.23. Схема цепи аппаратов промышленных испытаний флотомашин ФП-40 на Кентауской обогатительной фабрике:

1 - контактный чан; 2 - машины Механобр-7; 3 - приемный зумпф; 4 - машина ФП-40; 5 - гидроциклон; 6 - шаровая мельница; 7 - сгуститель;

А - основная цинковая флотация; Б - 1-я контрольная флотация; В - 2-я контрольная флотация; Г, Д, Е - 1-я, 2-я и 3-я перефлотации (1 - цинковый концентрат; И - отвальные хвосты)

6.4) и установлен в цикле основной цинковой флотации на Кентауской обогатительной фабрике в дополнение к действующим 48 камерам машин Механобр-7 в увязке с действующей схемой. Хвосты свинцовой флотации после сгущения в сгустителе до 20-24% твердого подавали в машину ФП-40 через приемную емкость, установленную перед машиной (рис. 6.23). Грубый концентрат в зависимости от содержания в нем цинка направляли во вторую перефлотацию после предварительного доизмельчения. Хвосты машины ФП-40 поступали в контактный чан и после агитации с кантогенатом, медным купоросом и вспенивателем - в машины Механобр-7. В связи с тем, что

машина ФП-40 расположена выше реакгентной площадки и самотек реагентов исключался, было решено ксантогенат и вспениватель подавать в хвосты первой цинковой перемешки с промпродуктом контрольной флотации, направляемые в машину ФП-40 вместе с основным питанием.

В качестве трубчатых аэраторов использовали перфорированные трубки размером 10×13 мм типа ИКЩ, силиконовые трубки размером 15×4 мм, напорный рукав размером 25×8 мм в тканевой оплетке с двумя кордовыми нитями. В последующем трубчатые аэраторы изготавливали из масло-бензиностойких трубок размером 16×5 мм, срок службы их 8-12 мес. Были испытаны новые типы аэраторов: трубчатые из различных эластомеров (резина, полиуретан), цилиндрические резиновые и кольцевые с перфорацией на пресс-форме. Срок службы трубчатых аэраторов по сравнению с ранее испытанными в 3-5 раз больше. Выявлены причины засорения пор аэраторов и даны рекомендации по их восстановлению. Конструкции аэраторов и способы их изготовления защищены авторскими свидетельствами.

В результате расширения фронта цинковой флотации за счет установки машины ФП-40 извлечение цинка по секции возросло на 3,3% (табл. 6.17). Качество концентрата в машине ФП-40 на 3% выше, что объясняется благоприятными условиями флотации в этой машине в результате низкой турбулентности потоков пульпы, высокой частоты столкновения частиц с пузырьками воздуха, достаточной для их минерализации и выпадения механически захваченных частиц породы в пульпу, а также интенсификацией процессов вторичной концентрации в высоком пенном слое.

Испытания и промышленное внедрение машины ФП-40 на Кентауской фабрике в цинковом цикле показали, что эта машина без ухудшения показателей флотации позволяет снизить расходы на изготовление,

Таблица 6.17

Сравнительные результаты работы флотомашин в цикле основной флотации (рН 9)

Показатели	Механобр-7 (6 камер)	ФП-40 (одна камера)
Содержание цинка, %:		
в питании	10,77	11,80
в концентрате	37,80	40,87
Извлечение цинка (от питания), %	30,1	33,4
Расход реагентов, г/т руды:		
ксантогенат	87	87
Т-66	17	17
медный купорос	1163	1163
Содержание твердого в пульпе, %	20,1	20,1

эксплуатацию, причем металло- и энергоемкость на единицу объема машины в несколько раз ниже. Простота конструкции позволяет изготавливать машины силами механических мастерских фабрик и устанавливать их на имеющихся свободных площадях.

Флотомашинка ФП-40 была испытана также на дофлотации барита из текущих отвальных хвостов в увязке с действующей схемой. При испытаниях отвальные хвосты 8-камерной машины Механобр-7 подавали в машину ФП-40 в подпленный слой через кольцевой загрузочный желоб, позволяющий равномерно распределять пульпу по всему сечению камеры и снизить турбулентность потока на входе. Концентрат разгружался самотеком через кольцевой желоб, хвосты - через разгрузочный карман.

Результаты длительных промышленных испытаний показали, что одна машина ФП-40 обеспечивает доизвлечение барита из отвальных хвостов после флотомашинки Механобр-7 до 20% от операции или 2% от исходной руды:

	Механобр-7	ФП-40
Содержание BaSO_4 , %:		
в питании	24,93	21,72
в концентрате	54,73	63,67
в хвостах	21,72	18,40
Извлечение BaSO_4 от операции, %	13,50	19,93

Для испытания пневматических машин в цикле дофлотации барита из старых лежалых хвостов была смонтирована дополнительная секция, оборудованная машинами ФП-40 (5 камер) и ФП-10 (1 камера) (рис. 6.24). При этом были получены отвальные хвосты, которые можно использовать в качестве закладочного материала выработанного пространства в шахтах.

Техническая характеристика флотомашин Механобр-7 и ФП-40, установленных на Кентауской обогатительной фабрике, приведена ниже:

	Механобр-7 (8 камер)	ФП-40
Занимаемая площадь, $\text{м}^2/\text{м}^3$ объема камеры	1,2	0,3
Объем, м^3	50,4	36
Масса металла на 1 м^3 объема камеры, кг	720	250
Расход:		
электроэнергии, кВт·ч	240	75
воздуха, $\text{м}^3/\text{мин}$	40	5
Количество, шт.:		
механизмов	8	-
электродвигателей	9	1

В процессе промышленных испытаний было установлено, что при

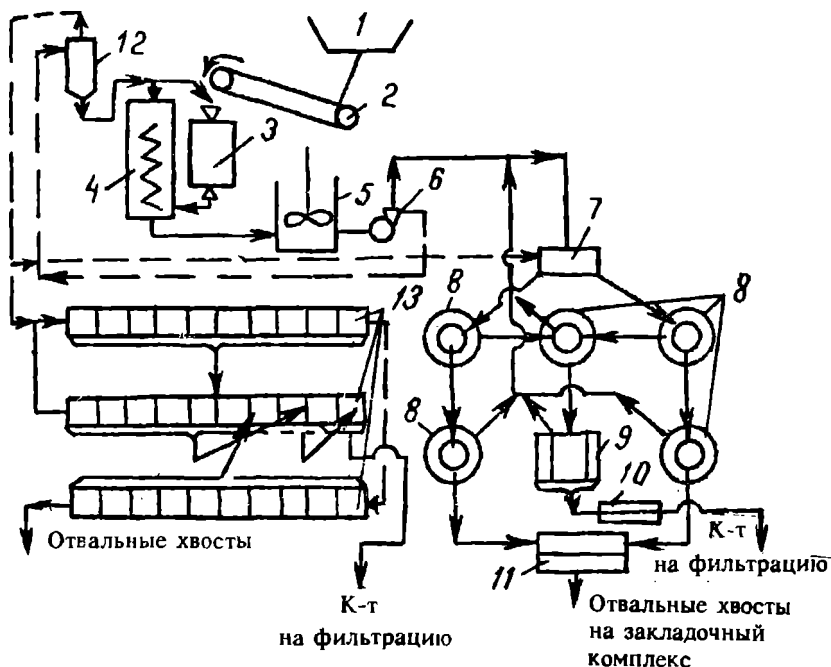


Рис. 6.24. Схема цепи аппаратов промышленных испытаний пневматических флотомашин ФП-40 и ФП-10 для дофлотации лежащих отвалных хвостов на Кентауской обогатительной фабрике:

1 - приемная воронка; 2 - ленточный питатель; 3 - шаровая мельница; 4 - спиральный классификатор; 5 - контактный чан; 6 - насос; 7 - пульпоотделитель; 8 - машины ФП-40; 9 - машина ФП-10; 10, 11 - пробоотборники; 12 - гидроциклон; 13 - машина Механобр-7

малых расходах воздуха ($0,3-0,5 \text{ м}^3/\text{мин}$ на 1 м^3 пульпы) получают богатые пенные продукты при низком извлечении, а при больших расходах ($0,5-1,0 \text{ м}^3/\text{мин}$ на 1 м^3 пульпы) - бедные пенные продукты при высоком извлечении.

Промышленные испытания и внедрение машин ФП-40 на Кентауской обогатительной фабрике в циклах основной цинковой флотации, в свинцовом цикле на дофлотации свинца из текущих хвостов свинцовой перечистки и на дофлотации барита из лежащих хвостов позволили повысить извлечение цинка на $1,7-3\%$, барита - на 2% и свинца - на 1% .

Текелийская обогатительная фабрика

На Текелийской обогатительной фабрике промышленные испытания машины ФП-40 проводили в цикле дофлотации барита и цинка на уста-

новке, запроектированной институтом "Казмеханобр".

В проекте предусматривалась подача хвостов баритовой секции в машину ФП-40 двумя насосами ЛПК-200/480, а отвод хвостов в общую хвостовую трубу был запроектирован на 0,5 м выше. При первых испытаниях были получены обнадеживающие результаты: извлечение барита из отвальных хвостов колебалось от 1 до 10 %, содержание в пенном продукте составляло 60-80 %. Поскольку в процессе кратковременных испытаний был выявлен ряд проектных недоработок по компоновке машин, а также недолговечность трубчатых пневмоаэраторов из вакуумной резины размером 16×5 мм (ГОСТ 3399-76), испытания были остановлены.

Для стабилизации работы флотомашины и увеличения пропускной способности ее до 5-10 м³/мин был модернизирован трубчатый аэратор и установлена система автоматического поддержания уровня пульпы.

Схема подключения машин ФП-40 показана на рис. 6.25.

Сравнительные результаты работы фабрики по дофлотации барита

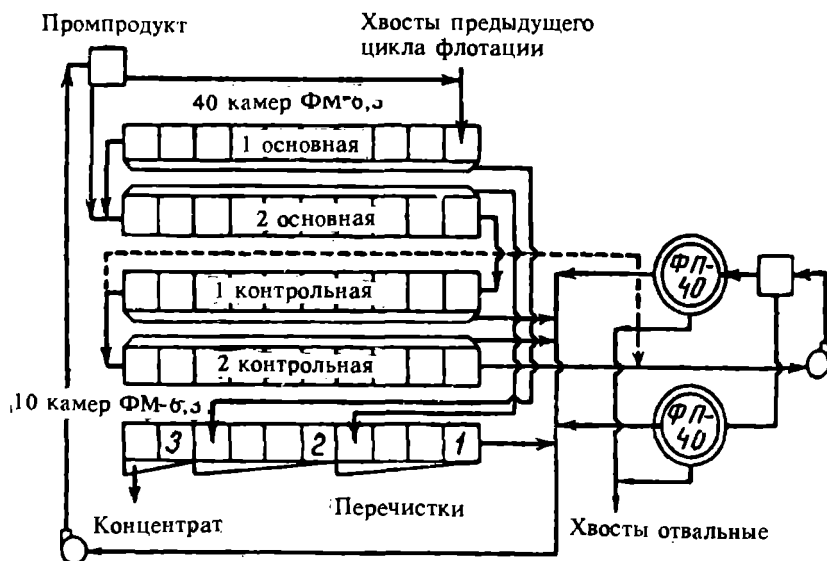


Рис. 6.25. Схема цепи аппаратов промышленных испытаний пневматической флотомашины ФП-40 для дофлотации цинка и барита на Текелийской обогатительной фабрике:

— с подключением машин ФП-40 для дофлотации отвальных хвостов; --- с подключением машин ФП-40 в операции 2-й контрольной флотации

из отвальных хвостов в машине ФП-40 показали, что прирост извлечения барита в готовый концентрат при этом составил 1,6% (от руды) при извлечении от операции ~30%. При использовании в операции дофлотации барита двух камер машины ФП-40, работающих параллельно, извлечение барита от операции в пенный продукт составило ~45%.

На свинцово-цинковой руде были проведены сравнительные испытания машин ФП-40 (2 камеры) и ФМ-6,3 (10 камер) в операции второй контрольной флотации. При этом извлечение цинка от операции составило 63,1% против 53,8% в машине ФМ-6,3. Техническая характеристика флотомашин ФМ-6,3 и ФП-40, установленных на Текелийской обогатительной фабрики, приведена ниже:

	ФМ-6,3 (10 камер)	ФП-40 (2 камеры)
Суммарный объем камер, м ³	53,5	60
Потребляемая мощность, кВт	200	126
Занимаемая площадь, м ²	65	18,2
Масса камер, т	34,2	14,4

Машина ФП-40 эффективно доизвлекает ценные компоненты из тонких классов (-0,044 мм), извлечение из которых составляет 38,4% от питания. Извлечение цинка в машине ФМ-6,3 из классов этой крупности составляет всего 25,4% (рис. 6.26).

Флотомшины ФП-40 были изготовлены Усольским заводом горного обогащения. В процессе промышленных испытаний было установлено, что негерметичное соединение штуцеров трубчатого аэратора вызывает повышенный барботаж. Кроме того, регули-

ровочный клапан перекрытия поступления пульпы в разгрузочный карман камерного продукта по вине изготовителя оказался неработоспособным. Перфорированные эластичные элементы в пневмоаэраторах фло-

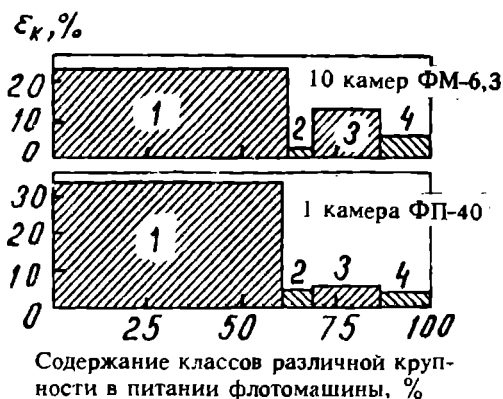


Рис. 6.26. Зависимость извлечения цинка от операции по классам крупности во флотомашинах ФМ-6,3 (10 камер) и ФП-40 (1 камера):

1 - 44 мкм; 2 - -74+44 мкм; 3 - -100+74 мкм; 4 - +100 мкм

томашин ФП-40 проработали свыше 6 мес. Порывов, износа элементов и разрыва пор визуально не установлено. Избыточное давление воздуха на входе в пневмоаэраторы находилось в пределах 0,15-0,23 МПа, расход воздуха на камеру - около $9 \text{ м}^3/\text{мин}$.

Устарасайская обогатительная фабрика

Фабрика перерабатывает висмутовые руды. Преобладающим рудным минералом является пирротин, нерудным - кварц. Окисленность руды - до 25%, размер выделений висмута - 0,2-0,4 мм.

Флотомашин ФП-40 была установлена в цикле основной висмутовой флотации и на дофлотации висмута из отвальных хвостов в увязке с действующей на фабрике схемой (рис. 6.27). Содержание твердого в сливе гидроциклона колебалось от 14 до 42%; класса -0,074 мм - от 64 до

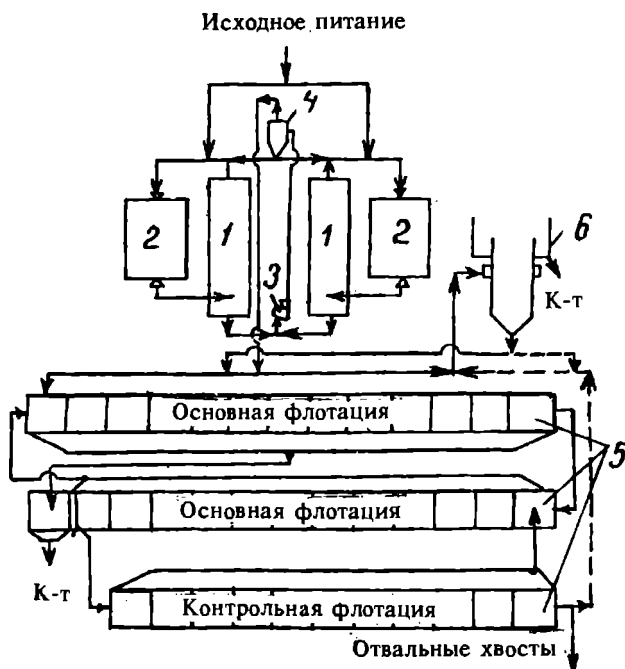


Рис. 6.27. Схема цепи аппаратов промышленных испытаний машины ФП-40 на Устарасайской обогатительной фабрике:

1 - классификаторы; 2 - шаровые мельницы; 3 - насос; 4 - гидроциклон; 5 - машины ФМР-10 (38 камер); 6 - машина ФП-40;

— — основное питание; — — дофлотация висмута из хвостов

той. Извлечение висмута в машинах ФМР-10 (38 камер) составило 54,68%, а в машине ФП-40 - 62,03%.

Техническая характеристика флотомашин, установленных на Устарасайской обогатительной фабрике, приведена ниже:

	ФМР-10	ФП-40
Длина камеры, м	1,1 (42)*	3,4
Занимаемая площадь, м ² /м ³ объема камеры	1,21	0,25
Объем камеры, м ³	1,35	40
Расход металла на 1 м ³ объема камеры, кг	1420	200
Расход:		
воздуха, м ³ /мин	1,0 (38)	5
электроэнергии, кВт·ч/т	5,5 (209)	60
Количество:		
камер	38	1
механизмов	41	1
электродвигателей	41	1

* В скобках указаны показатели на все установленные машины ФМР-10. Расход электроэнергии дан по установочной мощности, а занимаемая площадь - по внутренним размерам обоих типов машин.

Предварительный технико-экономический анализ, выполненный по результатам продолжительных испытаний, показал, что внедрение машины ФП-40 (1 камера) в дополнение к действующему фронту флотации машин ФМР-10 обеспечивает прирост извлечения висмута приблизительно на 15%.

Актюзская обогатительная фабрика

Фабрика перерабатывает сульфидные редкоземельные руды, содержащие свинец, молибден, медь, всю сумму редкоземельных элементов (РЗЭ) и оксид иттрия. Руда - труднообогатимая, характеризуется тонкой вкрапленностью основных минералов и низким содержанием РЗЭ.

Технологическая схема обогащения включает дробление руды, трехстадийное измельчение до крупности 85-90% класса -0,074 мм; стадийную свинцово-молибденовую флотацию с последующей селекцией; магнитную сепарацию для удаления магнетита; пиритную флотацию с применением в качестве собирателя реагента ИМ-50, соды и жидкого стекла; основную флотацию РЗЭ, сгущение и пропарку черного концентрата РЗЭ при температуре 60-93°C в содовой среде с добавлением реагента ОП-10, перемешивание черного концентрата РЗЭ, промпродуктовый цикл, концентрат которого присоединяется к концентрату основной флотации.

Основные потери РЗЭ приходятся на хвосты контрольной флотации.

С целью доизвлечения РЗЭ из отвальных хвостов и хвостов основной флотации на фабрике была установлена флотомашина ФП-1 в увязке с действующей технологической схемой. Испытания машины ФП-1 показали возможность обеспечения стабильности и надежности работы всех узлов. Машина испытывалась в двух циклах: контрольной флотации хвостов и дофлотации РЗЭ из отвальных хвостов.

Испытания в цикле контрольной флотации хвостов проводились при потоке пульпы $0,15 \text{ м}^3/\text{мин}$, содержании твердого в питании 25%, крупности измельчения 76% класса $-0,074 \text{ мм}$ и рН пульпы 9-9,5, а в цикле дофлотации РЗЭ из отвальных хвостов - соответственно $0,13 \text{ м}^3/\text{мин}$, 20-22% и 76% класса $-0,074 \text{ мм}$.

Техническая характеристика флотомашин ФП-1 и ФМР-25, установленных на Актюзской обогатительной фабрике, приведена ниже:

	ФП-1	ФМР-25 (6 камер)
Объем камеры, м^3	1,0	3,2
Занимаемая площадь, м^2	0,2	2,8
Расход воздуха, $\text{м}^3/\text{мин}$	0,15-0,16	1-1,2
Установочная мощность электродвигателей ДК-9, кВт		10
Количество, шт.:		
камер	1	6
механизмов	1	7
электродвигателей	1	7
Габаритные размеры, мм:		
диаметр	500	-
ширина	-	1600
высота	5000	-
длина	-	1750
Масса камеры без электродвигателей, т	0,58	2,35

Машина ФП-1 в цикле контрольной флотации хвостов обеспечила повышение качества концентрата с 0,09 до 0,143% при увеличении извлечения на 2,2%. В цикле дофлотации хвостов обеспечивается прирост извлечения РЗЭ на 1,5% (табл. 6.19).

Реагентный режим при испытаниях выдерживался по принятой на фабрике режимной карте; расход воздуха, $\text{м}^3/\text{мин}$ на 1 м^3 камеры составил: для машин ФМР-25 - 0,7-0,8; ФП-1 - 0,15-0,25; удельная потребляемая мощность, кВт на 1 м^3 объема камеры: для машин ФМР-25 - 4-3; ФП-1 - 1.

Таблица 6.19
Результаты испытаний флотомашини ФП-1 и ФМР-25

Флотомашина	Ко- личе- ство смен	Произво- дтель- ность, м ³ /ч	Содер- жание твердого в пита- нии, %	Сум- мар- ный объем флото- машин, м ³	Время флота- ции, мин	Продукт	Выход, %	Содержа- ние РЗЭ, %	Извлече- ние РЗЭ, %
Контрольная флотация хвостов									
ФП-1	8	8,9	24,8	1	6,74	Питание - хвосты основной флотации	100,0	0,039	100,0
						Концентрат	16,93	0,23	37,87
						Хвосты	83,07	0,02	62,13
						Питание - хвосты основной флотации	100,0	0,04	100,0
ФМР-25		50,31	25,74	18	21,46	Концентрат	14,28	0,10	35,71
						Хвосты	85,72	0,03	64,29
						Дофлотация отвальных хвостов			
						Питание - хвосты контрольной флотации	100,0	0,04	100,0
ФП-1	28	9,19	28,32	1	6,52	Концентрат	20,54	0,09	42,73
						Хвосты	79,46	0,03	57,27

Джезказганская обогатительная фабрика

Обогатительная фабрика N 1 перерабатывает медистые песчаники и комплексные медно-свинцовые руды. В медистых песчаниках основными ценными минералами являются халькозин, борнит, халькопирит.

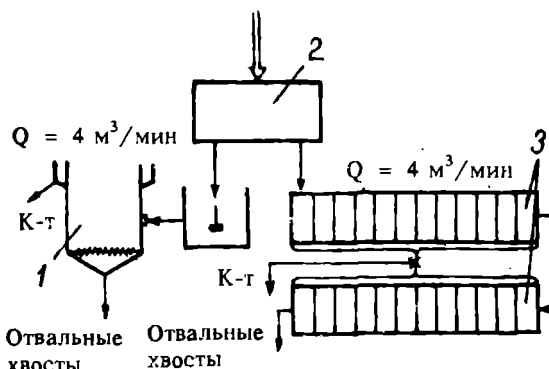


Рис. 6.28. Схема цепи аппаратов промышленных испытаний пневматической флотомашины ФП-40 из обогатительной фабрики ДГМК:

1 - машина ФП-40; 2 - пульподелитель; 3 - машина ФМР-6,3

в цикле основной медной флотации в сравнении с 24-камерной машиной Механобр-7 (рис. 6.28). В машине ФП-40 получен более богатый медный концентрат (табл. 6.20).

Были проведены сравнительные испытания машин ФП-40 и ФМР-6,3 при флотации промпродуктов. При этом в машине ФП-40 получен также более богатый концентрат (на 10,55%), но при более низком (на 2,55%) извлечении меди, что в основном объясняется меньшим объемом машины ФП-40.

Таблица 6.20

Результаты промышленных испытаний флотомашин ФП-40 и Механобр-7 в цикле основной медной флотации

Количество смен	Машина	Поток пульпы, м³/мин	Объем камер, м³	Содержание меди, %			Извлечение, %
				в руде	в концентрате	в хвостах	
7	ФП-40 (1 камера)	5,35	40	1,19	19,86	0,107	91,77
7	Механобр-7 (24 камеры)	5,35	150	1,22	8,31	0,083	94,32

Обогащительная фабрика "Медет", Болгария

На обогащительной фабрике "Медет" машина ФП-40 испытывалась в основной медной флотации и дофлотации меди из отвальных хвостов в сравнении с машиной Денвер-500 (DR-500) (рис. 6.29).

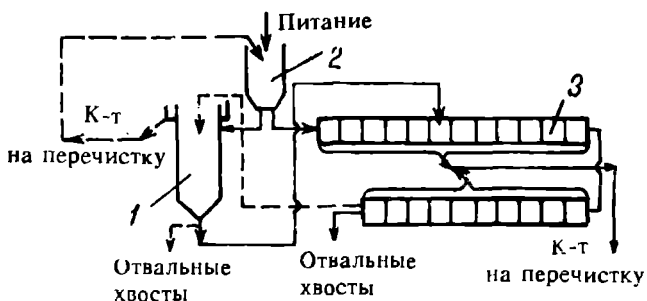


Рис. 6.29. Схема цепи аппаратов промышленных испытаний флотомашин ФП-40 на обогащительной фабрике "Медет";

1 - флотомашина ФП-40; 2 - пульподелитель; 3 - флотомашин DR-500

Техническая характеристика пневматических флотомашин ФП-40 и DR-500, установленных на обогащительной фабрике "Медет", приведена ниже:

	DR-500	ФП-40
Объем камеры, м ³	14,2	40,0
Расход воздуха, м ³ /мин	2,34	7,8
Масса камеры на 1 м ³ объема камеры, кг	320	190
Габаритные размеры, м:		
ширина	2720	-
длина	2720	-
высота	2110	5200
диаметр	-	3400

В процессе испытаний определялась зависимость технологических показателей от величины потока питания, поступающего в основную флотацию. Максимальный поток питания на машину ФП-40 составлял 7,7 м³/мин. Проверить эффективность работы машины при больших потоках пульпы не представлялось возможным из-за малой производительности компрессора. На основании проведенных испытаний установлено, что при этом потоке пульпы на опытном образце машины ФП-40 извлечение меди в концентрат составило 74,52% при содержании

6,01%. Более высокое извлечение достигается при меньших потоках пульпы 3,01 и 2,6 м³/мин (соответственно 75,12 и 80,52%) при практически одинаковом содержании меди (соответственно 9,12-9,24%).

При увеличении потока пульпы сохраняется высокое извлечение меди из тонких классов -0,1 мм (табл. 6.21).

Таблица 6.21

Извлечение меди по классам крупности при различной нагрузке по потоку пульпы в флотомашине ФП-40, %

Крупность, мм	Извлечение при нагрузке, м ³ /мин		
	2,6	3,1	7,7
-0,40 +0,20	21,67	20,81	20,82
-0,20 +0,10	71,75	67,08	70,96
-0,10 +0,08	88,17	84,90	84,07
-0,08	87,56	85,08	77,16

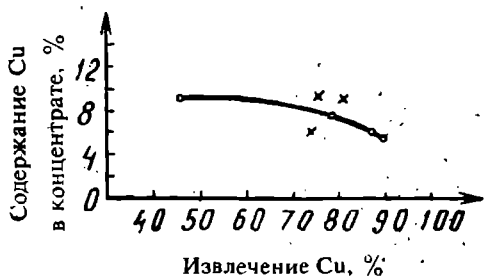


Рис. 6.30. Зависимость извлечения меди в концентрат от времени флотации во флотомашине DR-500 и ФП-40:

—○— флотомашина DR-500; —×— флотомашина ФП-40

В одной камере машины ФП-40 нельзя получить отвальные хвосты, необходима установка двух или трех последовательно соединенных камер. В условиях фабрики "Медет" при производительности по потоку пульпы 23 м³/мин (равному потоку одной нитки машин DR-500) извлечение меди 75% можно получить при установке трех камер машин ФП-40 (объем 120 м³) при параллельной их работе с потоком пульпы на каждую камеру 7,7 м³/мин или в 9 камерах машин DR-500. В этом случае одна камера ФП-40 заменяет 3 камеры DR-500 (42,6 м³) (рис. 6.30).

При снижении нагрузки по потоку пульпы скорость флотации в машине ФП-40 падает и становится ниже

скорости флотации в машине DR-500. При малых нагрузках машина

ФП-40 обеспечивает большую селективность по сравнению с машиной DR-500.

При дофлотации хвостов основной коллективной флотации в машине ФП-40 достигнуто извлечение меди 25,57% от питания при среднем содержании меди в полученном концентрате 0,363%.

Проведенные промышленные испытания машины ФП-40 на фабрике "Медет" в условиях нехватки подаваемого сжатого воздуха не позволили отработать оптимальные технологические параметры и реализовать в полной мере технические возможности этой машины.

Ключевская золотоизвлекательная фабрика

На фабрике перерабатывают руды, представленные средне- и мелкозернистым биотитовым гранитом и обломками брекчиевидных структур. Часто обломки расчленены гидроксидами железа, кальцитом, кварцем, турмалином и сульфидами. Рудные минералы на 8% представлены пиритом, магнетитом, халькопиритом, блеклой рудой, арсенопиритом, а породообразующие на 92% - полевыми шпатами, кварцем, кальцитом, апатитом и другими. Руды характеризуются сложным и непостоянным вещественным составом и различаются по физическим свойствам (плотность, наличие шламов, трещиноватость, прочность, крупность), особенно окисленные лёжалые. По содержанию сульфидов они относятся к умеренно-сульфидным золотосодержащим. Золото в руде мелкое. Размер золотинок колеблется от 0,001 до 0,4 мм и редко, преимущественно в кварце, встречаются золотины размером 1-2 мм. Присутствует свободное золото крупностью 0,2 мм.

Фабрика работает по схеме, предусматривающей самоизмельчение в замкнутом цикле с классификатором с предварительным выделением гравитационного золотого продукта из разгрузки мельницы на отсадочной машине и гали, доизмельчаемой в мельнице, работающей в замкнутом цикле с классификатором. Слив классификатора с содержанием готового класса -0,074 мм 70-80% и твердого 15-25% является питанием флотационного отделения. Флотация осуществляется в 19-камерной машине ФМР-25 и 3-камерной машине ФМР-10.

На испытуемой секции были установлены две машины ФП-40 по схеме, предусматривающей основную флотацию в первой машине и контрольную флотацию во второй машине с получением отвальных хвостов и грубого концентрата, перечищаемого в две стадии (в 3-камерной машине ФМР-10 - первый этап испытаний и 3-камерной машине ФМР-25 - второй этап).

Во время испытаний слив классификатора поступал в пульподели-

тель и затем самотеком в машины ФМР-25, насосом - в машины ФП-40. На первом этапе испытаний сжатый воздух на машины ФП-40 подавался от воздуходувки, а на втором - от ком.прессора. На машинах ФП-40 были установлены двухрядные аэраторы с усовершенствованной конструкцией трубчатых аэрирующих элементов из резины МБС размером 25×5 мм. При испытаниях были получены практически одинаковые результаты: извлечение золота в машинах ФП-40 составило 77,51 %, в машинах ФМР-25 - 77,63 %.

Однако качество грубого концентрата в машинах ФП-40 существенно выше, чем в машинах ФМР-25. Концентрат является практически готовым и не подлежит перемелке.

Техническая характеристика флотомашин, установленных на Ключевской обогатительной фабрике, приведена ниже:

	ФП-40	ФМР-25
Объем флотомашин по переделу, м ³ :	64,6	64,85
основная флотация	27,5	22,4
контрольная флотация	27,5	38,4
перечистная флотация	9,6	4,05
Установочная мощность, кВт:	238	269
основная и контрольная флотации	205	251,4
перечистная флотация	33	17,6
Занимаемая площадь, м ²	126,9	206
В том числе основная и контрольная флотации	74,9	196
Число электродвигателей, шт.	1	26

В период испытаний объем потока пульпы изменялся от 2,4 до 6,3 м³/мин, содержание класса -0,074 мм - от 50 до 81 %, твердого в сливе классификатора - от 17 до 29 %, окисленность руд колебалась в пределах 11-23 %.

Данные, полученные при испытаниях, послужили основанием для установки машин ФП-40 на этой фабрике. Промышленными испытаниями установлено, что перепад высоты между машинами ФП-40, составляющий 800 мм, недостаточен и вызывает ограничение съема пенного продукта со второй машины, а из-за недостаточной производительности насоса, установленного для перекачки пенного продукта контрольной флотации и камерного продукта первой перечистки в голову процесса, уменьшился выход пенного продукта с контрольной флотации и снизилась эффективность перечистных операций.

Однако, несмотря на перечисленные недостатки, обнаруженные в процессе сравнительных промышленных испытаний при флотации бедных золотосодержащих руд, при установке машин ФП-40 расход электроэнергии на 1 т руды снизился на 0,7 кВт, а занимаемая производственная площадь - на 40 %.

Жолымбетская золотоизвлекательная фабрика

Жолымбетская фабрика перерабатывает золотосодержащие руды, поступающие с нескольких рудников и подразделяемые на два типа: легкообогатимые и упорные, в которых основным минералом, имеющим промышленную ценность, является пирит - 96% (носитель золота). Выявлено наличие теллура, селена и галлия.

Легкообогатимые руды перерабатываются по обычной схеме; упорные руды - по флотационной схеме с цианированием хвостов флотации. Измельчение упорной руды ведется до 75% класса -0,074 мм. Плотность пульпы, поступающей на флотацию, составляет 20-25% твердого. Фабрика работает на шахтных водах с повышенным содержанием солей. Следует отметить, что в пульпе после измельчения содержится большое количество глинистых шламов, что ухудшает показатели флотации. Высокий расход бутилового ксантогената - 100-150 г/т, соснового масла - 30-50 г/т объясняется поглощением их ошламованными в процессе измельчения минералами вмещающих пород - углистыми и угольными сланцами.

С целью снижения потерь золота с хвостами обогащения упорных руд предварительно были проведены исследования по дофлотации золота из хвостов в лабораторной пневматической флотационной машине ФП-10 объемом 13 л (см. рис. 6.5).

Укрупненная установка была смонтирована во флотационном отделении фабрики. Для подачи пульпы были врезаны патрубки с пробковыми кранами непосредственно в пульпопроводы хвостов флотации и концентрата контрольной флотации. Поток пульпы на машину регулировался пробковыми кранами. Дополнительной обработки пульпы флото-реагентами не проводилось. Во время работы потоки пульпы на машину составляли 1,5-3,5 л/мин, расход воздуха при рабочем давлении 0,15 МПа поддерживался в пределах 3-5 л/мин. Во время работы в непрерывном режиме отбирались пробы питания, концентрата и хвостов. Из хвостов флотации упорных руд можно доизвлечь до 50% содержащегося в них золота (табл. 6.22).

При перечистке в машине ФП-10 концентрата контрольной флотации можно получить концентрат при выходе 6-6,5% с содержанием золота примерно в 5 раз более высоким, чем в исходном концентрате (табл. 6.23). На основании полученных данных в лабораторных условиях было принято решение о промышленных испытаниях флотомашин ФП-10, изготовленной по чертежам Гинцветмета.

Промышленные испытания по дофлотации отвальных хвостов фаб-

Таблица 6.22

Результаты дофлотации хвостов в флотомашине ФП-10

Продукт	Выход, %	Извлечение, %	Питание, л/мин	Расход воздуха, л/мин
Концентрат	9,0	24,8	2,5-3,0	5,0
Хвосты	91,0	75,2		
Исходный	100,0	100,0		
Концентрат	13,0	18,3	3,0-3,5	5,0
Хвосты	87,0	81,7		
Исходный	100,0	100,0		
Концентрат	4,6	51,9	1,5-2,0	4,0
Хвосты	95,4	48,1		
Исходный	100,0	100,0		
Концентрат	6,14	38,8	2,0-2,5	4,0
Хвосты	93,86	61,2		
Исходный	100,0	100,0		
Концентрат	14,11	39,3	1,5-2,0	3,0
Хвосты	85,89	60,7		
Исходный	100,0	100,0		
Концентрат	21,67	26,6	2,0-2,5	3,0
Хвосты	78,33	73,4		
Исходный	100,0	100,0		

Таблица 6.23

Результаты перерешки концентрата контрольной флотации в флотомашине ФП-10

Продукт	Выход, %	Извлечение, %	Подача питания, л/мин	Расход воздуха, л/мин
Концентрат	5,87	71,2	1,5-2,0	3,0
Хвосты	94,13	28,8		
Питание	100,0	100,0		
Концентрат	6,5	66,9	2,0-2,5	3,0
Хвосты	93,5	33,1		
Питание	100,0	100,0		

рики проводились по схеме, представленной на рис. 6.31.

При дофлотации хвостов в машине ФП-10 в промышленных условиях можно доизвлечь от 20 до 70% от операции содержащегося в них золота. Такие колебания в основном объясняются неравномерностью подачи исходного питания в машину, малым и непостоянным содержанием твердого, низким pH (менее 7), а также присутствием большого количества глинистых шламов в пульпе и резкими колебаниями содержания золота в руде - примерно в 2 раза. При оптимальном подборе аэрогидродинамических параметров флотомашин ФП-10, реагентного режима с применением депрессоров для шламов и повышении pH до 8,5-9,0 можно получить стабильные показатели по доизвлечению золота из хвостов обогащения упорных руд Жолымбетской обогатительной

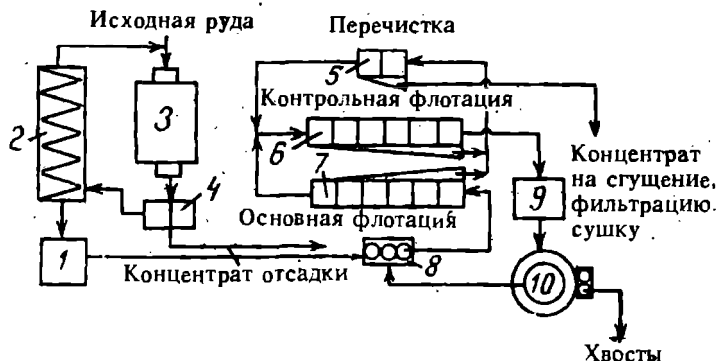


Рис. 6.31. Схема цепи аппаратов промышленных испытаний пневматической флотомашины ФП-40 на Жолымбетской обогатительной фабрике:

1 - зумпф насоса; 2 - классификатор; 3 - мельница; 4 - отсадочная машина; 5, 6, 7 - машины ФМР-10; 8 - пулпоотделитель; 9 - хвостовой зумпф; 10 - машина ФП-10

фабрики на уровне 45-50% от операции дофлотации.

Таким образом, проведенные промышленные испытания показали возможность доизвлечения 1,5-4,0% золота от исходной руды из отвальных хвостов. Полученный грубый концентрат можно направлять в перечистные операции. На основании промышленных испытаний и полученных положительных результатов рекомендуется перевод операций основной и контрольной флотаций полностью на чановые флотомашины с установкой двух параллельных ниток.

Ангренская золотоизвлекательная фабрика

Ангренская золотоизвлекательная фабрика (АнЗИФ) перерабатывает руды Ангрен-Алмалыкского района. На фабрику поступают до 9 сортов руд различных как по содержанию основных компонентов, так и по вещественному составу, вкрапленности золота и флотоактивности. Применяемая на фабрике технология, включающая сорбцию хвостов контрольной флотации, не обеспечивает получение отвальных по содержанию благородных металлов хвостов.

Для снижения потерь благородных металлов с отвальными хвостами были проведены испытания пневматических флотомашин с камерами большого объема ФП-80 и ФП-100 (рис. 6.32), работа которых основана на принципе как противоточного, так и прямоточного движений пульпы

Рис. 6.32. Схема цепи аппаратов промыленных испытаний машин ФП-80 на АнЗИФе

(см. гл. 1, рис. 1.17 и 1.22).

Машины ФП-80 и ФП-100 представляют собой выполненную из листовой стали вертикальную цилиндрическую камеру с коническим основанием. На стыке цилиндрической и конической частей установлен аэратор, который опирается на кронштейн, прикрепленный к стенке камеры, второй аэратор установлен на глубине 4 м от сливного порога. Вспомогательный аэратор установлен в днище конической части камеры. Исходная пульпа поступает в подпенный слой в центре машины и равномерно распределяется по всему сечению. Пенный продукт разгружается в кольцевой желоб, камерный продукт - через разгрузочное устройство. Машины снабжены системой автоматизации, регулирования расхода и давления воздуха, подаваемого в аэратор, что позволяет управлять процессами вторичной минерализации пены, качеством и выходом концентрата, а также регулировать уровень пульпы за счет постоянной разгрузки камерного продукта из машины.

Регулирование давления и расхода воздуха обеспечивает получение пузырьков воздуха требуемой крупности.

Техническая характеристика пневматических флотомашин ФП-80 и ФП-100, установленных на АнЗИФ, приведена ниже:

	ФП-80	ФП-100
Объем камеры, м ³	80,0	100,0
Производительность по потоку пульпы, м ³ /мин	До 15,0	До 20,0
Крупность материала в исходном питании (при содержании класса -0,074 мм не менее 50%), мм	Не более 1,0	Не более 1,0
Расход воздуха на камеру, м ³ /мин	40,0	40,0
Давление воздуха на входе в аэратор, МПа	0,12-0,18	0,16-0,22
Габаритные размеры, мм:		
диаметр	3400	3400
высота	11000	13000
Масса, т	13,0	14,0

Вначале были проведены испытания по дофлотации благородных металлов из отвалных хвостов цианирования в машине ФП-80. Добавление ксантогената в количестве 40 г/т в цианистую пульпу при времени контакта 10-15 мин повышает флотационную активность золота и серебра. При этом флотоактивность существенно зависит от времени контакта свежей порции собирателя с пассивированной поверхностью благородных металлов.

Сводные технологические показатели работы флотомашин различных конструкций приведены в табл. 6.24.

В процессе промышленной эксплуатации машины ФП-80 изучена

Таблица 6.24

Технологические показатели работы флотомашин различных конструкций

Количество смен	Флотомашина	Продукт	Содержание, %		Извлечение, %		Расход реагентов, г/т		Поток пульпы, м ³ /мин	Время флотации, мин
			твердого	клас-са -0,04 мм	Au	Ag	ксантогенат	T-66		
10	ФПМ-ГМО-1,2 (32 камеры, объем 38 м ³)	Концентрат Хвосты			58,93 41,07	63,33 36,67				
10	ФПМ-ГМО-1,2 (32 камеры, объем 38 м ³)	Исходный Концентрат Хвосты	29,5	72,3	100,0 74,54	100,0 78,29	150	200	-	16,1
50	ФМР-63 (2 камеры, объем 12,6 м ³)	Исходный Концентрат Хвосты	29,5	80,3	100,0 60,81	100,0 63,53	150	200	1,75	21,2
50	ФП-80 (1 камера, объем 80 м ³)	Исходный Концентрат Хвосты	28,3	72,5	100,0 78,63	100,0 80,09	163	200	2,74	29
50	ФП-80 (1 камера, объем 80 м ³) ФП-80 (2 камеры, объем 160 м ³) ФП-80 (2 камеры, объем 160 м ³) ФМР-63 (2 камеры, объем 12,6 м ³)	Исходный Концентрат ФП-80 (1) Концентрат ФП-80 (2) Концентрат ФМЗ-63 Хвосты	18,3	77,5	100,0 60,81 17,82 3,04	100,0 63,53 16,56 4,44	163	200	2,74	58
50	ФП-80 (2 камеры, объем 160 м ³) ФМР-63 (2 камеры, объем 12,6 м ³) ФП-80 (1 камера, объем 80 м ³)	Исходный Концентрат Хвосты Исходный Концентрат Хвосты	18,3	77,8	100,0 81,67 18,33	100,0 84,53 15,47	163	200	2,74	62,6
50	ФМР-63 (2 камеры, объем 12,6 м ³) ФП-80 (1 камера, объем 80 м ³)	Исходный Концентрат Хвосты	18,3	77,5	100,0 71,27	100,0 70,83	163	200	2,74	62,6
		Исходный	18,3	77,5	28,73 100,0	29,17 100,0	150	200	2,74	21,0

зависимость потребляемой мощности от расхода воздуха и содержания твердого в пульпе, а также определены давление и расход воздуха, необходимые для пуска машины под нагрузкой после длительных остановок (табл. 6.25 и 6.26)

Таблица 6.25

Зависимость мощности, потребляемой флотомашинной ФП-80, от содержания твердого в пульпе

Расход воздуха, м ³ /мин	Потребляемая мощность, кВт, при содержании твердого, %		
	20	30	40
0,8	0,096	0,16	0,24
1,0	0,120	0,20	0,30
1,2	0,144	0,24	0,36
1,4	0,168	0,28	0,42
1,6	0,192	0,32	0,48
1,8	0,216	0,36	0,54
2,0	0,240	0,40	0,60
2,4	0,288	0,48	0,72
3,0	0,360	0,60	0,90
3,5	0,420	0,70	1,05
4,0	0,480	0,80	1,20
4,5	0,540	0,90	1,35
5,0	0,600	1,00	1,50

Таблица 6.26

Давление, расход воздуха и время, необходимые для пуска машины ФП-80 после ее остановки с пульпой

Содержание твердого в пульпе, %	Время остановки, ч	Давление воздуха*, кПа		Расход воздуха, м ³ /мин	Время агитации, мин	Высота осадка, м
		при агитации	при нормальной работе			
20	12	100/80	30/100	1,5	4	1,4
30	12	100/100	50/120	2,0	6	1,6
40	12	100/120	80/140	3,0	8	2,2
20	24	140/80	30/100	1,6	6	1,2
30	24	140/120	50/120	2,2	8	1,4
40	24	160/140	80/140	3,2	10	2,0
20	48	1,5/1,2	0,3/1,0	1,8	8	1,2
30	48	2,6/1,4	0,5/1,2	2,5	12	1,4
40	48	1,8/1,6	0,8/1,4	3,5	17	1,8

* В числителе показано давление воздуха при агитации вспомогательным аэратором, в знаменателе - основным.

Полученные результаты дофлотации золота и серебра в машине ФП-80 послужили основанием для испытания флотомашин ФП-100 и внедрения ее в цикле основной и контрольной флотаций в увязке с действующей схемой.

В результате проведенных испытаний машины ФП-80 и ФП-100

рекомендованы к установке на АнЗИФ.

Кадамджайская обогатительная фабрика

На фабрике установлен каскад из трех флотационных пневматических противоточных машин ФППМ diam. 500, 450 и 375 мм, высотой 5 мм (рис. 6.33). В качестве аэраторов использованы перфорированные резиновые трубки размером 10×2 мм, на 1 см длины которых приходится 60-70 отверстий.

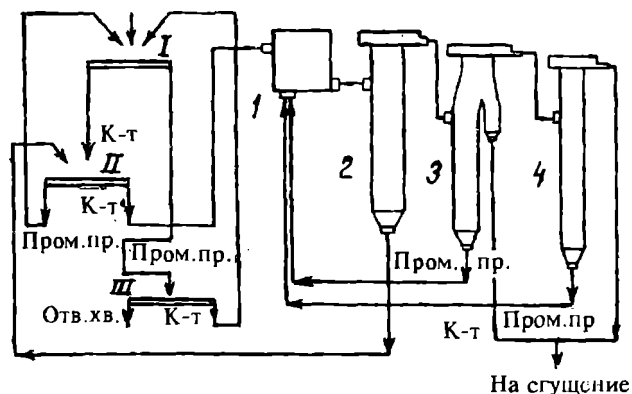


Рис. 6.33. Технологическая схема промышленных испытаний каскада пневматических флотомашин ФППМ-500/450/375 на Кадамджайской обогатительной фабрике: 1 - бак питания; 2 - машина ФППМ-500; 3 - машина ФППМ-450; 4 - машина ФППМ-375; I - основная флотация; II - пересчетная флотация; III - контрольная флотация

Техническая характеристика флотомашин ФППМ, установленных на Кадамджайской обогатительной фабрике, приведена в табл. 6.27.

Флотомашина ФППМ-500 вначале была испытана в открытом цикле на пересчете грубого концентрата. При высоте пенного слоя 40-45 см и содержании в питании сурьмы 20-25 % извлечение сурьмы в конечный концентрат составило 80-85 % при содержании в нем сурьмы 40-45 %.

При увеличении содержания сурьмы в исходном питании до 45 % и высоты пенного слоя до 120 см извлечение снижалось до 70-75 % при повышении содержания сурьмы в концентрате до 60 %.

Исследования влияния высоты пенного слоя (от 0 до 160 см и выше) при работе машин ФППМ-500 и ФППМ-450 показали, что с увеличением высоты пенного слоя качество концентрата пропорционально возра-

Таблица 6.27

Техническая характеристика флотомашин ФППМ

Флотомашина	Диаметр камер, мм	Высота цилиндрической камеры, мм	Высота конуса хвостоприемника, мм	Расход сжатого воздуха, м ³ /ч	Объем камер, м ³	Производительность по пульпе, м ³ /ч	Давление на азратор, кПа
ФППМ-500	500	5000	500	20	1,27	15-20	180-200
ФППМ-450	450	5000	500	10	0,82	10-15	180-200
ФППМ-375	375	5000	500	8	0,54	8,0	180-200

стает. Причем во флотомашине ФППМ-500 устойчивостью обладает пенный слой высотой до 160 см, а во флотомашине ФППМ-450, работающей на концентрате машины ФППМ-500, - до 70 см, что связано со снижением в пульпе концентрации флотационных реагентов.

Сравнение работы флотомашин Механобр-5В, используемой для перечистки концентрата, с работой машины ФППМ-500 показало, что селективность флотации в противоточной машине в несколько раз выше.

Машина ФППМ-500 позволяет в самой камере провести дополнительную перечистку пенного продукта и получить концентрат, промпродукт и хвосты. При этом извлечение сурьмы в концентрат от операции составило 90,7% при содержании 61%.

6.2. ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ И ВНЕДРЕНИЕ ФЛОТАЦИОННЫХ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ МАШИН ЧАНОВОГО (КОЛОННОГО) И ДРУГИХ ТИПОВ НА ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ ФАБРИКАХ, ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ

Для отечественного конструирования флотомашин в последние десятилетия характерна разработка не только чановых (колонных) машин, но и различных конструкций машин и аппаратов пенной сепарации (мелких, глубоких, комбинированных). Это оборудование испытано при флотации алунитов и фосфоритов, угля, калийных солей, для доизвлечения марганца из шламов и внедрено на ряде предприятий.

Автором еще в 1969 г. проведены испытания лабораторной пневматической машины колонного типа конструкции ИОТТ (рис. 6.34) при флотации алунитов Загликского месторождения в сравнении с механической машиной Механобр. Испытаниями было доказано преимущество колонной машины. Был получен концентрат с содержанием алунита больше на 7% при увеличении извлечения на 8%.

На основании проведенных испытаний разработан проект полупро-

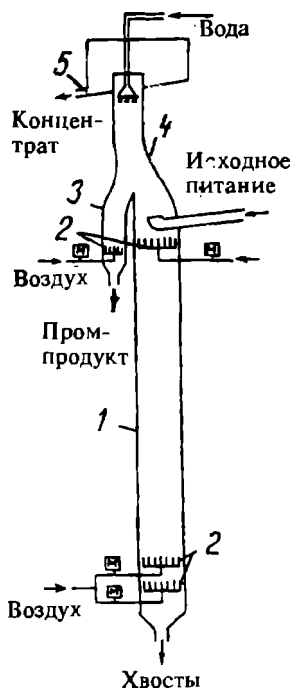


Рис. 6.34. Лабораторная пневматическая флотомашин колонного типа конструкции ИОТТ:

1 - флотационное отделение; 2 - диспергаторы; 3 - отделение для промпродукта; 4 - плавный переход; 5 - желоб для приема концентратов

мышленной установки для извлечения алунита на Кировабадском алюминиевом заводе, оснащенной колонными машинами (рис. 6.35, табл. 6.28).

При флотации фосфоритов на одной из секций обогатительной фабрики ПО "Фосфаты" проведены промышленные испытания прямоточно-противоточной машины ППФ-2 в сравнении с машиной ФМР-25. При флотации грубозернистой пульпы достигнуто в 1,5-2 раза более высокое извлечение ценного компонента.

Машины ППФ-2 установлены также на Подмосковном горно-химическом комбинате. При производительности машины 24 т/ч извлечение фосфорита в концентрат составило 90% при содержании 17-18%. Установка машины ППФ-2 позволила упростить технологическую схему, исключив контрольную и перечистные флотации.

На ЦОФ "Березовская" ПО "Кузбассуголь" установлена двухкамерная машина ФППМ-40 (рис. 6.36). Производительность машины по потоку пульпы - 600-700 м³/ч, по твердому - 70-80 т/ч. При близких технологических показателях и рабочем объеме пневматической и механической машин МФУ-2-63 металло- и энергоемкость машины ФППМ-40 в 3 раза, а площадь, необходимая для ее установки, - в 2 раза меньше.

На калийных фабриках используют в основном механические флотомашин

Т а б л и ц а 6.28

Результаты флотации алунита в механической и пневматической колонной флотомашин, %

Продукты	Механобр		Колонного типа	
	Содержание	Извлечение	Содержание	Извлечение
Концентрат	86,64	70,27	93,50	78,31
Хвосты	37,00	29,73	28,00	21,69
Руда	57,90	100,00	57,90	100,00

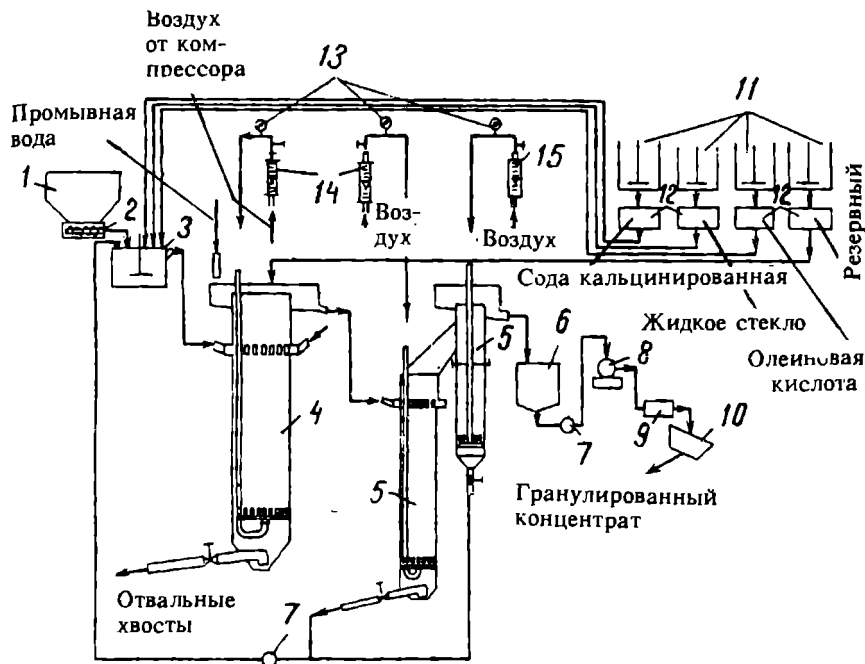


Рис. 6.35. Схема цепи аппаратов полупромышленных испытаний пневматических флотомашин колонного типа для извлечения алуни́та на Кировабадском алюминиевом заводе:

1 - бункер измельченного алуни́та; 2 - шнековый питатель; 3 - чан для приготовления пульпы; 4 - колонная машина; 5 - спаренная колонная машина; 6 - сгуститель; 7 - насос; 8 - барабанный вакуум-фильтр; 9 - сушильная печь; 10 - гранулятор; 11 - чаны для приготовления реагентов; 12 - реагентные питатели; 13 - манометры; 14, 15 - ротаметры

ФМ-6,3 КС (машина с кипящим слоем) и ФМ-6,3 КСА (машина с осевым блок-импеллером).

В последнее время при флотации калийных руд также получают распространение колонные пневматические машины.

На обогатительной фабрике комбината "Белорускалий" каскадно (с перепадом по высоте между соседними камерами 0,5 м) установлены три колонные машины. Площадь сечения камеры каждой машины - 1 м^2 , высота - 3 м. Пески гидросепаратора после перемешивания с полиакриламидом направляли в колонну для очистки от свободной глины и затем на флотацию сильвинита. Производительность машины по потоку пульпы составила $100\text{--}116 \text{ м}^3/\text{ч}$, по твердому - $30\text{--}50 \text{ т/ч}$.

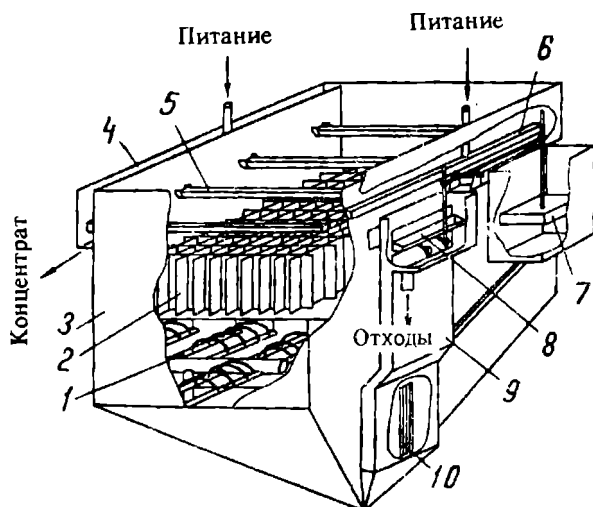


Рис. 6.36. Противоточная пневматическая флотомашина ФППМ-40:

1 - диспергатор воздуха; 2 - успокоительные решетки; 3 - камера; 4 - приемник пенного продукта; 5, 6 - распределители питания; 7 - поплавок; 8 - шибберная заслонка; 9 - шибберный карман; 10 - отверстие для перетока пульпы в шибберный карман

В последние годы проводились исследования по применению колонных флотомашин для обогащения тонких марганцевых шламов, в которых марганцевые минералы представлены псиломеланом, пиролюзитом, кальциевым родохритом и манганокальцитом. Разрабатывалась оптимальная конструкция колонных машин для обогащения этого сырья. Одновременно велись поиски новых эффективных собирателей.

На ЦОФ ПО "Чистурмуганец" испытана колонная машина (рис. 6.37), в которой камера установлена под острым углом к горизонту с возможностью его изменения. Аэраторы размещены вдоль стенок камеры машины. Предусмотрена возможность индивидуальной подачи воздуха в каждую секцию, при этом пеноприемники размещены вдоль противоположных боковых стенок камеры над аэраторами. Такое расположение пеноприемников обуславливает своевременный вывод минерализованных пузырьков из объема пульпы и сохранение флотокомплекса.

Для определения максимального угла наклона колонны были проведены флотационные опыты на марганцевых шламах. Лучшие результаты обогащения тонких шламов получены при установке колонной пневматической флотационной машины под углом 30° к горизонту.

Возможность регулирования подачи воздуха в каждой секции и интенсивное выделение минерализованных пузырьков в пеноприемниках позволили получить из тонких шламов марганцевый концентрат с содер-

жением 21,4% Мп при его извлечении 57,71%.

Так как пеноприемники расположены на некотором расстоянии друг от друга, в пространстве между ними вследствие коалесценции воздушных пузырьков создавалось препятствие для интенсивного выделения минерализованных пузырьков из объема пульпы. Для предотвращения этого промышленный образец аппарата выполнен в виде параллелепипеда. Пеноприемники размещены на верхней части стенки камеры, их плавное сопряжение обеспечивает скольжение пузырьков по направлению к пеноприемникам.

Машина изготовлена в центральной механической мастерской ПО "Чиатурмарганец".

Техническая характеристика наклонной флотомашины, установленной на ЦОФ ПО "Чиатурмарганец", приведена ниже:

Производительность по потоку пульпы, м ³ /ч	120
Площадь сечения камеры, м ²	1
Объем камеры, м ³	8,5
Габаритные размеры, м:	
длина	5
высота	2,5

Аэраторы изготовлены в виде кассеты, состоящей из трех секций с индивидуальной подачей воздуха в каждую из них. Общая длина перфорированных резиновых трубок - 160 м, число проколов на 1 см длины - 70-80. Срок службы аэраторов - 6 мес.

В промышленных условиях исследовано влияние высоты пенного слоя на технологические показатели флотации марганцевых шламов. Испытания проводили при расходе воздуха 100 м³/ч, содержании твердого в пульпе 5%. Наилучшие показатели были получены при высоте пенного слоя 20-30 см.

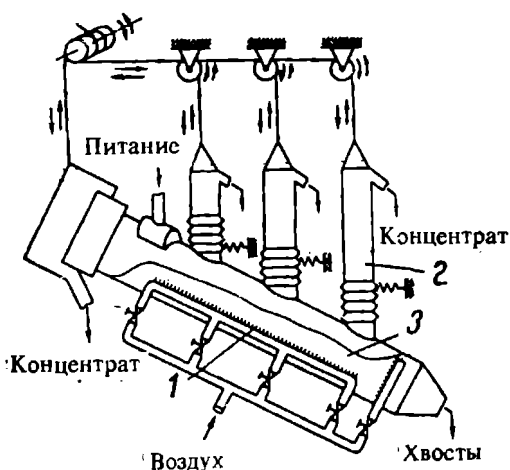


Рис. 6.37. Наклонная пневматическая колонная флотомашина:

1 - 3-секционный аэратор; 2 - пеноприемник концентрата; 3 - зона минерализации

В результате промышленной эксплуатации машины получен марганцевый коллективный концентрат с содержанием 22,82% Mn при его извлечении 57,84%.

Потери ценного компонента при обогащении марганцевых руд связаны в основном с тонкими шламами (-40 мкм), которые в виде сливов обесшламливания удаляются в хвостохранилище. Содержание марганца в них колеблется от 10 до 13%, выход составляет 61% от шламов промывки или 29% от исходной руды.

Решение проблемы извлечения марганца из тонких шламов связано не только с разработкой технологических режимов, но и созданием машин и аппаратов большой производительности. С этой целью Институтом горной механики АН Грузии на ЦОФ ПО "Чиатурмарганец" проводились испытания пневматических противоточных флотационных машин колонного типа. Удельный расход воздуха при флотации марганцевых шламов должен быть меньше, чем при флотации других видов сырья.

Установлено, что при увеличении крупности пузырьков от 0,5 до 3 мм содержание марганца в концентрате возрастает на 4,5%.

Опыты на ЦОФ показали, что при прочих равных условиях селективность процесса флотации воздушными пузырьками с diam. 3,2 мм на 3,7% выше, чем пузырьками с diam. 0,7 мм, а выход концентрата в последнем случае на 4-5% выше, чем при флотации крупными пузырьками.

Улучшение качества концентрата с уменьшением глубины всплывания происходит, вероятно, из-за уменьшения адсорбции реагентов, в основном поверхностно-активного вещества, на поверхности всплывающих пузырьков:

При высоте аэрированной зоны более 3 м, несмотря на повышение вероятности столкновения частиц с воздушными пузырьками, уменьшается число сфлотированных частиц. Такое изменение объясняется перегрузкой воздушных пузырьков минеральными частицами, уменьшением подъемной силы минерализованных воздушных пузырьков и выносом их с отходами флотации.

В рассматриваемом случае вследствие значительной крупности воздушных пузырьков (diam. 3 мм) и низкой скорости противотока (0,7 см/с) попадание минерализованных воздушных пузырьков в отходы флотации из-за их перегрузки минералами маловероятно.

На основании результатов промышленных испытаний колонных флотационных машин показано, что при производительности опытной секции 15 м³/ч, среднем содержании твердой фазы в шламах 3,3% и

расходе реагентов ВС 2-8 кг/т и солярового масла 2 кг/т из шламов, содержащих 14% Мп, получен коллективный марганцевый концентрат при выходе 21,2% с содержанием 25,3% Мп при извлечении 37,7%.

В зарубежной практике обогащения неметаллических полезных ископаемых колонные машины также получают распространение. В Австралии на фабрике "Риверсайд" противоточная колонная флотомашинна установлена для флотации угля крупностью 60-70% класса -0,038 мм. Высота зоны минерализации в машине - 6,2 м, зоны очистки - около 1 м, производительность машины по потоку пульпы - 150 м³/ч, расход промывной воды - 30 м³/ч. Из питания зольностью 30-55% получают концентрат зольностью 6-9% при извлечении горючей массы 70-80%. Обогащение такого тонкого угля в механической флотомашине неэффективно вследствие большого механического выноса. Срок окупаемости колонной машины составляет 9 мес.

Представляет интерес установка колонной машины для получения чистого графита в Индии. Для получения в механических машинах концентрата с содержанием углерода 91% из сырья, содержащего 50% графита, необходимо использовать 5-6 перечисток, при этом общее извлечение редко превышает 60%. Испытания колонн диам. 75 и 250 мм с подачей промывной воды на пенный слой показали возможность получения в одной операции концентрата с содержанием углерода до 96%.

Колонная машина эффективно используется при флотации хромитовых и фосфоритовых руд в США. Исследовано два типа аэраторов: перфорированные трубки и аэрационная камера, расположенная вне машины. В аэрационную камеру, заполненную стеклянными шариками диам. 1 мм, поступают вода и воздух под давлением 0,4 МПа, а в нижнюю часть флотационной машины - водовоздушная смесь. Аэратор позволяет получить большое количество тонкодисперсного воздуха. Размер пузырьков изменяется от 0,1 до 3 мм в зависимости от расхода вспенивателя. В колонной машине из хромитового сырья получен хромитовый концентрат с содержанием 41,5% оксида хрома при извлечении 95%, а в механической флотомашине - 35,6 и 87% соответственно. Высокие показатели достигнуты при флотации флюорита колонной машиной: концентрат содержал 90,9% флюорита при извлечении 86,8%, а в механической флотомашине - 67,4 и 90,4% соответственно.

Американские специалисты считают, что использование колонных машин более эффективно при флотации указанных типов руд, так как позволяет исключить операции предварительного обесшламливания и перечистных операций, кроме того, улучшается качество концентрата, повышается скорость флотации, упрощается автоматизация про-

цесса.

В Испании при флотации магнетита в колонной машине показана возможность повышения извлечения по сравнению с трехстадийной флотацией в механических машинах.

В Германии при флотации апатитовых руд также используют колонные машины. Необходимое время флотации сокращается с 15 до 4 мин и позволяет в одну стадию получать концентрат, содержащий 35% оксида фосфора при извлечении более 90%. При установке механических флотомашин для достижения таких показателей необходимы две контрольные и две пересортировочные операции.

В Германии разработана и внедрена улучшенная конструкция аэрационного устройства, основанная на эжекционном механизме, позволяющем повысить соотношение расходов пульпы и воздуха до 1:1,5. Аэраторы проработали без значительного износа 15 тыс. ч. Производительность аппарата с объемом камеры 45 м³ составила 800 м³/ч при концентрации угля в питании 45-75 г/л. Такие аппараты применяют для обогащения весьма тонких угольных частиц, содержащих 66% класса -0,045 мм. При средней зольности питания 37% выход концентрата составил 80%. Такие показатели получены при продолжительности флотации 2,5-3 мин, вдвое меньше необходимой продолжительности флотации в механических машинах. Затраты электроэнергии составили 0,15 кВт/м³ пульпы, а установочная площадь в три раза меньше.

Анализ практики промышленной эксплуатации различных конструкций пневматических колонных машин в нашей стране и за рубежом показывает существенные технологические и технико-экономические преимущества этих аппаратов по сравнению с традиционно применяемыми механическими и пневмомеханическими флотационными машинами.

Мелкие и глубокие машины пенной сепарации получили распространение при флотации фосфоритов, хотя эти машины обладают недостаточной удельной производительностью и селективностью разделения. Недостаток глубоких машин - ступенчатое расположение камер, вследствие чего в промежуточных карманах машины создаются потоки, поднимающие пульпу со взвешенной в ней твердой фазой до уровня распределительных желобов в последующих камерах. Кроме того, глубокие машины применимы только для обогащения тонкодисперсных руд с невысокой плотностью частиц.

Отмеченных недостатков лишен многокамерный пенный универсальный сепаратор МПСУ (рис. 6.38), разработанный Госгорхимпроектом (а.с. 599849 СССР). Эта машина обладает повышенной удельной произ-

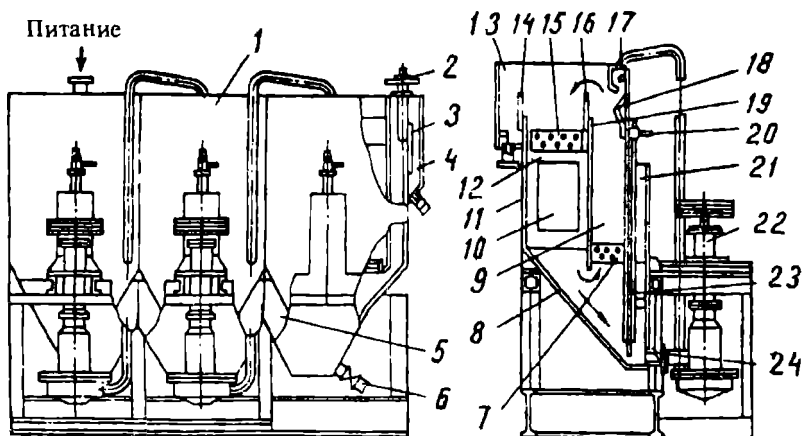


Рис. 6.38. Многокамерный пенный универсальный сепаратор МПСУ:

1 - камера машины; 2 - штурвал; 3 - шибер; 4 - переливной карман; 5 - окна; 6 - выпускной патрубок; 7, 15 - аэраторы; 8 - пирамидальные днища; 9 - отсек основной флотации; 10 - окна; 11 - прямоугольный корпус камеры; 12 - отсек перечистой флотации; 13 - желоб для сбора пенного продукта; 14, 16 - регулируемые пороги; 17 - загрузочный карман; 18 - распределительный козырек; 19 - вертикальная перегородка; 20 - штурвал для перемещения заслонки; 21 - разгрузочный карман; 22 - механический пульпоподъемник; 23 - заслонка; 24 - патрубок

водительностью и может применяться на рудах с широким диапазоном крупности флотируемых частиц. Характерная особенность машины МПСУ - сочетание в каждой камере принципа действия двух машин (мелкой и глубокой) благодаря установке в каждой камере вертикальной перегородки, разделяющей ее на отсеки основной и перечистой флотаций. Аэраторы в отсеке основной флотации размещают на уровне нижней части вертикальной перегородки (как в мелкой машине), а в отсеке перечистой флотации - на уровне верхней части (как в глубокой машине).

Разделение каждой камеры на два отсека, сообщающихся в верхней и нижней частях, позволяет создать в каждом из них разные аэродинамические режимы: в отсеке основной флотации - более сильную аэрацию и восходящий поток, которые способствуют более полному извлечению флотируемых частиц и повышению их крупности; в отсеке перечистой флотации - менее сильную аэрацию и нисходящий поток, которые обеспечивают эффективную очистку пенного продукта от тонких гидрофильных частиц и сростков. Разница в интенсивности аэрации создает энергичную циркуляцию жидкой фазы внутри камеры, потоки которой

захватывают несфлотиrowавшиеся или случайно выпавшие из пены гидрофобные частицы и возвращают их на повторную флотацию в зону повышенной аэрации.

Машины типа МПСУ успешно эксплуатируются для обогащения фосфоритов в ПО "Фосфаты". Техническая характеристика флотомашины МПСУ-1 приведена ниже:

Число камер, шт.	3
Объем одной камеры, м ³	11,5
В том числе:	
отсека I	3,75
отсека II	7,75
Площадь одной камеры, м ²	4,5
В том числе:	
отсека I	3
отсека II	1,5
Число пульпоподъемников, шт.	2
Электродвигатель пульпоподъемника:	
тип	A02-72-6
мощность, кВт	22
Производительность:	
по руде, т/ч	30-40
по пульпе, м ³ /ч	150-200
Масса, кг	16100
Габаритные размеры, мм:	
длина	9970
ширина	4120
высота	6150

Одна машина МПСУ-1 с успехом заменяет 11 камер флотационной машины ФМ-3,2.

Важнейший конструктивный элемент машин пенной сепарации - устройство для аэрации пульпы и создания пены, от работы которого в конечном счете зависят технологические показатели процесса.

На основании результатов испытаний колонных пенных сепараторов ФК и ФПСГ была разработана высокопроизводительная машина пенной сепарации (глубокая) - МПСГ (рис. 6.39) (а.с. 472691 СССР).

Машина работает следующим образом. Исходная пульпа, обработанная реагентами, подается в загрузочный карман, проходит под лабиринтную перегородку и вытесняется в распределительные желоба через окна под действием избыточного напора в кармане. Наличие лабиринта обуславливает стесненное движение пульпы и сглаживает колебания в скоростях потоков, вызываемых неравномерностью подачи пульпы в

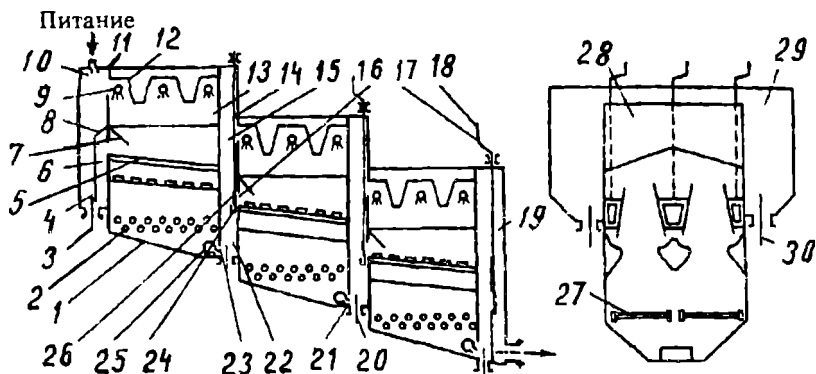


Рис. 6.39. Машина пенной сепарации (глубокая) МПСГ:

1 - наклонное днище; 2 - аэраторы; 3, 20 - патрубки аварийного сброса пульпы; 4 - лабиринтная перегородка; 5 - распределительный желоб; 6, 15, 16 - окна; 7 - отбойный козырек; 8 - глухая крышка; 9 - устройство для орошения пены; 10 - загрузочный карман; 11 - корпус камеры; 12 - переливные пенные пороги; 13 - камера; 14 - тяга; 17 - рычаг; 18 - ручка управления; 19 - карман для выгрузки камерного продукта; 21, 23 - горловины; 22 - разгрузочный карман; 24 - подпятники; 25 - трубы для подвода дополнительной воды; 26 - дроссельные заслонки; 27 - коллекторы; 28 - пеноотводные желоба; 29 - пеносборные желоба; 30 - патрубки для вывода пенного продукта

машину МПСГ.

Отбойные козырьки в распределительных желобах предотвращают переливание пульпы. Из распределительных желобов через отверстия пульпа изливается в пенный слой, образуемый при пропускании сжатого воздуха через резиновые перфорированные трубки-аэраторы. Наличие у распределительных желобов двухскатных днищ предотвращает оседание в них твердых частиц. С целью увеличения концентрации пузырьков воздуха в зонах вытекания пульпы с двухскатного днища его края соединены с пластинами, установленными под углом к направлению движения воздушных пузырьков. Эти пластины, отклоняя воздушные пузырьки, способствуют также распределению вытекающей из желобов пульпы в направлении, перпендикулярном к их оси.

Минерализованный пенный слой орошают водой (растворами солей, реагентами), поступающей внутрь пенного слоя по трубам оросительного устройства. Очищенная пена переливается через пенные пороги и по пеноотводным желобам стекает в пеносборник. Пульпа, прошедшая между резиновыми трубчатыми аэраторами, поступает через горловину в разгрузочный карман. Увеличение скорости движения пульпы при прохождении через горловину препятствует оседанию твердых частиц в

нижней части камеры.

Из разгрузочного кармана пульпа вытекает через окна дроссельного устройства, которые прикрываются дроссельными заслонками настолько, чтобы обеспечить поддержание уровня пульпы в разгрузочном кармане и подпор для сглаживания колебаний уровня пульпы внутри камеры вследствие изменений подачи питания или давления воздуха в аэраторах. Затем пульпа направляется либо для повторного обогащения в камеру аналогичной конструкции (при многокамерном исполнении), либо в разгрузочный карман при однокамерном исполнении.

Техническая характеристика машины МПСГ приведена ниже:

Производительность по потоку пульпы, м ³ /ч	600-1000
Расход сжатого воздуха, м ³ /мин	6-7
Давление воздуха, кПа	≤118
Срок службы трубок-аэраторов, мес	4-6
Расход полиакриламида для флокуляции глины, г/т руды	10-25
Габаритные размеры, мм:	
длина	11700
ширина	4200
высота	6000

Первая машина МПСГ была пущена на флотационной фабрике ПО "Уралкалий". Машина обеспечила очистку от глины тонких солевых шламов, получаемых на первой стадии механического обесшламливания на одной из трех секций фабрики, и заменила три гидросепаратора diam. 10 м.

Применение машины МПСГ позволило уменьшить потери КС1 с глинистыми шламами с 20-25 до 8-10% даже без орошения пены водой. С орошением пены при расходе воды 1-2 м³ на 100 т руды содержание КС1 в глинистом продукте снижается до 2-5%.

На этой фабрике все девять гидросепараторов были заменены машинами МПСГ. Их стали применять и для очистки сливов второй стадии механического обесшламливания.

АО "Галургия" и институтом "Гинцветмет" для фабрики АО "Уралкалий" выполнены работы по замене перфорированных резиновых трубок в машинах МПСГ (очистка глинисто-карбонатных шламов от частиц хлористого калия и натрия) аэраторами кольцевого типа и газлифтными, которые отличаются высокими надежностью и технологическими результатами по сравнению с трубчатыми аэраторами и могут использоваться для флотационного разделения мелкодисперсных калийных суспензий.

Глубокие пенные сепараторы типа КФ (рис. 6.40, а) представляют

собой высокий цилиндрический корпус 1 с двумя группами аэраторов 2 и 3 из резиновых перфорированных трубок. Исходная пульпа, обработанная реагентами, поступает по трубе сверху в пенный слой. Камерный продукт разгружается через нижнее разгрузочное устройство, а пенный продукт сливается в кольцевой желоб.

В сепараторе КФ успешно флотировался мелкозернистый сильвинит (0-0,8 мм). В одну стадию были получены концентрат, содержащий 95,6% KCl, и отвальные хвосты (3,8% KCl). Несколько худшие показатели были получены при испытаниях сепаратора КФ на крупнозернистой руде (0,8-3 мм), так как добавляемый при кондиционировании крупнозернистой пульпы мазут частично разрушал пенный слой. Содержание KCl в крупнозернистом концентрате составило 53,4% при извлечении 74%.

Госгорхимпроектom разработан сепаратор ФПСГ производительностью по потоку пульпы 100-120 м³/ч. Сепаратор (рис. 6.40, б) состоит из прямоугольного корпуса 1, разделенного перегородками 2 на три равных отсека. Внутри каждого отсека размещены вертикальные успокоительные пластины 3 и трубчатые резиновые диспергаторы воздуха 4 и 5. В верхней части сепаратора расположен загрузчик-распределитель с пятью наклонными деками, ниже которого внутри камеры укреплен криволинейный козырек, предназначенный для улучшения аэрации в полосе поступления исходной пульпы. Для поддержания заданного уровня жидкости в сепараторе предусмотрен промежуточный карман с регулируемым порогом. Камерный продукт можно разгружать как через промежуточный карман, так и через разгрузочную воронку. Техническая характеристика сепаратора ФПСГ приведена ниже:

Производительность, м ³ /ч	100-120
Расход воздуха, м ³ /мин	1-1,2
Давление воздуха, кПа	88-108
Полезная площадь, м ²	2
Объем, м ³	13

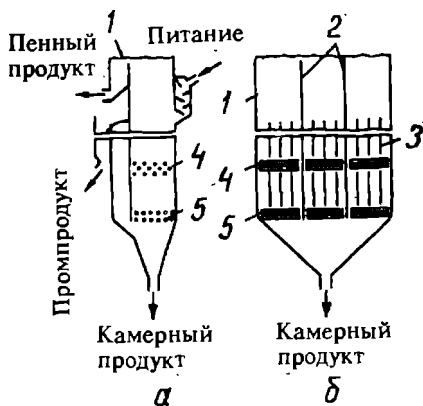


Рис. 6.40. Глубокие пенные сепараторы типа:
а - КФ; б - ФПСГ

Глубина погружения оросителей в пенный слой, мм	350
Габаритные размеры, мм:	
длина	2432
ширина	1320
высота	8000

Сепаратор ФПСГ испытывали на фабрике ПО "Уралкалий" в операции очистки тонких рудных шламов от глины.

В оптимальных режимах без орошения пены были получены пенные глинистые продукты, содержащие 60% нерастворимого осадка и от 15,4 до 24,5% KCl при извлечении глины до 70% и выше. Орошение пены значительно улучшает качество пенных продуктов, отмывая от них практически весь сильвинит. Такой степени очистки глинистых шламов от KCl не достигали на фабрике даже при трехступенчатой противоточной промывке глины в сгустителях диам. 30 м.

Машины пенной сепарации типа ФПС-16 эксплуатируются на центральной флотационной фабрике ПО "Чиатурмарганец" для флотации шламов.

На процесс пенной сепарации существенное влияние оказывает изменение таких параметров, как производительность по питанию, температура и плотность пульпы, продолжительность перемешивания, расход реагентов.

На фабрике Березниковского рудоуправления для флотации из суспензий мелкозернистого сильвина (0-0,7 мм) применяют машины ФМ-6,3 КС, а для флотации крупнозернистого сильвина (0,7-3 мм) - пенную сепарацию в машинах ФПС-16 с предварительным перемешиванием плотной обесшламленной гидромеханическим способом суспензии с эмульсией гидрохлорида амина C₁₆-C₂₀ и аполярного реагента масел в соотношении 1:10. Основную и контрольную операции осуществляли после обезвоживания и вторичного перемешивания с реагентами хвостов основной флотации. Суммарное извлечение KCl составило 90-93%, в том числе в основной операции - 87-88%, при содержании KCl в суммарном концентрате 88-89%. Выход крупнозернистого готового продукта составил 40%.

Проведенные исследования позволяют ожидать широкого использования машин пенной сепарации в процессах флотации глинисто-карбонатных шламовых солевых суспензий на предприятиях, перерабатывающих калийные руды.

ГЛАВА 7. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЗМА ДЕЙСТВИЯ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЧАНОВЫХ (КОЛОННЫХ) ФЛОТОМАШИН

Важное значение в повышении эффективности работы пневматических флотомашин имеет правильный выбор направления в них потока воды по отношению к направлению движения пузырьков воздуха относительно жидкости (пульпы).

Известны три основных типа относительного движения жидкости и содержащихся в ней пузырьков воздуха: *прямоточное* - движение жидкости и пузырьков в одном направлении; *противоточное* - движение жидкости и пузырьков в противоположных направлениях; *перекрестное* - взаимно перпендикулярное движение пузырьков и жидкости (рис. 7.1).

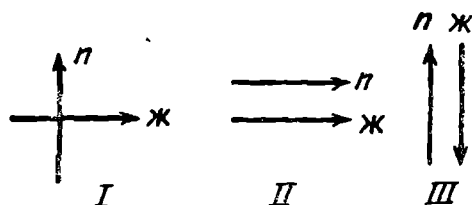


Рис. 7.1. Основные схемы движения пузырьков воздуха и жидкости (пульпы) во флотомашинах:

I - перекрестное; II - прямоточное; III - противоточное

Для оценки влияния на эффективность флотации того или иного типа относительного движения пузырьков и жидкости (пульпы) рассмотрим общий случай движения пузырька и частицы в некотором сечении флотационной пневматической машины (рис. 7.2).

Пузырек и частица относительно жидкости двигаются вертикально вверх со скоростью соответственно ω_n и $\omega_{\text{ч}}$. Жидкость и переносимые ею частица и пузырек двигаются относительно стенок машины под некоторым углом α к вертикали со скоростью $\omega_{\text{ж}}$. Положительным бу-

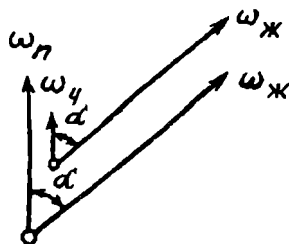


Рис. 7.2. Схема движения пузырька и частицы относительно пульпы

дем считать направление движения пузырька относительно жидкости. Тогда вертикально относительно стенок машины пузырек будет двигаться со скоростью $\omega_n + \omega_{ж} \cos \alpha$, а флотируемая частица - со скоростью $\omega_ч + \omega_{ж} \cos \alpha$.

Поток частиц через рассматриваемое сечение равен

$$i_ч = C(\omega_ч + \omega_{ж} \cos \alpha) + (C_o - c)(\omega_n + \omega_{ж} \cos \alpha) = \\ = C_o(\omega_n + \omega_{ж} \cos \alpha) \left\{ 1 - \left[1 - \frac{\omega_ч}{\omega_n} \right] \cdot \exp \left(-\frac{9}{4} C_с \frac{r_ч^2}{r_n^2} \omega_{отн} \tau \right) \right\},$$

где C - остаточная концентрация частиц; C_o - начальная концентрация частиц размером r ; $C_с$ - количество сфлотированных частиц; $r_ч$ - размер частиц; r_n^2 - размер пузырьков.

Продолжительность обработки пульпы выбирается из условия выхода пузырька из слоя пульпы глубиной H :

$$\tau = \frac{H}{\omega_n + \omega_{ж} \cos \alpha}.$$

С учетом равенства $\omega_{отн} = \omega_n - \omega_ч$ имеем:

$$i_ч = C_o(\omega_n + \omega_{ж} \cos \alpha) \cdot \left\{ 1 - \left[1 - \frac{\omega_ч}{\omega_n} \right] \cdot \exp \left(-\frac{9}{4} C_с \frac{r_ч^2}{r_n^2} \cdot \frac{\omega_n - \omega_ч}{\omega_n + \omega_{ж} \cos \alpha} H \right) \right\}.$$

Формула потока примет вид:

для прямого тока ($\alpha = 0$)

$$i_ч = C_o(\omega_n + \omega_{ж}) \cdot \left\{ 1 - \left[1 - \frac{\omega_ч}{\omega_n} \right] \cdot \exp \left(-\frac{9}{4} C_с \frac{r_ч^2}{r_n^2} \cdot \frac{\omega_n - \omega_ч}{\omega_n - \omega_{ж}} H \right) \right\};$$

для перекрестного тока ($\alpha = \frac{\pi}{2}$)

$$i_ч = C_o \omega_n \left\{ \left[1 - \frac{\omega_ч}{\omega_n} \right] \cdot \exp \left(-\frac{9}{4} C_с \frac{r_ч^2}{r_n^2} \frac{\omega_n - \omega_ч}{\omega_n} H \right) \right\};$$

для противотока ($\alpha = \pi$)

$$i_ч = C_o(\omega_n - \omega_{ж}) \left\{ 1 - \left[1 - \frac{\omega_ч}{\omega_n} \right] \cdot \exp \left(-\frac{9}{4} C_с \frac{r_ч^2}{r_n^2} \frac{\omega_n - \omega_ч}{\omega_n - \omega_{ж}} H \right) \right\}.$$

Эффективность флотации $\eta = i_ч F / C_o Q_{ж}$, где F - площадь поверхности выделения пузырьков в рассмотренных случаях определяется из выражений:

для прямого тока

$$\eta = \frac{(\omega_n + \omega_{ж}) F}{Q_{ж}} \left\{ \left[1 - \frac{\omega_ч}{\omega_n} \right] \cdot \exp \left(-\frac{9}{4} C_с \frac{r_ч^2}{r_n^2} \frac{\omega_n - \omega_ч}{\omega_n + \omega_{ж}} H \right) \right\};$$

для перекрестного тока

$$\eta = \frac{\omega_n F}{Q_{\text{ж}}} \left\{ 1 - \left[1 - \frac{\omega_{\text{ч}}}{\omega_n} \right] \cdot \exp \left(-\frac{9}{4} C_{\text{в}} \frac{r_{\text{ч}}}{r_n} \frac{\omega_n - \omega_{\text{ч}}}{\omega_n} H \right) \right\};$$

для противотока

$$\eta = \frac{(\omega_n - \omega_{\text{ж}}) F}{Q_{\text{ж}}} \left\{ 1 - \left[1 - \frac{\omega_{\text{ч}}}{\omega_n} \right] \cdot \exp \left(-\frac{9}{4} C_{\text{в}} \frac{r_{\text{ч}}}{r_n} \frac{\omega_n - \omega_{\text{ч}}}{\omega_n - \omega_{\text{ж}}} H \right) \right\},$$

где $Q_{\text{ж}}$ и $\omega_{\text{ж}}$ - расход и скорость движения пульпы вдоль зоны выделения частиц.

Из полученных формул видно, что при перекрестном токе ($\alpha = \pi/2$) поток жидкости не оказывает влияния на эффективность флотации.

Необходимо выбрать лишь достаточную длину участка отделения пузырьков от жидкости, что аналогично определению диаметра флотационной камеры.

При прямотоке ($\alpha = 0$) увеличивается значение члена перед фигурной скобкой, т.е. эффективность отвода пузырьков из пульпы, но уменьшается выражение под знаком экспоненты, т.е. ухудшаются условия захвата частиц (уменьшается продолжительность флотации). При противотоке ($\alpha = \pi$) изменение этих составляющих потока частиц и эффективности противоположно. Если при этом скорость пульпы больше скорости движения в ней пузырьков, то все частицы выносятся с потоком пульпы из зоны флотации.

С точки зрения эффективности захвата частиц, определяемой экспонентой, прямоток предпочтителен при флотации тонущих частиц (крупных и большой плотности), а противоток - при флотации с малой разностью скоростей движения флотируемых частиц и пузырьков.

Результаты опробования полупромышленного образца машины, испытанного на Сорской обогатительной фабрике в цикле коллективной медно-молибденовой флотации, показали, что пульпа в глубокой флотационной машине классифицируется по крупности, крупные частицы накапливаются в нижней части камеры, а мелкие - в верхней.

Флотируемость различных классов крупности в глубокой флотационной пневматической машине исследовали в противоточном и прямоточном режимах. При прямоточном движении пульпы снизу вверх крупные частицы движутся медленнее потока, продолжительность пребывания их в камере увеличивается и извлечение металлов из крупных классов повышается.

Расчет скоростей падения частиц различной крупности показал, что при соотношении 1:1 ($Q = 4$ л/мин), плотности руды $2,65 \text{ г/см}^3$, высоте машины (камеры) 5,5 м и диам. 0,6 м продолжительность пребывания частиц при прямоточном режиме возрастает до 300 с для частиц разме-

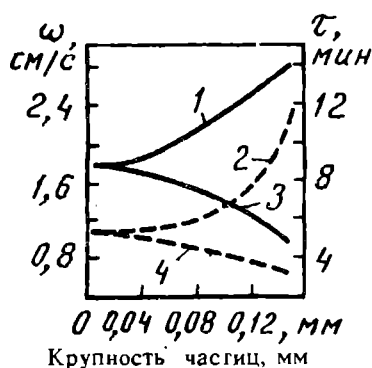


Рис. 7.3. Зависимость скорости движения частиц и времени их пребывания во флотомашине (камере) от крупности:

1, 4 - прямоточное движение;
2, 3 - противоточное движение

ром 10 мкм и до 620 с - для частиц 160 мкм, а в противоточном - уменьшается с 300 до 200 с. Это приводит к накоплению крупных классов при работе машины в прямоточном режиме и тонких классов - при противоточном режиме (рис. 7.3).

Исследования степени аэрации в камере флотомашин показали, что при прямоточном движении фаз она значительно ниже [от 6,2% для соотношения фаз 2:2 (л/мин), до 15,4% - для 5:5 (л/мин)], чем при противотоке (от 23 до 39% при тех же условиях). Соответственно увеличивается газонасыщение от 10-22% при притоке и до 32-60% - при противотоке, т.е. при противотоке имеет место более плотная упаковка

воздушных пузырьков.

Скорости движения пульпы и воздуха в глубоких флотационных машинах пневматического типа во многом определяют степень минерализации пузырьков, производительность машины и скорость флотации, поскольку от нее зависит вероятность закрепления минеральных частиц на пузырьках.

Установлено, что с увеличением диаметра флотационных пневматических машин за счет продольного перемешивания нарушается режим их работы.

На основании экспериментальных данных, полученных в глубокой флотационной пневматической машине на фабричных пульпах в полупромышленных условиях, были проведены промышленные испытания на одной из обогатительных фабрик в циклах основной и контрольной флотации по полной схеме во флотомашинках с объемом 100 м³ (табл. 7.1).

Анализируя данные таблицы, можно констатировать, что при перекрестном движении потока пульпы и пузырьков воздуха в большеобъемных флотационных пневматических машинах ФП-100 извлечение металла ниже на 11,8%, качество концентрата - на 13,2% по сравнению с противоточным движением.

При совмещении перекрестно-противоточного и перекрестно-прямоточного режимов в сравнении с перекрестным извлечением металлов и

Таблица 7.1

Результаты промышленных испытаний

Режим движения пульпы	Расход реагентов, г/т		Продукт	Выход, %	Содержание металла, г/т	Извлечение металла, %
	Т-66	ксантогенат				
Противоток	80	40	Концентрат	8,1	26,2	84,9
			Хвосты	91,9	0,4	15,1
Прямоток	80	40	Концентрат	12,1	18,1	84,8
			Хвосты	87,9	0,4	15,1
Перекрестный ток	80	40	Концентрат	15,2	13,0	73,1
			Хвосты	84,8	1,0	26,9
Перекрестно-противоточный	80	40	Концентрат	10,5	19,2	79,0
			Хвосты	89,5	0,4	21,0
Перекрестно-прямоточный	80	40	Концентрат	13,5	15,1	80,1
			Хвосты	86,5	0,4	19,9

качество концентрата повышается на 5,9-7,1 % и на 2,1-6,2 г/т соответственно.

Более высокие технологические показатели получены при противоточном и прямоточном режимах работы флотомашин по сравнению с перекрестно-противоточным и перекрестно-прямоточным режимами. При идентичном питании извлечение металла в концентрат при прямоточном и противоточном режимах одинаковое, а содержание металла в концентрате при противоточном режиме на 8,1 г/т выше.

Постоянными условиями при испытаниях были переработка руды, плотность и тонина помола (в основной флотации содержание класса -74 мкм 72 %, в контрольной - 91 %). Хвосты основной флотации доизмельчались.

На основании полученных данных в конструкцию флотомашин типа ФП внесены соответствующие изменения, позволяющие осуществлять процесс флотации на трех режимах движения фаз, которые подбираются опытным путем для различных циклов и операций процессов флотации.

При выборе размера чановой (колонной) машины обычно известна продолжительность флотации в лабораторном аппарате. Среднее время пребывания в машине можно оценить по формуле

$$\bar{t} = H_m / (v_l + v_p) = H_m / [4Q_p / (\pi d_c^2 c_p) + v_p],$$

где H_m - высота зоны минерализации, см; v_l , v_p - скорость соответственно

жидкой фазы и седиментации, см/с; Q_p - производительность по твердому, г/с; d_c - диаметр камеры, см; c_p - содержание твердого в пульпе, г/см³*. Таким образом, при данной производительности операции необходимое среднее время флотации может быть получено при различных размерах камеры, аэрации и плотности пульпы.

Результаты опытов свидетельствуют, что указанные параметры камеры влияют на зависимость извлечения и качества концентрата от времени флотации. Рассмотрим экспериментальные данные, полученные при изучении влияния некоторых параметров на процесс флотации в машинах чанового типа.

Диаметр камеры d_c при постоянной производительности операции по пульпе определяет приведенную скорость жидкости v_l . Увеличение v_l обуславливает пропорциональное снижение времени флотации. С другой стороны, повышение скорости движения пульпы в противотоке снижает скорость подъема пузырьков относительно камеры, увеличивает продолжительность их пребывания в пульпе и степень минерализации при неизменной высоте камеры.

Для уменьшения потерь ценного компонента целесообразно часть объема под аэратором использовать в качестве отстойника для сбора и коалесценции микропузырьков, после чего они смогут подняться над аэратором. Оптимальное местоположение аэратора может быть определено при опробовании подаэраторной части машины. Снижение скорости подъема мелких пузырьков повышает вероятность их выноса в хвосты. Величина v_l влияет также и на содержание газа в камере.

Увеличение d_c вызывает и увеличение коэффициента диффузии ($D \sim d_c^{4/3}$), что является одной из основных причин ухудшения показателей флотации при переходе от лабораторных к промышленным чановым машинам. Следовательно, число Пекле $Pe = v_l H / D$ (v_l - приведенная скорость потока пульпы, см/с), являющееся гидродинамическим критерием подобия, убывает с увеличением диаметра при неизменном потоке пульпы по квадратичному закону.

Кроме того, отрицательное влияние на разделение оказывает неравномерная аэрация по сечению камеры в машинах большого диаметра. Равновесный профиль газосодержания (распределение по радиусу камеры) вдали от аэратора близок к параболическому. Газосодержание на

* Здесь и далее обозначения приняты в соответствии с английской транскрипцией.

расстоянии r от оси

$$\varphi = \bar{\varphi} [(b + 2)/b] [1 - (r/R)^b],$$

где $\bar{\varphi}$ - среднее газосодержание; $b = 1,8-2,3$ - коэффициент; R - радиус камеры.

Движение части материала в пристенной зоне с незначительной аэрацией ухудшает показатели флотации. Вследствие неравномерности аэрации в камерах большого диаметра образуются циркуляционные потоки, усиливающие макроперемешивание в камере и механический вынос частиц. В соответствии с экспериментальными данными В.И. Янца при содержании твердого в пульпе 25% и извлечении 85% с увеличением диаметра камеры с 10 до 50 см удельная производительность машины снижается с 7,2 до 3,3 т/(м³·ч) (при обогащении медной руды Балхашского ГМК).

Высота камеры - основной параметр машины. Некоторые авторы считают, что увеличение высоты всегда положительно влияет на качество разделения, однако экспериментальные исследования убедительно доказывают, что для зависимости извлечения и эффективности обогащения от высоты зоны минерализации характерно наличие максимума, объясняемое несколькими причинами.

Одни частицы в процессе подъема полностью минерализованного пузырька могут вытеснять другие, однако селективность и скорость этого процесса не достаточно изучены. Свидетельством стесненности движения частиц при флотации в чановых машинах является смещение точки максимального извлечения в область меньших значений H при увеличении содержания твердого в питании операции (рис. 7.4), а также отсутствие экспоненциального снижения извлечения при возрастании скорости потока пульпы в камере. (Не сложно показать, что при свободной флотации $\epsilon = 1 - \exp(-a/Q_l)$, а при ограничении подачи воздуха $\epsilon = b/Q_l$, где a, b - коэффициенты, Q_l - объемный поток пульпы при данном содержании в ней твердой фазы.) Интенсивность перемешивания при $H > 5d_c$ практически не зависит от высоты камеры. При $H < 5d_c$ следует учитывать неравномерность барбо-

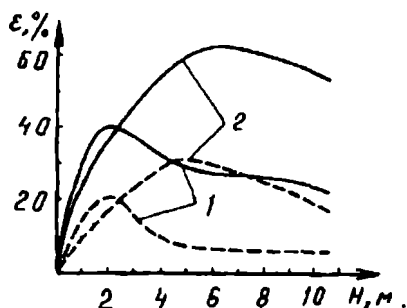


Рис. 7.4. Зависимость извлечения ϵ меди (сплошные линии) и никеля (штриховые линии) от глубины погружения аэратора H в колонной флотомашине при содержании твердого 43% (кривые 1) и 30% (кривые 2)

тажного слоя в поперечном направлении. В этом случае применение диффузионной модели некорректно, кроме того, при значительном выходе пенного продукта и наличии тонкодисперсных пузырьков в пульпе возможно увеличение минеральной нагрузки на пузырьке и увлечение его потоком вниз.

Расчеты показывают, что при скорости потока пульпы 0,7 см/с и плотности твердого $\rho_p = 4 \text{ г/см}^3$ полностью нагруженные пузырьки диам. $< 0,3 \text{ мм}$ будут вынесены потоками в хвосты. Во-вторых, увеличение траектории движения пузырьков в пульпе способствует их коалесценции. Степень коалесценции зависит от поверхностного натяжения пузырька, плотности и вязкости пульпы. В плотных пульпах изменение среднего размера пузырька по высоте камеры может составлять более 100%. При коалесценции пузырьков возможен отрыв закрепившихся на их поверхности частиц. Увеличение среднего размера пузырьков снижает интенсивность минерализации и продолжительность их подъема, ускоряет циркуляцию пульпы. Высота зоны минерализации ограничена площадью свободной поверхности пузырьков.

Аэрация. При достижении 50%-й занятости площади поверхности пузырьков скорость их минерализации уменьшается, а при приближении этой величины к 100% дальнейшего увеличения минеральной нагрузки не происходит. Минимальный расход воздуха, который может обеспечить требуемые показатели при $d_p < d_b$, рассчитывают по формуле

$$Q_{g \min} = \frac{\gamma Q_p}{6 \delta \rho_p} \cdot \frac{d_b}{d_p},$$

где γ - выход концентрата; δ - коэффициент упаковки частиц на поверхности; ρ_p - плотность частиц; d_b , d_p - диаметр соответственно пузырька и частицы. При регулировании подачи воздуха следует учитывать зависимость дисперсного состава пузырьков и коэффициента диффузии от приведенной скорости потока воздуха v_g :

$$\begin{aligned} d_b &\sim v_g^{1/4}; \\ D &\sim v_g^{1/3}. \end{aligned}$$

Увеличение аэрации в области $Q_g > Q_{g \min}$ влияет на элементарный акт флотации сложным образом: с одной стороны, увеличивается концентрация пузырьков в пульпе, а с другой стороны, в результате возрастания их среднего диаметра уменьшается гидродинамический коэффициент захвата. Вследствие этого на зависимости извлечения от подачи воздуха обычно имеется максимум (рис. 7.5). При флотации медной руды в лабораторной машине максимальное извлечение наблюдалось при при-

веденной скорости воздуха $v_g = 2-2,5$ см/с. Следует учитывать также интенсификацию неселективного механического выноса и изменение структуры пены при увеличении v_g .

Плотность пульпы. Увеличение плотности пульпы позволяет уменьшить объем камеры флотационной машины при неизменном времени флотации. Экспериментальное сравнение показателей флотации угля в чановых и импеллерных машинах показывает, что процесс разделения в чановом аппарате менее чувствителен к увеличению содержания твердого. При увеличении плотности пульпы в импеллерных машинах повышаются скорость коагуляции частиц и степень их механического выноса. Низкая интенсивность перемешивания в пневматических машинах и наличие зоны очистки позволяют предотвратить отрицательные последствия повышения содержания твердого. При расчете оптимальной плотности пульпы следует учитывать усиление коалесценции пузырьков и повышение неоднородности течения в радиальном направлении при увеличении плотности и вязкости среды. При постоянных значениях скорости потока пульпы и объема камеры, по данным И.И.Максимова, В.И.Янцена и других исследователей, увеличение плотности пульпы снижает эффективность процесса (рис. 7.6). При незначительной глубине погружения аэратора показатели слабо зависят от плотности пульпы, при увеличении глубины снижается эффективность процесса ограниченности поверхности пузырьков и их плавучести. Очевидно, что при постоянной аэрации насыщение поверхности наступает тем раньше, чем больше плотность питания (рис. 7.7). Однако для практи-

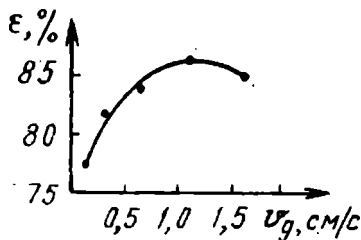


Рис. 7.5. Зависимость извлечения ϵ меди от приведенной скорости воздуха v_g в колонном аппарате

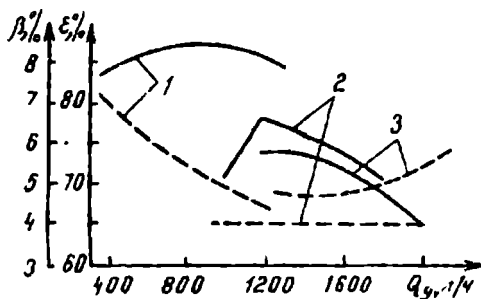


Рис. 7.6. Зависимость извлечения ϵ меди (сплошные линии) и ее содержания β в концентрате (штриховые линии) от расхода воздуха Q_g в противоточной колонне diam. 10 см при расходе пульпы 360, 600 и 720 л/ч (соответственно кривые 1, 2, 3)

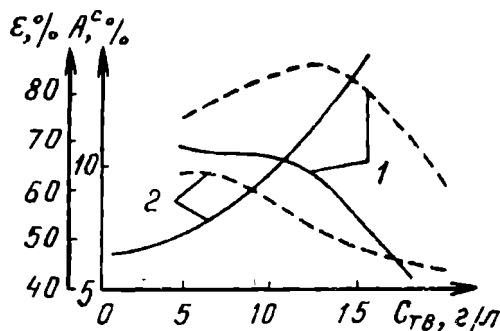


Рис. 7.7. Зависимость зольности концентрата A^c (сплошные линии) и извлечения горючей массы ε (штриховые линии) от содержания твердого $C_{тв}$ в колонной (кривые 1) и импеллерной (кривые 2) флотомашинах

в интервале изменение подачи пульпы в машину вызывает увеличение приведенной скорости пульпы и способствует повышению эффективности работы колонных машин при незначительном снижении извлечения ценных компонентов. Максимальная производительность машины по пульпе ограничена нарушением процесса флотации, когда скорость нисходящих потоков становится больше скорости подъема минерализованных воздушных пузырьков.

Австралийскими исследователями изучено влияние подачи в пенный слой воды на показатели колонной флотации угля в пилотной установке диам. 10 см и высотой 4,2 м при подаче пульпы и воды соответственно 3-10 и 0-4 л/мин. Установлено, что кривая обогатимости приближается к предельной (рассчитанной на основе фракционного анализа) при уменьшении подачи пульпы. С увеличением расхода промывной воды снижается как зольность концентрата, так и извлечение горючей массы. При экспериментальном исследовании углей 12 типов установлено, что в случае зольности концентрата не менее 8% снижение зольности на 6% (что обычно обеспечивается подачей промывной воды с приведенной скоростью 0,3-0,6 см/с) приводит к уменьшению выхода концентрата лишь на 5% (при флотации угля фракции -100 мкм). Экономические расчеты свидетельствуют о целесообразности подачи воды в пенный слой для получения высококачественных концентратов.

ческих расчетов важнее другой вопрос: как изменяются показатели при увеличении плотности пульпы, если производительность по твердому не изменяется. Экспериментальные данные Дж.Гроппо свидетельствуют о повышении как извлечения, так и качества концентрата при повышении плотности пульпы до определенного предела.

По мнению автора, подтвержденному результатами промышленных испытаний, в технологическом ин-

Определение объема, вместимости и производительности чановых (колонных) флотомашин

1. Объем цилиндрической части машины ($V_{\text{ц}}$), м^3 ,

$$V_{\text{ц}} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot H_{\text{ц}}, \quad (1)$$

где D - внутренний диаметр камеры, м; $H_{\text{ц}}$ - высота цилиндрической части чана до сливного устройства, м.

2. Объем конической части камеры ($V_{\text{к}}$), м^3

$$V_{\text{к}} = \frac{\pi H_{\text{к}}}{3} (R^2 + r^2 + rR), \quad (2)$$

где $H_{\text{к}}$ - высота конуса, м; R - радиус цилиндрической части чана, м; r - радиус шлюза, м.

3. Объем обсадной трубы ($V_{\text{о}}$), м^3

$$V_{\text{о}} = \frac{\pi d^2}{4} \cdot H, \quad (3)$$

где d - диаметр (наружный) обсадной трубы, м; H - высота обсадной трубы, м.

4. Расчетный объем камеры

$$V_{\text{р}} = V_{\text{ц}} + V_{\text{к}} - V_{\text{о}}. \quad (4)$$

5. Вместимость машины с учетом заполнения ее рудой на $2/3$ от полезного объема (G), т

$$G = 2/3 V_{\text{р}} \delta, \quad (5)$$

где $V_{\text{р}}$ - расчетный объем камеры, м^3 ; δ - насыпной вес руды, $\text{т}/\text{м}^3$.

6. Производительность машины по исходной руде ($Q_{\text{и}}$), $\text{т}/\text{ч}$,

$$Q_{\text{и}} = \frac{G}{t}, \quad (6)$$

t - продолжительность флотации, ч.

Если известна удельная производительность машины, то производительность по исходному материалу определяется по формуле

$$Q_{\text{и}} = qV, \quad (7)$$

где q - удельная производительность машины по исходной руде, $\text{т}/\text{ч}$ на 1 м^3 объема машины; V - объем машины, м^3 .

Расчет эрлифта

1. Относительное погружение эрлифта определяется по формуле

$$\alpha = \frac{H}{H + h} \cdot 100, \quad (8)$$

где h - высота подъема пульпы, м; H - глубина погружения эрлифта, м.

2. Пусковое давление подводимого в редуктор сжатого воздуха при-

нимается на 15-20% выше гидростатического давления столба пульпы, соответствующего погружению эрлифта:

$$p_n = (1,15 - 1,20) \cdot p_2 = (1,15 - 1,20) \gamma_o H + p_a, \quad (9)$$

где p_n - пусковое давление, мм вод. ст.; p_2 - абсолютное давление столба пульпы у редуктора, мм вод. ст.; γ_o - удельный вес пульпы в обсадной трубе, т/м³; H - глубина погружения, м; p_a - атмосферное давление, мм вод. ст.

3. Рабочее давление должно быть равно давлению столба пульпы

$$p_p = p_2 = \gamma_o H + p_a, \quad (10)$$

где p_p - рабочее давление, мм вод. ст.

4. Определение расхода воздуха на работу эрлифта.

Для подъема 1 м³ пульпы на высоту h требуется произвести полезную работу

$$A = (G_n - G_o) H + G_n h = (\gamma_n - \gamma_o) H + \gamma_n h, \text{ кгс} \cdot \text{м}, \quad (11)$$

где G_n - вес пульпы в подъемной трубе, т; G_o - вес пульпы в обсадной трубе, т; H - глубина погружения эрлифта, м; h - высота подъема пульпы, м; γ_n - удельный вес пульпы в подъемной трубе, т/м³; γ_o - удельный вес пульпы в обсадной трубе, т/м³.

Для осуществления указанного подъема затрачивается работа на сжатие в компрессоре свободного воздуха объемом V_c от первоначального давления (равного атмосферному) p_o до давления p_1 .

При изотермическом процессе работа сжатия

$$A_1 = p_o V_c \lg \frac{p_1}{p_o}, \text{ кгс} \cdot \text{м}, \quad (12)$$

или в десятичных логарифмах

$$A_1 = 2,303 p_o V_c \lg \frac{p_1}{p_o}, \text{ кгс} \cdot \text{м}, \quad (13)$$

где $p_1 = 10000 \text{ кг/м}^2$;

$$p_1 = \frac{p_u + 10}{10} \text{ атм} = 10000 \frac{p_u + 10}{10}, \text{ кг/м}^2.$$

Отсюда

$$A_1 = 2,303 \cdot 10000 V_c \lg \frac{p_u + 10}{10}, \text{ кгс} \cdot \text{м}. \quad (14)$$

Коэффициент полезного действия эрлифта определяется как частное от деления A на A_1 :

$$\eta = \frac{A}{A_1} = \frac{(\gamma_n - \gamma_o) H + \gamma_n h}{2,303 \cdot 10000 V_c \lg \frac{p_u + 10}{10}}, \quad (15)$$

Отсюда объем воздуха, который требуется для подъема 1 м³ пульпы на высоту h , определяется по формуле

$$V_c = \frac{(\gamma_n - \gamma_o) H + \gamma_n h}{2,303 \cdot 10000 \eta \lg \frac{p_u + 10}{10}} = \frac{(\gamma_n - \gamma_o) H + \gamma_n h}{23 \cdot 1000 \eta \lg \frac{p_u + 10}{10}}. \quad (16)$$

5. Расчет диаметра подъемной трубы эрлифта. Необходимое сечение подъемной трубы эрлифта может быть рассчитано по количеству пропускаемой через нее в единицу времени пульпы.

Необходимая скорость пульпы при входе в заборную трубу из условия подъема наиболее крупных зерен руды должна быть больше скорости витания:

$$v_{ax} > 36 \sqrt{d_k (\delta_k - 1)}, \quad (17)$$

где d_k - диаметр наиболее крупных зерен руды, см; δ_k - удельный вес руды, г/см³.

Скорость движения пульпы при входе в заборную трубу на основании данных практики принимают в пределах 0,9-2,4 м/с.

Диаметр подъемной трубы d , м определяется по следующей формуле:

$$d = \sqrt{\frac{4Q_n}{\pi v_{ax} 3600}} = \frac{1}{30} \sqrt{\frac{Q_n}{\pi v_{ax}}}, \quad (18)$$

где Q_n - производительность эрлифта по пульпе, м³/ч; v_{ax} - рабочая скорость входа пульпы в подъемную трубу, м/с.

Диаметр подъемной трубы можно определить также исходя из скорости движения в ней пульповоздушной смеси, не допускающей осаждения зерен руды.

Рабочая скорость пульповоздушной системы (v_n) в подъемной трубе обычно принимается в 5-10 раз больше скорости витания:

$$v_n = (5 - 10)u. \quad (19)$$

Тогда потребная площадь сечения трубы (F , м²),

$$F = \frac{Q_n + V}{60v_g}, \quad (20)$$

где Q_n - объем подаваемой пульпы, м³/мин; V - объем воздуха, подаваемого в эрлифт, м³/мин.

Диаметр трубопровода

$$d = \sqrt{\frac{4F}{\pi}}. \quad (21)$$

6. Длина заборной трубы принимается равной 10% от высоты подъема пульпы h .

7. Сечение воздухоподводящей трубы определяется по формуле

$$d_g = \frac{1}{30} \sqrt{\frac{V}{\pi v_g}}, \quad (22)$$

где d_g - диаметр воздухоподводящей трубы, м; V - количество подаваемого воздуха, м³/ч; v_g - скорость воздуха в воздухоподводящей трубе,

м/с (принимают $v = 6-9$ м/с).

Пример. Рассчитать основные параметры флотомашины чанового типа для следующих условий:

Крупность исходной руды, d_k , мм	< 0,15
Геометрический объем камеры, V , м ³	166
Полезный расчетный объем камеры, V_p , м ³	150
Насыпной вес руды, δ , т/м ³	1,5
Удельный вес руды, δ_k , г/см ³	3,2
Глубина погружения эрлифта, H , м	7,5
Высота подъема пульпы, h , м	2,5
Длина трубы эрлифта, l , м	10

Расчет производительности

1. Вместимость камеры с учетом заполнения ее на 2/3 от расчетной величины V_p

$$G = \frac{2}{3} V_p \delta = \frac{2}{3} \cdot 150 \cdot 1,5 = 150 \text{ т.}$$

2. Производительность камеры по исходной руде при продолжительности флотации 0,3 ч

$$Q_n = \frac{G}{t} = \frac{150}{0,3} = 50 \text{ т/ч.}$$

Расчет эрлифта (рис. 7.8)

1. Относительное погружение эрлифта

$$\alpha = \frac{H}{H + h} \cdot 100 = \frac{7,5}{7,5 + 2,5} \cdot 100 = 75\%.$$

2. Рабочее давление воздуха, подводимого в редуктор эрлифта,

$$p_p = \gamma_0 H + p_0 = 1,05 \cdot 7,5 + 10 = 17,87 \text{ м,}$$

или 179 кПа.

3. Пусковое давление воздуха, подводимого в редуктор.

$$p_n = 1,2 p_p = 1,2 \cdot 1,79 = 215 \text{ кПа.}$$

4. Средний удельный вес пульпы на основании данных практики принимается равным $\gamma_n = 1,5$ г/см³.

5. Расход воздуха на подъем 1 м³ пульпы

$$V_c = \frac{(\gamma_n - \gamma_0) \cdot H + \gamma_n h}{23 \cdot 1000 \eta \lg \frac{p_n + 10}{10}} = \frac{(1500 - 1050)7,5 + 1500 \cdot 2,5}{23 \cdot 1000 \cdot 0,35 \lg \frac{1,79}{1}} = 3,52 \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ пульпы,}$$

или на 1 т пульпы

$$\frac{V}{\gamma_n} = \frac{3,52}{1,5} = 2,33, \text{ м}^3/\text{т.}$$

6. Определение диаметра подъемной трубы эрлифта.

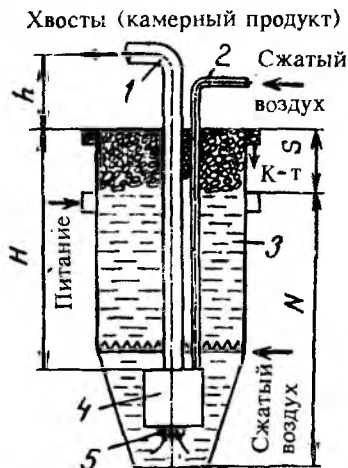
Выход камерного продукта - 85% от исходной руды, тогда производительность эрлифта по руде должна быть

$$Q_m = Q_n \cdot 0,85 = 75 \cdot 0,85 = 64 \text{ т/ч.}$$

При среднем удельном весе пульпы, выдаваемой эрлифтом, равном $\gamma_n = 1,5$ г/см³, и удельном весе руды, равном $\delta_k = 3,0$, содержание твердого в пульпе P

Рис. 7.8. Схема эрлифта пневматической флотомашины:

1 - подъемная труба; 2 - воздухоподводящая труба; 3 - камера; 4 - редуктор; 5 - заборная труба эрлифта



$$P = \frac{\delta_s(\gamma_n - 1)}{\gamma_n(\delta - 1)} = \frac{3,0(1,5 - 1)}{1,5(3 - 1)} = 0,5, \text{ или } 50\%.$$

Отсюда производительность эрлифта по пульпе равна

$$Q_n = \frac{64}{3} + 64 = 85 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Принимаем рабочую скорость входа воды в подъемную трубу $v_{вх} = 0,9 \text{ м/с}$. Диаметр подъемной трубы

$$d = \frac{1}{30} \sqrt{\frac{Q_n}{\pi v_{вх}}} = \frac{1}{30} \sqrt{\frac{85}{3,14 \cdot 0,9}} = 0,183 \text{ м}.$$

Принимается ближайший большой стандартный размер трубы.

7. Расход воздуха на работу эрлифта составит

$$V_s = Q_n V_c = 85 \cdot 3,52 = 300 \text{ м}^3/\text{ч}, \text{ или}$$

$$V_s = \frac{300}{60} = 5 \text{ м}^3/\text{мин}.$$

8. Определение расхода воздуха на аэрацию. На основании данных исследования флотуемости руды в опытной камере удельный расход воздуха на единицу свободной поверхности камеры q составил $0,27-0,30 \text{ м}^3/\text{мин}$ на 1 м^2 .

Общий расход воздуха на флотацию и транспортировку составит

$$Q_{мин} = qSE = 0,30 \cdot 23,7 \cdot 0,5 = 3,55 \text{ м}^3/\text{мин},$$

где S - полное сечение камеры, м^2 ; E - свободный объем.

9. Суммарный расход воздуха на флотацию и работу эрлифта при одновременно работающих четырех камерах составит

$$V = 4(Q_{мин} + V_s) = 4(3,55 + 5) = 35 \text{ м}^3/\text{мин}.$$

К установке принимаются два компрессора производительностью по $40 \text{ м}^3/\text{мин}$ при давлении до 300 кПа . Рабочим давлением этих компрессоров будет 200 кПа ; мощность

электродвигателя 245 кВт. Один из них будет рабочим, а другой - резервным.

Определение аэрационных параметров пневматических флотомашин чанового (колонного) типа

В настоящее время нет общепринятого показателя, характеризующего аэрационные параметры флотомашин. Поэтому в технических характеристиках флотомашин, применяемых для флотации руд цветных металлов, угля и других полезных ископаемых, аэрационные параметры обычно не указываются.

В работах Механобра степень аэрации пульпы определяют отношением объема засасываемого импеллером воздуха Q_a к объему флотационной камеры V_k , м³:

$$A = \frac{Q_a}{V_k}. \quad (1)$$

По этой формуле оценивается только объем (относительный или абсолютный) подаваемого (засасываемого) воздуха без учета его дисперсности и равномерности распределения в пульпе.

Попытка оценивать аэрационную способность флотационных машин по удельной поверхности воздушных пузырьков является правильной, но практически осуществить такой метод невозможно вследствие трудности определения "гранулометрической характеристики" всей массы воздушных пузырьков во флотационной машине (камере).

В общем случае приведенный аэрационный параметр флотационной машины A_n должен оцениваться зависимостью:

$$A_n = f(A_1 A_2 A_3 A_4), \quad (2)$$

где A_1 - газосодержание; A_2 - крупность воздушных пузырьков (отношение диаметра оптимального пузырька к диаметру максимального пузырька); A_3 - равномерность распределения воздуха в пульпе; A_4 - интенсивность перемешивания, характеризующая выделение газа из раствора.

Трудность установления приведенного аэрационного параметра заключается в практической невозможности прямого определения параметров A_2 и A_4 . Параметры A_1 и A_3 можно определить количественно, а параметры A_2 и A_4 зависят от интенсивности перемешивания, характеризуемой объемом подаваемого (засасываемого) воздуха.

Объем воздуха, проходящего через флотационную камеру, измеряется способом, показанным на рис. 7.9 (прибор Косылева).

Измерительный цилиндр, наполненный жидкостью, повернутый отверстием вниз, удерживается так, что в него могут попадать поднимаю-

щиеся воздушные пузырьки.

Этот метод измерения довольно прост и удобен, так как степень аэрации может быть рассчитана непосредственно по уменьшению столба жидкости Δh в цилиндре. Объем воздуха V , м³, захваченного за время t , мин, при площади внутреннего сечения цилиндра F , см², определяется равенством

$$V = A F t, \text{ см}^3.$$

Объем воздуха в цилиндре можно также определить из выражения

$$V = F \Delta h.$$

Приравнявая оба выражения, получаем:

$$A = \frac{\Delta h}{t}, \text{ см}^3/\text{мин на } 1 \text{ см}^2. \quad (3)$$

На практике замер аэрации производят следующим способом.

Стекланный цилиндр до краев заполняют водой, после чего закрывают его горловину ладонью руки или пластиной (рис. 7.10). Перевернув цилиндр горловиной вниз, опускают его в пульпу, находящуюся в камере флотационной машины, так, чтобы он по возможности занимал вертикальное положение, а его горловина находилась на некоторой глубине ниже уровня столба пены. Затем горловину открывают, давая тем самым возможность пузырькам воздуха проходить внутрь цилиндра.

По шкале, нанесенной на поверхность цилиндра, отмечают уровень воды в нем и начинают отсчет времени по секундомеру. Через некоторое время отмечают нижний уровень воды, установившийся в результате вытеснения ее воздухом. Расчет степени аэрации ведется по формуле (3).

Обычно замеры аэрации производят в ряде точек, условно расположенных в шахматном порядке на поверхности камеры, а затем подсчитывают средние дан-

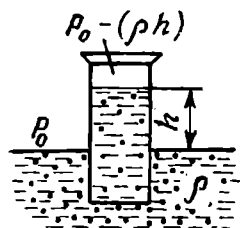


Рис. 7.9. Схема ввода воздуха в измерительный цилиндр

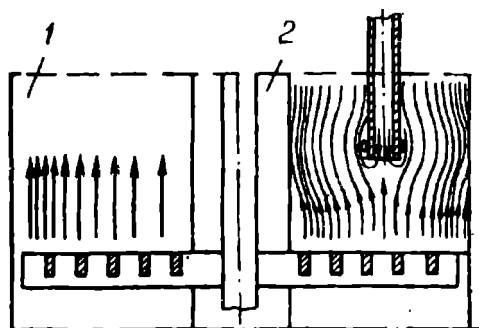


Рис. 7.10. Искажение поля скоростей в камере флотомашинной водой, вытесняемой из цилиндра воздухом:

1 - обычное поле скоростей в камере; 2 - поле скоростей после начала заполнения цилиндра воздухом

ные.

Вышеописанный способ замера аэрации является простым, но имеет ряд недостатков. Опущенный в движущийся поток пульпы измерительный цилиндр вызывает изменения направления движения пульпы, то есть изменяет структуру поля скоростей (см.рис. 7.10).

Кроме того, воздух, накопившийся в цилиндре, вытесняет находящуюся в нем воду, которая, выходя в камеру флотационной машины,

встречается с движущейся пульповоздушной смесью и еще более искажает ее поле скоростей. Эти изменения приводят к ошибкам при измерении, а следовательно, к расхождению между действительным количеством воздуха, проходящего через пульпу в точке расположения цилиндра, и замеряемым. Для получения достоверных данных необходимо в каждой точке производить несколько замеров.

Общее количество засасываемого воздуха определяется умножением величины среднего значения степени аэрации на площадь зеркала флотации (горизонтальное сечение камеры на уровне пенного слоя).

А.А.Шаминым, С.М.Усковым, П.Г.Ворониным для замера аэрации пульпы был разработан прибор (рис. 7.11). Прибор состоит из вертикальной трубки с поплавком (ротаметром), насаженным на погружающееся устройство (стакан с конусообразным дном-индикатором). Отношение диаметра стакана к диаметру поплавковой трубки 100:1. Индикатор может иметь квадратное, круглое или

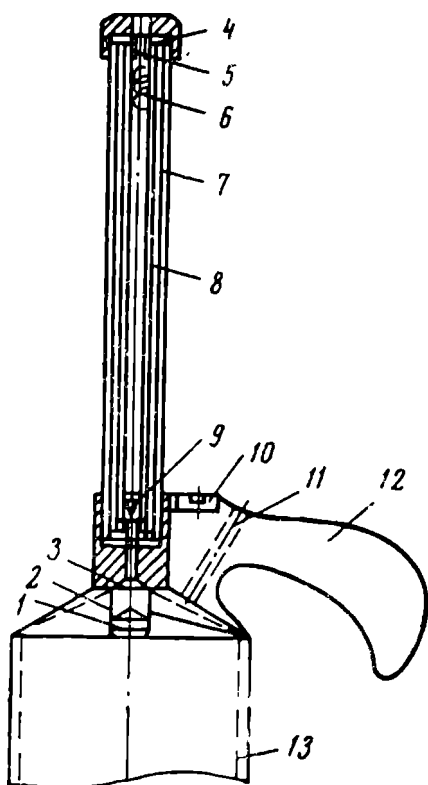


Рис. 7.11. Прибор для замера аэрации пульпы:

1 - затвор; 2 - цилиндр; 3 - седло; 4 - пробка; 5 - воздухоотводный канал; 6 - шкала; 7 - предохранительный кожух; 8 - калиброванная трубка; 9 - поплавок; 10 - уровнемер; 11 - отверстие для отвода воздуха при погружении прибора в пульпу; 12 - рукоятка; 13 - индикатор

прямоугольное сечения. Нижняя часть его открыта, в верхней части крепится вертикальная калиброванная трубка с поплавком, который при притоке воздуха или газа выносится вверх по трубке до высоты, соответствующей количеству протекающего газа в единицу времени.

Трубка имеет предохранительный съемный кожух. Верхняя часть индикатора снабжена рукояткой с уровнем и отверстием для отвода части воздуха при погружении прибора в пульпу. Степень аэрации пульпы определяется количеством проходящего по трубке воздуха по шкале в соответствии с высотой подъема поплавка. Под рукояткой находится конусообразное седло с затвором, который при сильном погружении прибора в пульпу поднимается по цилиндру вверх, предотвращая попадание пульпы в калиброванную трубку. На верхнюю часть калиброванной трубки навинчивается пробка с воздухоотводным каналом. Этот прибор прост по устройству, легко переносится и дает возможность определять аэрацию пульпы непосредственно в любой точке поверхности флотационной камеры.

Равномерность распределения воздуха в объеме флотируемой пульпы оценивается по методике Н.Г.Бедраня с внесением корректив применительно к флотомашинам типа ФП. Сущность методики заключается в следующем.

При заданном режиме работы чановой (колонной) флотомшины замеряется количество воздуха, проходящего в единицу времени. Замеры производятся в различных точках, распределенных равномерно по всей поверхности камеры в шахматном порядке. Для флотационных машин типа ФП-80 сторона квадрата была выбрана 850 мм. Замер аэрации в каждой точке производится многократно. Средние данные замеров заносят в табл. 7.2, где пересчитываются в показатели относительной степени аэрации (аэрация в точке с максимальным значением принимается за 100%). Результаты расчета наносятся на диаграмму поверхности камеры в виде кружков, частично или полностью заштрихованных, в соответствии с процентом относительной степени аэрации. Полученная диаграмма позволяет визуально судить о равномерности насыщения камеры воздухом.

Коэффициент равномерности распределения воздуха вычисляется по формуле

$$\rho = \sqrt{1 - \frac{\sigma_x^2}{\sigma_o^2}}, \quad (4)$$

где σ_x - среднесквадратичное отклонение; σ_o - средний квадрат от общей средней, \bar{x} .

Таблица 7.2

Результаты замера равномерности аэрации пульпы во флотационной камере

Точка	Аэрация, см ³ /мин на 1 см ²	Относительная степень аэрации, %	$x - x_1$	$\sigma_x^2 = (x - \bar{x})^2$
1	120	100	+25	625
2	95	78	0	-
3	95	78	0	-
4	60	50	-25	625
		$\Sigma = 306$		$\Sigma = 1250$
		$x = 76$		$\sigma = \sqrt{\frac{1250}{4}}$

Таблица 7.3

Коэффициенты равномерности распределения воздуха, %

Режим работы флотомашины	Относительная степень аэрации (в точках)				Коэффициент равномерности распределения воздуха
	1	2	3	4	
I	100	100	100	100	1,0
II	100	100	100	75	0,97
III	100	100	100	75	0,94
IV	100	100	100	50	0,91
V	100	75	75	100	0,82
VI	100	75	75	0	0,79
VII	100	75	25	25	0,71
VIII	100	100	0	0	0,62

Например, коэффициент, подсчитанный по данным табл. 7.3, составляет:

$$\rho = \sqrt{1 - \frac{\sigma_x^2}{\sigma_o^2}} = \sqrt{1 - \frac{321,5}{5625}} = 0,972.$$

Как видно из приведенных данных, коэффициенты равномерности распределения воздуха колеблются от 0 до 1.

Описанный метод определения коэффициентов равномерности распределения воздуха может быть применен для оценки различных флотационных камер или режимов работы одной и той же флотационной камеры в том случае, если аэрированная площадь составляет менее 50 % всей площади зеркала флотации.

Выбор типа, размера и расчет необходимого количества камер пневматических флотомашин чанового (колонного) типа

Общий поток пульпы в питании флотации, $\text{м}^3/\text{мин}$, рассчитывают по формуле

$$Q_n^{\text{общ}} = \frac{P(R + \frac{1}{\delta})}{1440}, \quad (1)$$

где P - производительность по твердому в исходном питании, $\text{т}/\text{сут}$; R - отношение ж:т в пульпе; δ - плотность твердой фазы, $\text{т}/\text{м}^3$.

Поток пульпы одной нитки в соответствии с выбранным числом ниток определяется по формуле

$$Q_n = \frac{Q_n^{\text{общ}}}{m}, \quad (2)$$

где $Q_n^{\text{общ}}$ - общий поток пульпы, поступающей на флотацию, $\text{м}^3/\text{мин}$; m - число ниток.

Общий объем камер определяется из уравнения

$$V_{\kappa}^{\text{общ}} = K_p \cdot K_{об} \cdot p \cdot t, \quad (3)$$

где K_p - коэффициент неравномерности питания (колебания тоннажа плотности, помола и др.). $K_p = 1,25$; $K_{об}$ - коэффициент удельного относительного объема, вычисляемый по формуле

$$K_{об} = 0,0016 \cdot R - 0,00225, \quad (4)$$

$4 \geq R \geq 2,3$; при $R = 1,56$ $K_{об} = 0,0016$; R - степень разбавления питания (ж:т по массе).

Количество камер в нитке, необходимое к установке, подсчитывают по формуле

$$n = \frac{V_{\kappa}^{\text{общ}}}{m \cdot V_{\kappa}}, \quad (5)$$

где V_{κ} - объем камеры, м^3 .

Общее количество камер, необходимое для флотации, вычисляют по формуле

$$n^{\text{общ}} = n \cdot m, \quad (6)$$

где n - количество камер в одной нитке; m - число ниток.

Общая потребляемая мощность флотомашин, кВт, подсчитывают по

ся по формуле

$$N_{\text{потр}}^{\text{общ}} = N_{\text{потр}} \cdot n^{\text{общ}}, \quad (7)$$

где $N_{\text{потр}}$ - потребляемая мощность одной камеры, кВт.

Общая производственная площадь, занимаемая пневматическими флотомашинами, подсчитывается как произведение

$$S^{\text{общ}} = S_k \cdot n^{\text{общ}}, \quad (8)$$

где S_k - площадь, занимаемая одной камерой, м².

Общая масса пневматических флотомашин определяется по формуле, т,

$$A = Q_k \cdot n^{\text{общ}}, \quad (9)$$

где Q_k - масса одной камеры.

Исходные данные к расчету пневматических флотомашин чанового типа приведены ниже:

Основная, контрольная флотации

Производительность:

т/год	918920
т/сут	2703
Плотность обрабатываемой руды, т/м ³	2,7
Содержание твердого в пульпе, %	30
Содержание класса -0,074 мм в питании, %	65
Отношение ж:т в питании	2,33
Время, необходимое для достижения заданного извлечения	
в основной и контрольной флотации, полученное	
в импеллерной флотомашине непрерывного действия	
на оптимальных потоках, мин	20
Выход пенного продукта, %	Более 5

Пример расчета необходимого количества камер пневматических флотационных машин чанового типа дан в табл. 7.4.

Таблица 7.4

Расчет пневматических флотомашин чанового типа

Параметр, номер формулы	Расчет и выбор пневматических флотомашин
Определение общего потока пульпы (1), $Q_n^{общ}, \text{ м}^3/\text{мин}$	$\frac{2703 \cdot (2,33 + \frac{1}{2,7})}{1440} = 5,1$
Определение типа пневматических флотомашин и числа ниток	Согласно производительности пневматических машин чанового типа рекомендуется для установки ФП-10 — 3 нитки ФП-25 — 1 нитка ФП-40 — 1 нитка ФП-80 — 1 нитка ФП-100 — 1 нитка
Определение потока пульпы на одну нитку (2), $Q_n, \text{ м}^3/\text{мин}$	При трех нитках флотомашин $5,1:3 = 1,7$
Определение общего объема камер (3) - (4), $V_k^{общ}, \text{ м}^3$	$0,0016 \cdot 2,33 - 0,00225 = 0,00148 \frac{\text{м}^3 \cdot \text{сут}}{\text{т} \cdot \text{мин}}$ $1,25 \cdot 0,00148 \cdot 2703 \cdot 20 = 100$
Определение количества камер в нитке (5), n	ФП-10 — $100:3:10 = 4$ ФП-25 — $100:25 = 4$ ФП-40 — $100:40 = 3$ (ФП-25 $n = 1$ и ФП-40 $n = 2$. Всего 3 камеры)* ФП-80 — $100:80 = 2$ (ФП-25 — $n = 1$ и ФП-80 $n = 1$. Всего 2 камеры)* ФП-100 — $100:100 = 1$ * Так как в одной нитке должно быть установлено не менее 2 камер, то добавляем 1 камеру ФП-25; ФП-25 $n = 1$ и ФП-100 $n = 1$. Всего 2 камеры
Определение общего количества камер $n^{общ}$ (в комбинированных вариантах камеры ФП-25 устанавливать в головке флотации) (6)	ФП-10 — $4 \cdot 3 = 12$ ФП-25 — $4 \cdot 1 = 4$ ФП-40 — $3 \cdot 1 = 3$ (ФП-25 — 1 и ФП-40 — 2. Всего 3 камеры) ФП-80 — $2 \cdot 1 = 2$ (ФП-25 — 1 и ФП-80 — 1. Всего 2 камеры) (ФП-25 — 1 и ФП-100 — 1. Всего 2 камеры)
Определение общей потребляемой мощности (7), $N_{потр}^{общ}, \text{ кВт}$	ФП-10 — $21,8 \cdot 12 = 262$ ФП-25 — $29,0 \cdot 4 = 116$ ФП-40 — $43,5 \cdot 3 = 131$

Продолжение табл. 7.4

Параметр, номер формулы	Расчет и выбор пневматических флотомашин
	$(\Phi\text{П-25} + \Phi\text{П-40}) - (29,0 \cdot 1 + 43,5 \cdot 2) = 116$ $\Phi\text{П-80} - 87,0 \cdot 2 = 174$ $(\Phi\text{П-25} + \Phi\text{П-80}) - 29,0 \cdot 1 + 87,0 \cdot 1 = 116$ $(\Phi\text{П-25} + \Phi\text{П-100}) - 29,0 \cdot 1 + 118,0 \cdot 1 = 147$
Определение общей площади, занимаемой машинами (без карманов и пенных желобов) (8), $S^{\text{общ}}, \text{м}^2$	$\Phi\text{П-10} - 3,1 \cdot 12 = 37,2$ $\Phi\text{П-25} - 9,1 \cdot 4 = 36,4$ $\Phi\text{П-40} - 9,1 \cdot 3 = 27,3$ $(\Phi\text{П-25} + \Phi\text{П-40}) - 9,1 \cdot 1 + 9,1 \cdot 2 = 27,3$ $\Phi\text{П-80} - 9,1 \cdot 2 = 18,2$ $(\Phi\text{П-25} + \Phi\text{П-80}) - 9,1 \cdot 1 + 9,1 \cdot 1 = 18,2$ $(\Phi\text{П-25} + \Phi\text{П-100}) - 9,1 \cdot 1 + 9,1 \cdot 1 = 18,2$
Определение общей массы (9), А, т	$\Phi\text{П-10} - 3,1 \cdot 12 = 37,2$ $\Phi\text{П-25} - 5,8 \cdot 4 = 23,2$ $\Phi\text{П-40} - 7,2 \cdot 3 = 21,6$ $\Phi\text{П-80} - 12,0 \cdot 2 = 24,0$ $(\Phi\text{П-25} + \Phi\text{П-80}) - 5,8 \cdot 1 + 12,0 \cdot 1 = 17,8$ $(\Phi\text{П-25} + \Phi\text{П-100}) - 5,8 \cdot 1 + 14,0 \cdot 1 = 19,8$

Список использованной литературы

1. Мещеряков Н.Ф. Кондиционирующие и флотационные аппараты и машины. М.: Недра, 1990. 236 с.
2. Бувеч Ю.А., Минаев Г.А. Струйное псевдоожижение. М.: Химия, 1986. 134 с.
3. Попкович Г.С., Репин Б.Н. Системы аэрации сточных вод. М.: Стройиздат, 1986. 133 с.
4. Плаксин В.Г., Путилов А.В., Пименов И.В., Поспелов М.Н. Эрлифтные аэрационные системы для биохимических установок коксохимических заводов. М.: Черметинформация. 1986. 21 с. (Обзор. инф.).
5. Сивак В.М., Янушевский Н.Е. Аэраторы для очистки природных и сточных вод. Львов: Вища школа. 1986. 122 с.
6. А.с. 1523170 СССР. Пневматическая колонная машина // Открытия. Изобретения. 1987. N 43.
7. А.с. 1411045 СССР. Аэратор пневматической флотационной машины // Открытия. Изобретения. 1988. N 27.
8. А.с. 1024422 СССР. Струйный аэратор // Открытия. Изобретения. 1987. N 46.
9. А.с. 1496086 СССР. Аэратор пульпы // Открытия. Изобретения. 1987. N 8.
10. Дебердеев И.Х., Рубинштейн Ю.Б., Романов В.К. Современные направления в конструировании флотационных машин. М.: ЦНИЭИуголь. 1985. (Обогащение и брикетирование угля: Обзор. инф. Вып. 6).
11. Живанков Г.В., Кулешов В.Ю. К оценке распределения питания в пене работающего сепаратора // В кн. Исследования по разработке новых флотационных машин и усовершенствованию существующих конструкций. Л.: Изд. Механобра, 1983. С. 95-97.
12. Малиновский В.А. Пенная сепарация // М.: Изд. ВЗПИ, 1976. С. 4-13.
13. Малиновский В.А. Селективное извлечение гидрофобных и гидрофобизированных частиц и некоторых поверхностно-активных веществ пенной сепарации. ДАН СССР, 1961. Т. 141. С. 420-423.
14. Матвеев Н.В. Пенная сепарация полезных ископаемых // М.: Недра, 1976.
15. Мелик-Гайказян В.И. Пенная сепарация // В кн.: Физико-химические основы теории флотации. М.: Наука, 1983. С. 222-241.
16. Семьянов А.И., Карнаухов В.В., Чередник В.Н. и др. Оперативный контроль вспенивающей способности пульпы // Цв. металлы. 1984. N 7. С. 100-103.
17. Рубинштейн Ю.Б. Противоточные пневматические флотационные машины. М.: ЦНИИцветмет экономики и информации. 1979. (Обогащение руд цветных металлов: Обзор. инф.).
18. Рубинштейн Ю.Б., Самыгин В.Д., Бурштейн М.А. Методика расчета гидродинамических характеристик колонных флотомаши. Изв. вузов. Цв. металлургия, 1984. N 6. С. 8-15.
19. Самыгин В.Д., Чертилин Б.С., Енбаев И.А. Закономерности минерализации пузырьков частицами инерционного размера // Коллоидный журнал. 1980. Т. 42. N 5. С. 898-905.
20. Тихомиров В.К. Пены. Теория и практика их получения и разрушения. М.: Химия, 1983.
21. Alizadeh A., Simonis W. Flotation of finest and ultra-fine size coal particles. Aufbereit.-Techn. 1985. V. 26. N 6. P. 363-366.
22. Bahr A., Imhoff R., Ludke H. Application and sizing of a new pneumatic flotation cell. 15 Congr. int. miner., Cannes, 2-9.06.85. V. 2. 1985. P. 314-325.

23. Changlian Xu. Kinetic models for batch and continious flotation in a flotation column. 15 Congr. int. miner., Cannes, 29.06.85. V. 3. 1985. P. 16-27.
24. Clingan B. V., Mc. Gregor D. R. Column flotation experience at Magma Copper Company. Minerals and Metall. Process. 1987 V. 4. N 3. P. 121-126.
25. Coffin V., Miszczak J. Column flotation operations at Mines Gaspé molybdenum circuit. 14 Int. Mineral Process. Congr., Toronto. 1982. Paper 4-21. P. 21/1-21/19.
26. Cutting G. W., Barber S. P., Newton S. Effects of froth structure and mobility on the performance and simulation of continuously operated flotation cell. Int. J. Mineral Process. 1986. V. 16. N 1-2. P. 43-61.
27. Dobby G. S., Amelunxen R., Finch J. A. Column flotation: some plant experience and model development. Autom. Miner. Resour. Dev. Proc. 1st IFAC Symp. 1986. P. 259-263.
28. Dobby G. S., Finch J. A. Mixing characteristics of industrial flotation columns. Chem. Eng. Sci. 1985. V. 40. N 7. P. 1061-1068.
29. Foot D. G., Mc. Kay d. J., Huilatt J. L. Column flotation of chromite and fluorite ores. Can. Metall. Quart. 1986. V. 25. N 1. P. 15-21.
30. Черных С.И. Повышение извлечения металлов из руд методом флотации с противотоком // Цв. металлургия. 1961. N 3. С. 23-24.
31. Черных С.И., Базанова Н.М., Рыскин М.Я. Анализ результатов флотации по факториальной схеме // За технический прогресс. Баку. 1971. N 3.
32. Черных С.И., Григорян Б.Х. Изучение влияния плотности пульпы на флотацию алунита // Азербайджанский химический журнал. Баку. 1974. N 5.
33. Черных С.И. О пневматической флотомашине колонного типа (объемы камер 10 и 40 м³) // Цв. металлы. 1976. N 8. С. 75-78.
34. Черных С.И., Сусликов Б.Ф., Моисеенко В.Ф., Новиков Н.А., Полсжаев В.В. Промышленные испытания пневматической флотомшины чанового типа // Цв. металлы. 1978. N 7. С. 106-107.
35. Черных С.И. Флотационные аппараты для очистки сточных вод // Цв. металлы. 1978. N 11. С. 101-104.
36. Черных С.И. Испытания пневматической флотационной машины чанового типа // Цв. металлургия. 1979. N 8. С. 29-31.
37. Черных С.И. О создании большеобъемных машин пневматического типа // Цв. металлы. 1979. N 12. С. 82-83.
38. Черных С.И. Флотационная пневматическая машина ФП-40. М.: ЦНИИцветмет экономики и информации. 1979. (Повышение эффективности производства и комплексности использования сырья при обогащении руд цветных металлов: Обзор. информ.).
39. Черных С.И., Кахаров А.К., Ракитский В.И. Создание и внедрение флотационной пневматической машины ФП-80 // Цв. металлургия. 1980. N 2. С. 21-22.
40. Черных С.И., Аскаров А.А., Парцил В.А. Промышленные испытания и внедрение флотационной пневматической машины ФП-10 // Цв. металлы. 1980. N 7. С. 46-48.
41. Черных С.И. Новый тип глубокой большеобъемной флотационной пневматической машины / Сборник СЭВ. Бая Маре, Румыния. 1980. N 8.
42. Кахаров А.К., Черных С.И. Создание и внедрение флотационной пневматической машины ФП-100 // Цв. металлы. 1980. N 8. С. 93-94.
43. Черных С., Христов Г. Конструкции противоточных флотационных машин и опыт их применения за рубежом // Научно-техническая информация. Бюлл. N 2. Нипроруда. София. С. 25-30.
44. Кахаров А.К., Черных С.И. Новые конструкции флотационных пневматических машин чанового типа с камерами большого объема // Цв. металлы. 1981. N 11. С. 57-60.

45. Черных С., Христов Г., Петров Л., Илизв К. // Научно-техническая информация. Нипроруда. София, 1982.
46. Черных С.И. Новые флотационные пневматические машины чанового типа с камерами большого объема // Материалы Всес. совещания "Основные направления развития техники и технологии обогащения полезных ископаемых в 1981-1985 годах". Л.: Механообр, 1982. ДСП.
47. Черных С.И. Флотационная пневматическая большесобъемная машина чанового типа // Цв. металлы. 1982. N 10. С. 93-96.
48. Омаров А.В., Дивак А.А., Черных С.И., Егоров К.Г. Промышленные испытания и внедрение машины ФП-40 на Кентауской обогатительной фабрике // Цв. металлы. 1983. N 1. С. 90-91.
49. Черных С.И., Пономарев А.П., Омаров А.М., Баргиадский Д.Л. Выбор большеобъемных флотационных пневматических машин // Цв. металлы. 1983. N 5. С. 93-96.
50. Черных С.И. Создание флотационных машин пневматического типа с камерами большого объема и опыт их применения на обогатительных фабриках. М.: ЦНИИцветмет экономики и информации, 1983. 40 с. (Обогащение руд цветных металлов: Обзор. информ. Вып. 1.). ДСП.
51. Титов С.В., Черных С.И., Шамин А.А., Залесник И.Б. Опыт расширения фронта цинковой флотации на Кентауской обогатительной фабрике // Цв. металлы. 1984. N 9. С. 86.
52. Черных С.И., Галкин В.Ф., Шамин А.А., Залесник И.Б. Регулирование уровня пульпы во флотомашине ФП-40 // Цв. металлы. 1984. N 11. С. 86-87.
53. Черных С.И., Кахаров А.К., Мирталипов Д.Я., Шамин А.А. Совершенствование пневматических аэраторов большеобъемных флотационных машин чанового типа // Цв. металлы. 1985. N 2. С. 95-97.
54. Черных С.И. Создание новых конструкций флотационных пневматических машин чанового типа с камерами большого объема ($10-100 \text{ м}^3$) и опыт их применения: Сб. трудов / ИПИ. Иркутск, 1986.
55. Черных С.И. Аэраторы флотационных машин и аппаратов для очистки сточных вод. М.: ЦНИИцветмет экономики и информации, 1987. 45 с. (Обогащение руд цветных металлов: Обзор. информ. Вып. 2.).
56. Черных С.И., Тюзельбаев Р.О., Залесник И.Б., Левин К.Ф., Шамин А.А. Промышленные испытания флотационных пневматических противоточных и прямоточных машин чанового типа // Цв. металлы. 1988. N 1. С. 77-79.
57. Черных С.И., Полянский М.В., Коняев В.А., Береговой М.В. Флотируемость руды в глубокой пневматической флотомашине при противоточном и прямоточном потоках // Цв. металлы. 1988. N 2. С. 83-85.
58. Левин К.Ф., Черных С.И., Береговой М.В. Дофлотация тонких минеральных частиц из отвальных хвостов в пневматических флотомашинах чанового типа // Науч. тр. / М.: Гинцветмет, 1988. Комбинированные процессы в производстве ТЦМ. С. 181-188.
59. Черных С.И. Особенности применения пневматических машин с камерами большого объема в практике флотации руд цветных металлов. М.: ЦНИИцветмет экономики и информации. 1989 (Обогащение руд цветных металлов. Вып. 3.). ДСП.
60. Шамин А.А., Черных С.И., Полежаев В.В. Промышленные испытания пневматических машин ФП-40 // Цв. металлы. 1989. N 2. С. 116-118.
61. Черных С.И., Новоженин Г.П., Бозоев Х.А., Моисеенко В.Ф. Создание флотационных пневматических машин с аэраторами повышенной эксплуатационной надежности // Цв. металлургия. 1989. N 5. С. 9-12.

62. Черных С.И., Столяров В.М. Освоение флотационных пневматических машин ФП-80 и ФП-10 в коллективном цикле флотации на Жирекенской фабрике // Цв. металлы. 1990. N 9. С. 95-98.
63. Черных С.И., Арустамия М.А., Усков С.М., Шамин А.А., Куликова И.И., Воронин П.Г. Новые конструкции аэраторов для флотационных пневматических машин чанового (колонного) типа // Цв. металлы. 1990. N 10. С. 96-100.
64. Шамин А.А., Черных С.И. Сравнительные испытания флотационных машин при обогащении золотосодержащих руд // Цв. металлургия. 1990. N 12. С. 9-11.
65. Черных С.И., Дикинов Г.К., Тё В.Х., Воронин П.Г., Еременко В.Н. Сравнительные испытания флотационных машин ФП-25 и ФМР-25 в цикле перераспределения молибденово-медного концентрата на Тырныаузской фабрике // Цв. металлы. 1991. N 1. С. 59-60.
66. Черных С.И., Агамердыев Х.И., Нажимов Ш.Н., Усков С.М., Воронин П.Г. Флотационные пневматические противоточные машины для доизвлечения минералов // Цв. металлургия. 1991. N 5. С. 15-18.
67. Чириков В.З., Черных С.И., Холодинская Н.В., Иванов Л.П. Выбор диаметра дисковых пневмоаэраторов и флотационных пневматических машин // Цв. металлургия. 1991. N 6. С. 18.
68. Черных С.И., Ревнивцев В.И., Пономарев А.П., Столяров В.М. Создание и внедрение флотационных пневматических машин чанового (колонного) типа с камерами большого объема // Цв. металлургия. 1991. N 11. С. 13-18.
69. Черных С.И., Дмухайло Е.И., Куликова И.И. Пневмогидравлический аэратор для флотационных пневматических машин и аппаратов для очистки сточных вод // Цв. металлургия. 1991. N 11. С. 24-25.
70. Черных С.И. Создание нового поколения аэраторов для флотационных пневматических машин. М.: ЦНИИцветмет экономики и информации. 1991. (Обогащение руд цветных металлов: Обзор. информ. Вып. 1.).
71. Тё В.Х., Черных С.И., Остапенко А.В. Оценка аэрирующих параметров во флотационных пневматических машинах чанового (колонного) типа и методы их определения // Цв. металлургия. 1992. N 1. С. 16-19.
72. Черных С.И. Новое поколение флотационных пневматических машин чанового (колонного) типа // Цв. металлы. 1992. N 2. С. 69-72.
73. Черных С.И., Воронин П.Г., Ковальчук В.А., Столяров В.М. Внедрение флотационной пневматической машины чанового (колонного) типа ФП-10 на Жолымбетской обогатительной фабрике // Цв. металлургия. 1992. N 6. С. 14-18.
74. А.с. 638381 СССР. Пневматическая флотационная машина // Открытия. Изобретения. 1978. N 47.
75. А.с. 806128 СССР. Колонная флотационная машина // Открытия. Изобретения. 1981. N 7.
76. А.с. 806129 СССР. Колонная флотационная машина // Открытия. Изобретения. 1981. N 7.
77. А.с. 867423 СССР. Флотационная пневматическая машина // Открытия. Изобретения. 1981. N 36.
78. А.с. 867424 СССР. Флотационная пневматическая машина // Открытия. Изобретения. 1981. N 36.
79. А.с. 1046115 СССР. Способ изготовления эластичных перфорированных пластин // Открытия. Изобретения. 1983. N 37.
80. А.с. 33464 Болгария. Пневматическая флотационная машина // Открытия. Изобретения. 1983. N 3.

1. А.с. 1142172 СССР. Аэратор пневматической флотомашины // Открытия. Изобретения. 1984. N 8.
82. А.с. 1390871 СССР. Флотационная пневматическая машина // С.И.Черных, А.В.Зинченко / ДСП.
83. А.с. 1422475 СССР. Флотационная пневматическая машина // С.И.Черных / ДСП.
84. А.с. 1462714 СССР. Устройство для аэрации жидкости // С.И.Черных, И.Ф.Шаповал, Е.И.Дмухайло / ДСП.
85. А.с. 1496086 СССР. Флотационная пневматическая машина // С.И.Черных, А.А.Рыбальченко / ДСП.
86. А.с. 1504227 СССР. Пневмогидравлический аэратор // Открытия. Изобретения. 1989. N 32.
87. А.с. 1619526 СССР. Флотационная пневматическая машина // С.И.Черных, А.В.Животеико, А.К.Алиев / ДСП.
88. Черных С.И., Усков С.М., Дикинов Г.К., Тё В.Х., Еременко В.Н. Пневматическая флотационная машина // Положительное решение на изобретение по заявке N 4812659 от 17.06.91. ДСП.
89. Черных С.И., Дикинов Г.К., Тё В.Х., Еременко В.Н. Флотационная пневматическая машина // Положительное решение на изобретение по заявке N 4862245 от 24.06.91. ДСП.
90. А.с. 1688499 СССР. Флотационная пневматическая машина // С.И.Черных, В.М.Столяров / ДСП.
91. Черных С.И., Столяров В.М., Усков С.М., Лесун А.В. Флотационная пневматическая машина // Положительное решение на изобретение по заявке N 4827830 от 17.06.91. ДСП.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава 1. Флотационные пневматические машины чанового (колонного) типа	8
1.1. Общие сведения	8
1.2. Конструкции чановых (колонных) аппаратов	11
1.3. Создание нового поколения большеобъемных пневматических флотационных машин	42
Глава 2. Пневматические аэраторы	52
2.1. Конструкции пневматических аэраторов	52
2.2. Перфорирование трубок, методика сборки и проверки пневматических аэраторов	79

2.3. Методы расчета пневматических аэраторов	86
2.4. Техническая эксплуатация пневматических аэраторов	9
Глава 3. Гидравлические и пневмогидравлические аэраторы	95
3.1. Гидравлические аэраторы струйного типа	95
3.2. Пневмогидравлические аэраторы	99
3.3. Аэрационные и гидродинамические характеристики струйных аэраторов	111
3.4. Методика оценки аэрированности пульпы	117
3.5. Патентные разработки гидравлических и пневмогидравлических аэраторов	121
Глава 4. Основы гидродинамики барботажа во флотационных пневматических машинах чанового (колонного) типа	130
4.1. Общие сведения	130
4.2. Теоретические основы движения одиночных газовых пузырьков в жидкости	132
4.3. Расчет гидродинамики элементарного акта флотации	151
4.4. Расчет параметров чановых (колонных) флотационных машин	167
Глава 5. Автоматизация и контроль процесса флотации в пневматических машинах с камерами большого объема	180
Глава 6. Промышленные испытания и внедрение нового поколения флотационных пневматических машин на обогатительных фабриках	197
6.1. Промышленные испытания и внедрение пневматических флотационных машин чанового (колонного) типа на обогатительных фабриках цветной металлургии	197
6.2. Промышленные испытания и внедрение флотационных пневматических машин чанового (колонного) и других типов на обогатительных фабриках, перерабатывающих неметал- лические полезные ископаемые	257
Глава 7. Экспериментальные исследования механизма действия и методика расчета основных параметров чановых (колонных) флотомашин	271
Список использованной литературы	295

Редакторы Л.И. Банденок, Л.А. Давыдова
Корректор Т.Д. Ключкова Технический редактор Г.В. Терешенкова

Набрано на компьютере
Формат 60х90 1/16
Печ.л. 18,5
Цена договорная

Уч.-изд.л. 20

Подписано в печать 23.12.94
Бумага офсетная
Тираж 200 экз.
Заказ N 58

129515, Москва, ул. Ак.Королева, а/я 40
ЦНИИцветмет экономики и информации

Отпечатано фирмой АО ПЦ "Эфир"
113326, Москва, ул. Пятницкая, 25