

**ФЛОТОМАШИНА ДЖЕЙМСОН: ВОЗВРАЩЕНИЕ В ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ РУД
ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ С УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ КОНСТРУКЦИЕЙ И
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМОЙ**

М.Ф. Янг¹, К.Э. Барнс², Дж.С. Андерсон² и Дж.Д. Пиз²

¹ Xstrata Zinc
Mount Isa, Qld,
Australia

² Xstrata Technology
87 Wickham Tce
Brisbane QLD 4000
Australia
+61 7 3833 8500

Ключевые слова: флотация, флотомашина Джеймсон

АВТОРЕФЕРАТ

Флотомашина Джеймсон была разработана на руднике Маунт Айза в конце 1980-х годов в качестве решения, позволяющего преодолеть недостатки, присущие флотационным колоннам. Первые установки для руд цветных металлов имели неоднозначные показатели. Тестирования и экспериментальная эксплуатация показали, что при правильной эксплуатации повышались технологические показатели, однако эффективность первых установок страдала от ряда проблем при эксплуатации и обслуживании. Нужны были более надежные установки, а также требовалось более глубокое понимание того, как успешно интегрировать флотомашину в технологическую схему предприятия.

В 1990-е годы флотомшины Джеймсон получили признание в таких применениях, как флотация угольных шламов и удаление органических примесей в технологии SXEW, и стали стандартом в Австралии для таких применений. Эти установки имели усовершенствованную конструкцию и материалы, улучшенную технологическую схему, низкую степень износа и автоматический контроль, что обеспечивало хорошую эффективность при минимальном вмешательстве операторов.

Эти усовершенствования позволили заново оценить возможность применения флотомашин Джеймсон для руд цветных металлов. Недавние новые установки указывают на значительные преимущества в так называемых "гибридных" циклах, сочетающих преимущества флотомашин Джеймсон и традиционные флотомшины, обеспечивая более высокую общую эффективность цикла при меньшей занимаемой площади по сравнению с любой из технологий, взятой в отдельности.

В настоящей статье рассматривается опыт успешного применения для цветных металлов и объясняется повышенная эффективность цикла с использованием минералогии по классам. Также описываются новые методы проектирования технологических схем.

ВВЕДЕНИЕ

Флотомашина Джеймсон сочетает в себе новый метод взаимодействия между воздухом и пульпой, при котором падающая струя естественным образом вовлекает воздух, обеспечивая высокую концентрацию воздуха относительно объема пульпы, малый размер пузырьков и тесный контакт между пузырьками и частицами материала (рис. 1). Маленькие пузырьки (0,3-0,5 мм) образуются непрерывно, и в аэраторе быстро (6-10 секунд) возникает тесный контакт между пузырьками и частицами. Как следствие, флотомашина Джеймсон обладает большой интенсивностью и высокой скоростью флотации минералов, особенно тонкой фракции. Поскольку контакт между пузырьком и частицей происходит в аэраторе, задача флотомшины заключается в разделении пузырьков и пульпы, благодаря чему ее объем небольшой по сравнению с колоннами. Высокая скорость флотации вследствие интенсивной аэрации означает высокую производительность в пересчете на площадь поверхности и делает промывку пену привлекательным способом повышения содержания в концентрате. Энергопотребление ниже, чем в аналогичных механических или колонных флотомашинах (энергию расходует только насос питания; нет ни нагнетателя, ни компрессора), а основными изнашиваемыми

деталью является сопло и насос питания. Основы эксплуатации флотомашины Джеймсон описаны многими авторами, в том числе в Clayton, Jameson and Manlapig (1991)

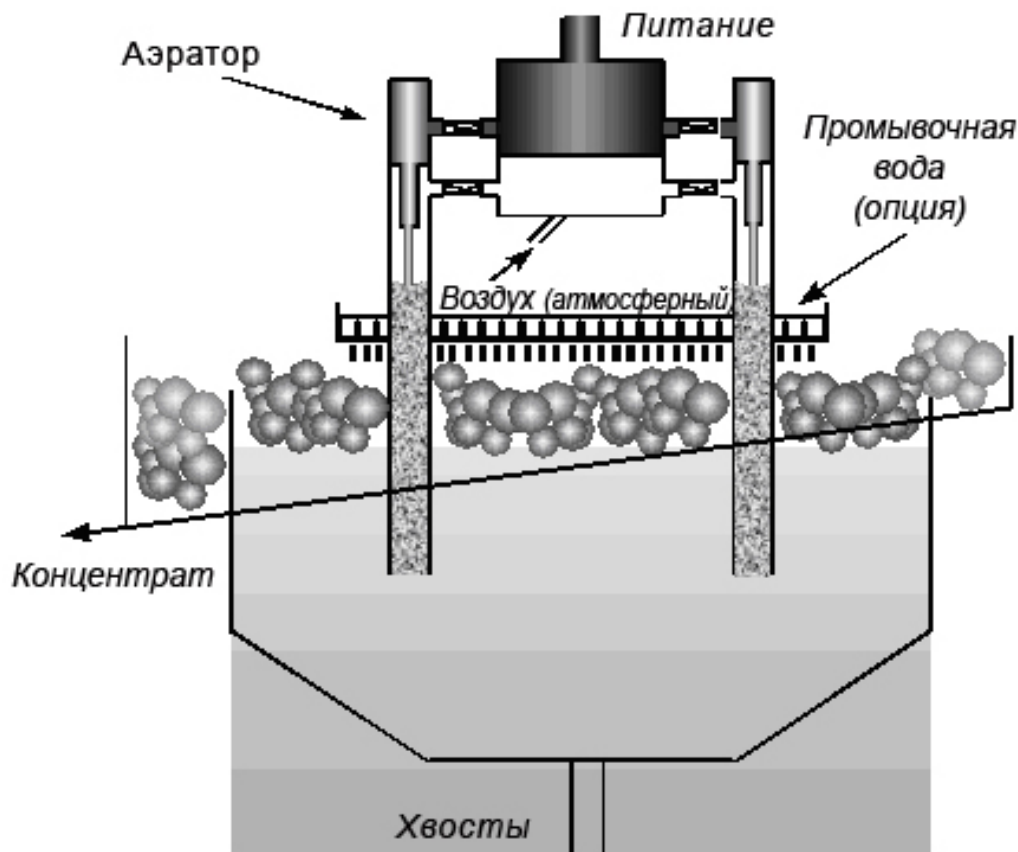


Рисунок 1. Флотомашина Джеймсон

Первыми внедренными промышленными флотомашинами Джеймсон были установки перемешивающей флотации свинца, описанные в Jameson and Manlapig (1991). Эта установка показала огромную разницу в кинетике флотации между флотомашинной Джеймсон, механической флотомашинной и колонной флотомашинной. Кроме того, размер, занимаемая площадь и стоимость флотомашин Джеймсон были намного меньше по сравнению с традиционной механической флотомашинной и флотационной колонной. Это наглядно показано на рис. 2, на котором представлены установленные рядом колонны и флотомашин Джеймсон близкой производительности на свинцово-цинковой обогатительной фабрике Маунт Айза. Ниже не только стоимость самой машины, но и стоимость ее эксплуатации, поскольку в ней меньше воздухораспределителей, меньше затраты на перекачивание и используется подсасываемый, а не сжатый, как в колоннах, воздух.

Первые флотомашин Джеймсон использовались для перемешивающей флотации благодаря способности машины производить концентраты с высоким содержанием за одну стадию (Jameson, Harbort, Riches, 1991). Однако в этих установках извлечение было довольно скромным - 50-80%. Для более высокого общего извлечения в цикле флотомашин Джеймсон нужно было эксплуатировать в замкнутом цикле с другими флотомашинными.

Эти выводы подтверждаются работами Riches (1991) и Harbort (2002), в которых подчеркивается, что за одну стадию флотомашина Джеймсон способна получить из питания основной флотации готовый концентрат с извлечением от 60% до 70%, что значительно выше результатов тестирования механических флотомашин.

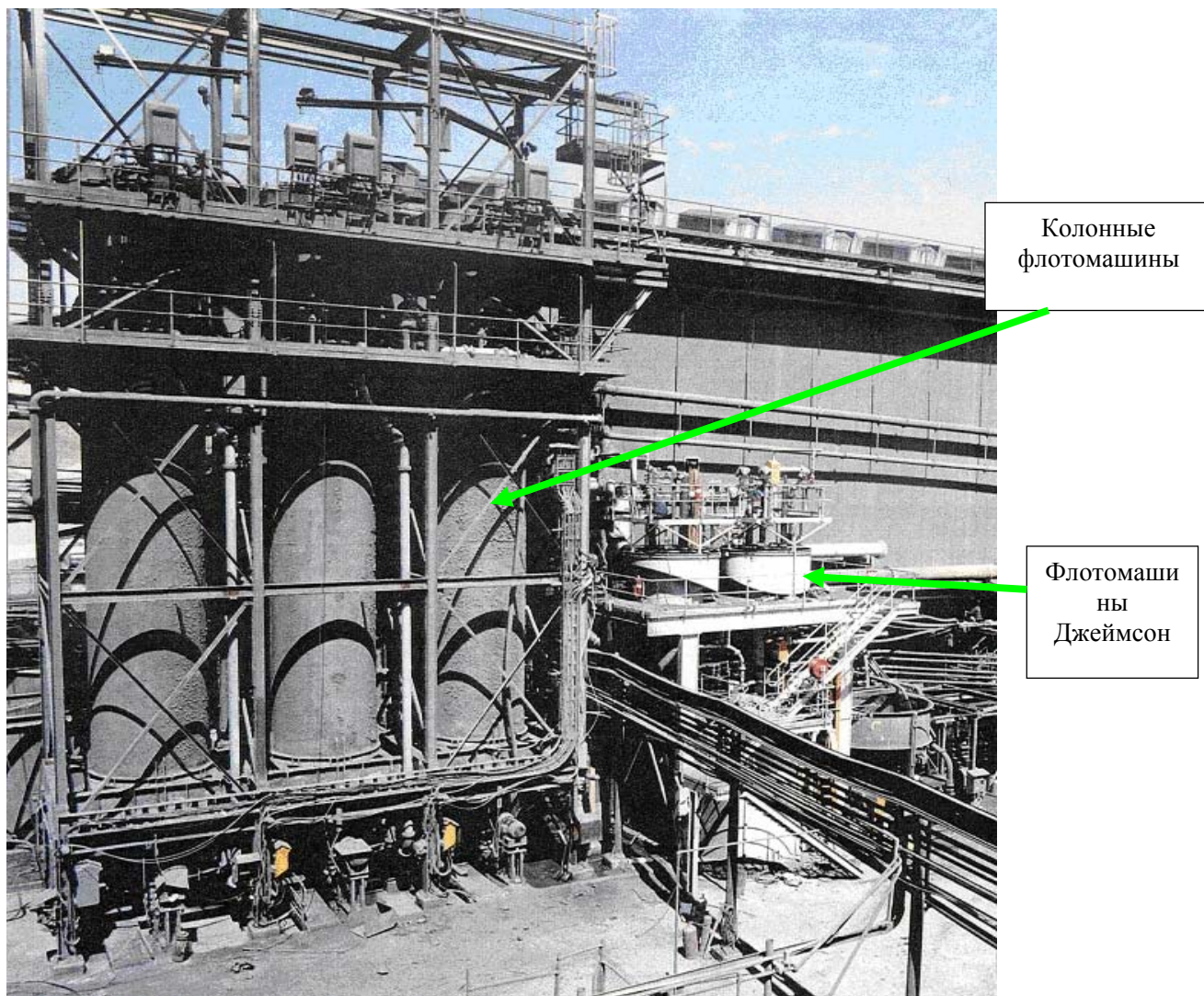


Рисунок 2. Сравнение габаритов колонных флотомашин и флотомашин Джеймсон аналогичной производительности

Несмотря на существенные технологические и экономические преимущества флотомашин Джеймсон, первым установкам для цветных металлов не хватало эксплуатационной надежности. Пилотные тестирования стабильно давали хорошие результаты, но ни конструкция промышленных флотомашин, ни методика их интеграции в цикл еще не были доведены до совершенства.

Наибольшая эксплуатационная проблема заключалась в том, что питание должно было иметь постоянный объем и давление, чтобы флотомашина Джеймсон могла выйти на устоявшийся режим работы. Первые установки не могли обеспечить это - питание было однократным или в замкнутом цикле с флотомашинами основной флотации. Расход

питания был непостоянным, в результате чего аэратор работал нестабильно, и это сказывалось на металлургической эффективности и стабильности флотомашин. Если расход питания падал, отдельные аэраторы приходилось отключать, чтобы поддерживать постоянную скорость в остальных аэраторах. Это решение было непрактично. Кроме того, высокая интенсивность контакта с пузырьками в аэраторе означает не только быструю флотацию, но и меньше возможностей для образования контакта между пузырьком и частицей материала. В результате, флотомашин Джеймсон быстро производит высококачественный концентрат, но в одной машине невозможно добиться высокого извлечения (как правило, 50-80% за одну стадию при флотации руд цветных металлов). Чтобы получить высокое общее извлечение в цикле, необходима либо последовательная установка нескольких машин (что сокращает преимущества с точки зрения капитальных затрат), либо эксплуатация машины в замкнутом цикле с флотомашинами основной флотации.

Хотя в то время отсутствовал опыт правильного применения флотомашин Джеймсон для руд цветных металлов, в 1990-е годы она пользовалась большим успехом при флотации тонкой угольной фракции и при удалении органических примесей в технологии SXEW (Jameson, Goffinet, Hughes, 1991; Dawson, Jackson, 1995). Этот успех был связан со способностью флотомашин Джеймсон получать конечный продукт при очень высоком извлечении (для угля 95-98%) за одну стадию. Кроме того, высокая интенсивность флотомашин Джеймсон позволяла перерабатывать огромные объемы материала на небольшой по сравнению с другими технологиями установке. К настоящему времени флотомашин Джеймсон стала стандартным решением для таких применений.

Успех в угольной промышленности побудил обратиться к исследованию неудовлетворительных показателей эффективности при флотации руд цветных металлов. Разница в эффективности между флотацией угольных шламов и флотации полиметаллов заключалась в том, что если при флотации угля флотомашин Джеймсон могла обеспечить извлечение 95-98%, то при флотации полиметаллов извлечение было всего 50-80%. Флотация полиметаллов имеет более медленную дифференциальную кинетику и более высокий коэффициент обогащения по сравнению с углем. Различия в кинетике и коэффициенте обогащения требуют, чтобы при обогащении полиметаллов флотомашин Джеймсон работала в замкнутом цикле с другими флотомашинами (механическими или Джеймсон), если необходим высокий общий показатель извлечения в цикле.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СХЕМЫ ЦИКЛА С ФЛОТОМАШИНОЙ ДЖЕЙМСОН

Применительно к рудам цветных металлов нужно было решить две основные задачи:

- Обеспечить постоянный объем питания флотомашин Джеймсон несмотря на обычное для промышленных установок непостоянство.
- Спроектировать малозатратный в целом цикл, учитывая низкое извлечение за один проход и используя все возможности, связанные с быстрой флотацией и высоким содержанием в концентрате.

Первая задача была решена рециркуляцией хвостов. Установки проектируются с расчетом на переработку объема, на 30-40% превышающего максимальную расчетную производительность. Питание флотомашин обеспечивает насос, работающий с

постоянной скоростью и подающий постоянный объем и давление в аэраторы. Для поддержания постоянного объема производится рециркуляция хвостов в емкость питания. Даже если свежее питание отсутствует полностью, флотомашина продолжает работать на полностью рециркулируемом объеме хвостов с сохранением размера пузырьков (это также обеспечивает защиту насоса питания). Еще одним преимуществом этой системы является повышенное извлечение при первом проходе, поскольку, как правило, 40% питания имеет "второй шанс" в аэраторе. Столь простое решение существенно изменило технологичность флотомашин Джеймсон: они производят пузырьки постоянного размера, поддерживают постоянную эффективность и автоматически подстраиваются под условия цикла, не требуя постоянного вмешательства со стороны оператора. Механизм рециркуляции стал неотъемлемым элементом флотомшины Джеймсон и может быть внутренним (IRC), внешним (ERM) (рис.3) и внешним независимым (Cowburn, Stone, Bourke, Hill, 2005).

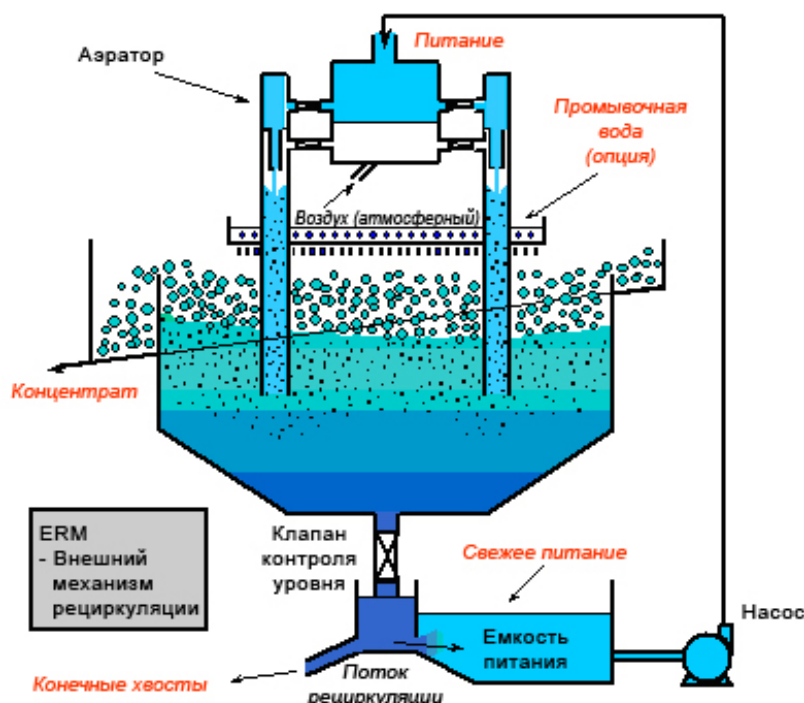


Рисунок 3. Флотомашина Джеймсон с внешним механизмом рециркуляции для стабилизации расхода питания аэратора.

К концу 1995 года на медной обогатительной фабрике Philex Mining Corporation весь цикл был оборудован флотомашинами Джеймсон. (Harbort, Murphy, Budod, 1997). Эта фабрика стала первым применением на рудах цветных металлов, на которой была использована система рециркуляции хвостов (ERM). Этот проект повлек разработку больших типоразмеров флотомашин Джеймсон, и значительное увеличение производительности цикла с флотомашинной Джеймсон. Система ERM получила дальнейшее развитие при проектировании обогатительной фабрики Алумбрера, на которой весь цикл перемешивающей флотации был основан на флотомашинных Джеймсон (Harbort, Murphy, Launder, Miranda, 2000). К 1999 году внутренний механизм рециркуляции (IRC) применялся на свинцово-цинковых (Young, Pease, Fisher, 2000) и медных обогатительных фабриках (Carr, Harbot,

Lawson, 2003) компании Mount Isa Mines. Внутренняя система рециркуляции хвостов позволяла снизить стоимость монтажа, делая установки более компактными. (рис. 4)

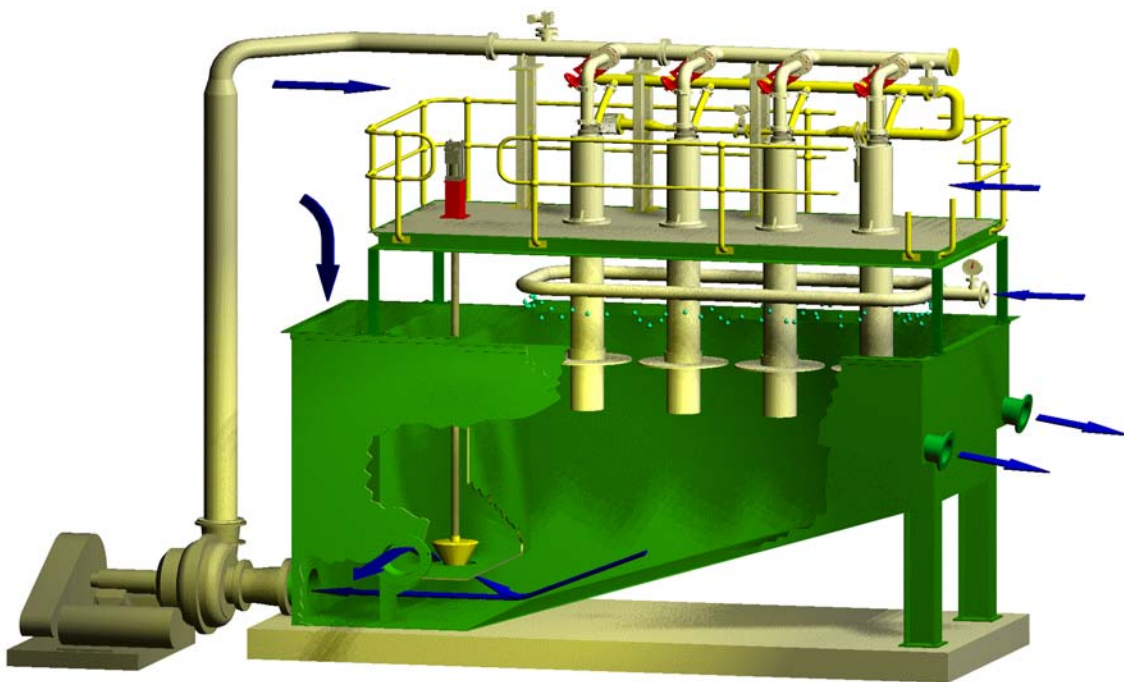


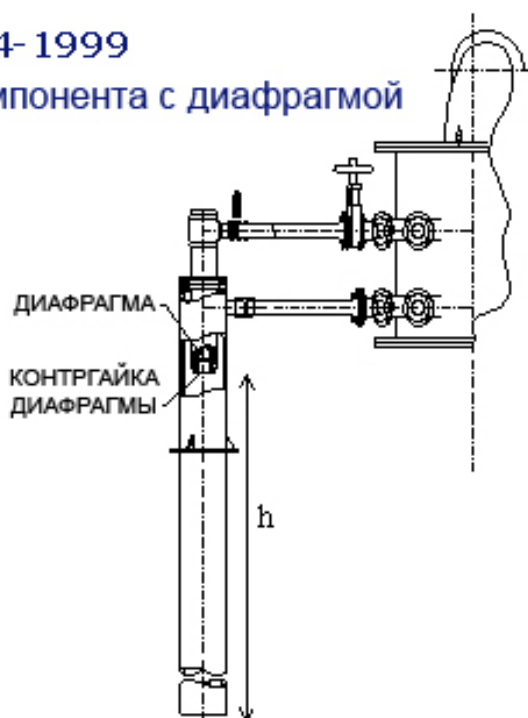
Рисунок 4. Флотомашина Джеймсон с внутренним механизмом рециркуляции (IRC) для стабилизации расхода питания аэратора.

Одновременно с внедрением рециркуляции хвостов для стабилизации питания флотомшины Джеймсон продолжались работы с целью повысить технологичность аэратора - "сердца" флотомшины Джеймсон. В 2000 году был представлен аэратор Mark 3 (рис. 5), в котором использовалось вдвое меньше деталей, благодаря чему все они могли быть расположены вне аэратора для удобства доступа.

Замена диафрагмы соплом пульпы увеличила срок службы деталей, а улучшенная конструкция подачи пульпы повысила коэффициент расхода и снизила потребление энергии насосом питания на 10-15%. Кроме того, расположение сопла пульпы по сравнению с диафрагмой увеличило полезную длину аэратора на 15%, что увеличило время пребывания в зоне смешивания и сделало возможной работу при более высоком отношении воздух-пульпа. Лабораторные тестирования показали, что увеличенная длина аэратора повышает вовлечение воздуха при том же значении вакуума (Cowburn et al, 2005).

1994-1999

4 компонента с диафрагмой



2000 - по наст. вр.

2 компонента с соплом
пульпы

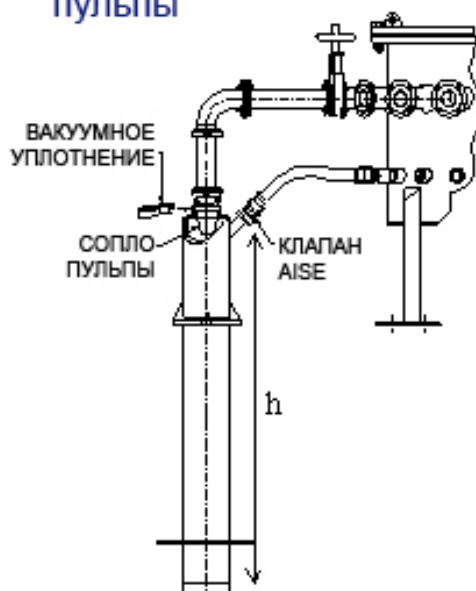


Рисунок 5. Аэратор старой и новой конструкции

Тенденция к увеличению производительности флотомашин повлекла разработку больших типоразмеров флотомашин Джеймсон: самая большая из установленных для руд цветных металлов флотомашин Джеймсон, B6500/22, перерабатывает до 22 000 т в сутки, а самая большая флотомашин Джеймсон, J7200/10, перерабатывает 40 000 т в сутки. Проектирование флотомашин Джеймсон большей производительности не представляет труда, поскольку диаметр флотомашин и количество аэраторов могут быть с легкостью увеличены, при этом общая высота установки остается неизменной.

Вторая задача, которую нужно было решить, чтобы флотомашин Джеймсон могли применяться для флотации руд цветных металлов, заключалась в проектировании установок, учитывая низкое извлечение за один проход, одновременно используя такие преимущества, как быстрая флотация и высокое содержание в концентрате, для эксплуатации в составе низкочастотного цикла. Для этого нужно было принять во внимание несколько принципиальных особенностей флотомашин Джеймсон. Во-первых, флотомашин Джеймсон производит высококачественный продукт. Это высокоинтенсивная флотомашин, использующая для флотации подсасываемый воздух. Высокая скорость сдвига образует мелкие пузырьки в аэраторе. Для образования мелких пузырьков флотомашин Джеймсон должна работать с низким или умеренным отношением воздух-пульпа (0,2 - 0,5) и умеренным или высоким вакуумом (15 - 30 кПа). При таких условиях эксплуатации происходит избирательное извлечение из пульпы минералов с высокой кинетикой и более четкое разделение минералов с высокой и низкой кинетикой

Флотомашин Джеймсон имеет систему промывки пены и умеренную глубину пены, что позволяет использовать промывку пены, чтобы минимизировать механический унос. Такая конструкция флотомашин позволяет получать высококачественный концентрат за одну стадию флотации. При эксплуатации коэффициент промывочной воды должен быть умеренно положительным (отношение добавляемой в пену промывочной воды к воде, извлекаемой с концентратом). Коэффициент на уровне 1,2 позволяет свести механический унос к минимуму, а более высокий коэффициент (до 1,5) может помочь минимизировать извлечение комбинированных частиц, имеющих слабую связь с пузырьками, что дает концентрат максимального содержания.

Хотя высокая интенсивность, небольшой размер пузырьков и промывка пены позволяют флотомашине Джеймсон производить высококачественный концентрат за одну стадию флотации, из-за этих особенностей извлечение за одну стадию является низким или умеренным. Низкое извлечение можно повысить за счет увеличения коэффициента рециркуляции, увеличив отношение воздуха к свежей пульпе, что опровергает распространенное заблуждение, будто извлечение можно повысить, уменьшив вакуум и таким образом увеличив расход воздуха, что в действительности приводит к увеличению размера пузырька и снижению эффективности. В промышленных условиях коэффициент рециркуляции легко увеличить, установив дополнительные аэраторы.

Принцип работы традиционных флотомашин и колонн отличается от принципа работы флотомашин Джеймсон, и эти различия должны быть учтены при проектировании цикла флотации руд цветных металлов. Если во флотомашине Джеймсон для увеличения отношения свежей пульпы к воздуху увеличивают количество аэраторов, то в механических флотомашинах увеличивают расход сжатого воздуха. Хотя мелкие пузырьки образуются в лабораторных механических флотомашинах, в промышленных машинах интенсивность сдвига ниже и пузырьки крупнее. Флотомашин Джеймсон производит мелкие пузырьки как в лабораторных, так и в промышленных условиях, поскольку интенсивность сдвига не меняется.

Принципиальные различия между традиционными флотомашинами и флотомашинами Джеймсон означают, что технологическая схема должна быть составлена таким образом, чтобы использовать все преимущества соответствующих флотомашин, и оптимизировать реакцию руды с учетом кинетики и обогатимости.

Со строительной точки зрения масштабирование флотомашин Джеймсон намного проще масштабирования традиционной флотомашин. Для цикла, основанного на флотомашинах Джеймсон, достаточно большого типоразмера флотомашин с правильным количеством аэраторов, работающих при низком отношении воздуха к свежей пульпе, и не требуется дополнительных машин, как при использовании традиционных флотомашин.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЦИКЛА ДЛЯ МАКСИМАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФЛОТАЦИИ РУД ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

При флотации руд цветных металлов флотомашины Джеймсон имеют целый ряд применений. Они могут быть установлены в новых технологических линиях или при модернизации действующих предприятий. Будучи машинами флотации, позволяющими получать конечный концентрат за одну стадию, они прекрасно подходят для установки в циклах перечистой флотации, однако их способность производить высококачественный концентрат при умеренном извлечении делает возможным их применение и в основной флотации.

При проектировании цикла флотации руд цветных металлов важно правильно подобрать флотомашину с учетом выполняемой задачи, поскольку флотомашин Джеймсон не сможет показать желаемую эффективность, если она будет использована для выполнения несвойственных ей задач. Машина должна соответствовать поставленной задаче.

Для каких же задач можно использовать флотомашину Джеймсон?

1. Флотомашин Джеймсон в качестве машины основной перечистой флотации в замкнутом цикле с традиционным циклом основной и контрольной флотации.

Одним из первоначальных применений флотомашин Джеймсон была одностадийная перечистная флотация в замкнутом цикле с циклом основной и контрольной флотации (рис. 6). Эта технологическая схема успешно работает, производя концентрат с высоким содержанием, если быстрая кинетика флотации и умеренный коэффициент обогащения способствуют повышению содержания концентрата основной флотации. Для компенсации низкого извлечения при первом проходе может потребоваться значительная рециркулирующая нагрузка (до 300%), хотя хорошо высвобожденные минералы с высокой кинетикой могут обогащаться и при небольшой рециркулирующей нагрузке. Извлечение при флотации можно также повысить, установив вторую флотомашину Джеймсон последовательно.

Этот цикл использовался на руднике Маунт Айза в цикле перечистки медных шлаков и в цикле перечистки перед флотацией.



Рисунок 6. Технологическая схема цикла основной перечистой флотации с использованием флотомашин Джеймсон

2. Флотомашина Джеймсон для перечистой скоростной флотации.

Применение флотомашины Джеймсон для перечистой скоростной флотации идеально при расширении и модернизации предприятий, на которых традиционный цикл перечистой флотации уже установлен (рис. 7). Этот цикл использует все преимущества обеих технологий: флотомашины Джеймсон собирают быстрофлотируемый материал для получения высококачественного тоннажного концентрата, а традиционные флотомашины обеспечивают конечное извлечение. Эти задачи выполняются более компактно и при меньших капитальных затратах, чем при использовании любой из технологий, взятой отдельно. Флотомашины Джеймсон являются недорогим решением при расширении для снижения нагрузки и позволяют повысить как общее содержание, так и извлечение. Промывка пены повышает содержание в концентрате за счет уменьшения уноса. За счет высокой производительности и компактности установки флотомашина Джеймсон позволяет экономично осуществлять промывку пены в отношении значительной доли концентрата. Более того, благодаря уменьшению объема питания последующих традиционных перечистных флотомашин, они работают при меньшей плотности и меньшем пенообразовании, что уменьшает механический унос. Поэтому относительно небольшая площадь промывки пены может значительно уменьшить общий механический унос в таком "гибридном" цикле. Среди изменений, внесенных в цикл, - дополнительные флотомашины Джеймсон, хотя затраты на перекачивание могут сделать затратной установку более чем двух флотомашин Джеймсон последовательно.

Дополнительная флотомашина Джеймсон для скоростной перечистой флотации на свинцово-цинковой обогатительной фабрике Маунт Айза была модернизирована, как описано в Примере 1.

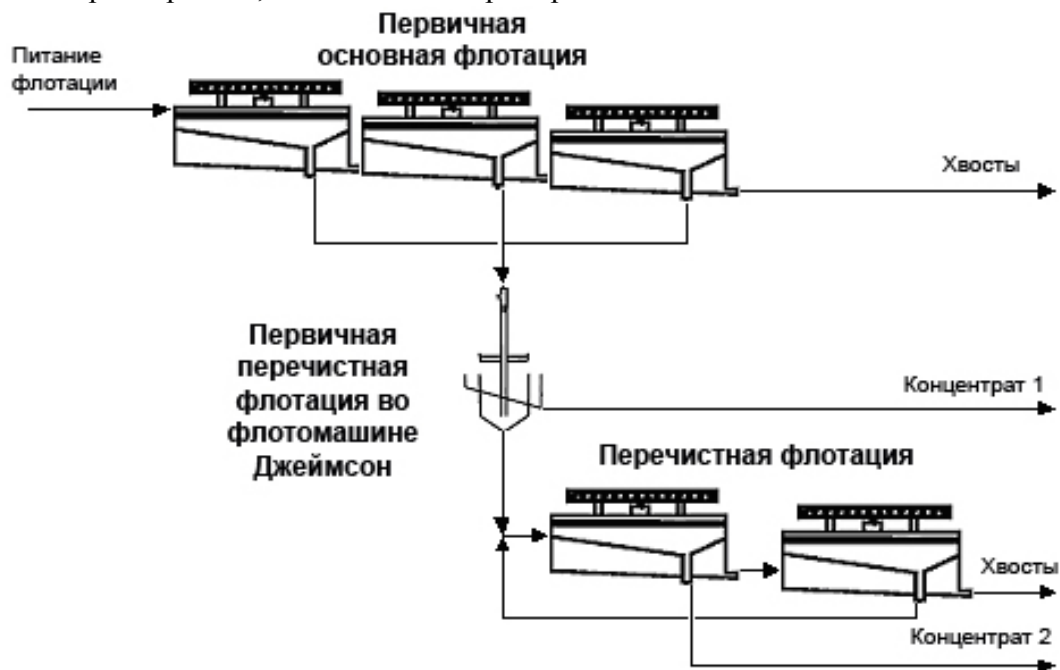


Рисунок 7. Технологическая схема цикла скоростной перечистой флотации с использованием флотомашины Джеймсон

3. Флотомашин Джеймсон в качестве машины скоростной основной флотации перед циклом традиционной основной и контрольной флотации

Использование флотомашин Джеймсон для скоростной основной флотации идеально подходит как для действующих предприятий, так и для проектов расширения. Флотомшины Джеймсон имеют высокую производительность и позволяют получать готовый высококачественный концентрат за одну стадию флотации (рис. 8). Благодаря их компактности, они могут быть с легкостью установлены на действующих предприятиях и являются идеальным решением при модернизации предприятий. Возможность установки двух флотомашин Джеймсон последовательно делает их особенно эффективными в этом качестве.

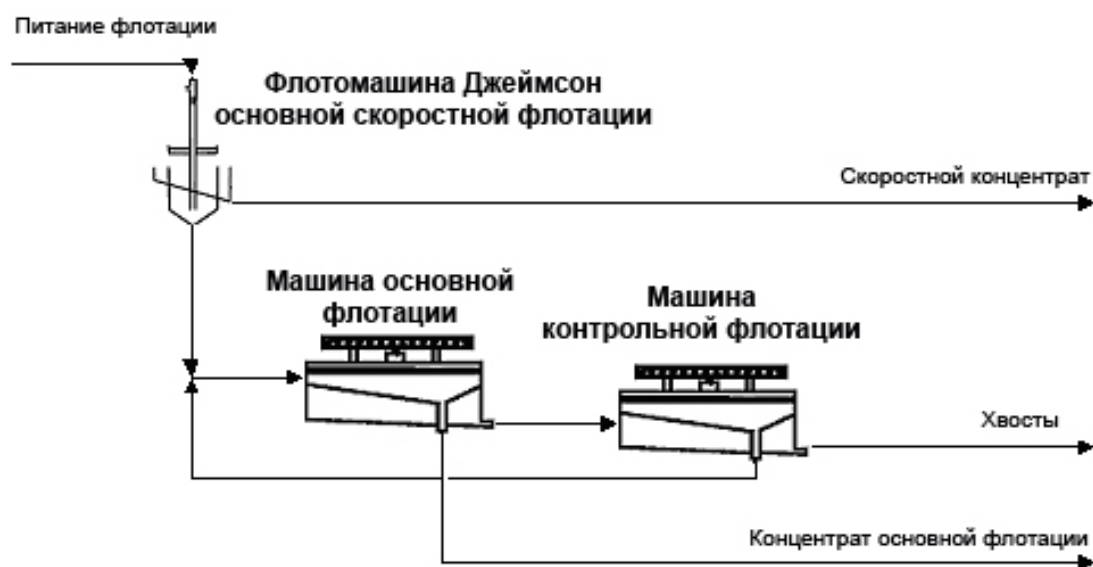


Рисунок 8. Технологическая схема цикла скоростной основной флотации с использованием флотомшины Джеймсон

Технологические схемы, перечисленные выше, описывают далеко не все возможные применения флотомшины Джеймсон и лишь демонстрируют широкий диапазон ее возможностей. Одновременное применение флотомашин Джеймсон в циклах основной и перерывной флотации позволяет еще более полно использовать их преимущества.

НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕРЫ РЕАЛИЗОВАННЫХ ПРОЕКТОВ

Проект 1: Цикл перечистной флотации свинца, Маунт Айза

Для обогащения руды месторождения Джордж Фишер на свинцово-цинковой обогатительной фабрике рудника Маунт Айза требовалось увеличить производительность цикла перечистной флотации свинца. Задача была решена путем установки флотомашины Джеймсон в качестве машины перечистной флотации свинца для переработки тонкой ($P_{80} = 12$ мкм) фракции продукта доизмельчения IsaMill и получения высококачественного свинцового концентрата (Young et al, 2000). Продукт IsaMill подается непосредственно в перечистную флотомашину Джеймсон, как показано на рис. 9. Флотомашина Джеймсон производит концентрат с содержанием свинца 60% при извлечении свинца 35% и уменьшает циркуляционную нагрузку по сравнению с традиционными трехстадийными машинами перечистной флотации свинца в замкнутом цикле. В сочетании с традиционными машинами перечистной флотации (обеспечивающими содержание свинца 51% при извлечении 45%), флотомашины Джеймсон обеспечивают получение готового концентрата с содержанием свинца 55%.

Для решения этой задачи была выбрана флотомашина Джеймсон модели E1732/4 с IRC – внутренней системой рециркуляции хвостов. Она имеет площадь поверхности 5,2 м² и объем 8,2 м³. По сравнению с традиционными машинами перечистной флотации, имеющими площадь поверхности 156 м² и объем 200 м³ и обеспечивающими извлечение свинца 45%, флотомашина Джеймсон позволяет извлекать 35% свинца при на порядок меньшей площади поверхности и емкости машины. Высокая эффективность флотомашины Джеймсон является следствием высокой интенсивности, малого размера пузырьков и эффективной промывки пены.

Высокая производительность флотомашины Джеймсон при небольшой площади поверхности делает промывку пены экономически обоснованной благодаря более высокому общему содержанию в концентрате. В результате уменьшается питание традиционных машин перечистной флотации, что позволяет эксплуатировать их при меньшей плотности и загрузке пены, снижая механический унос и повышая эффективность. Хотя эффективность цикла повысилась, сложно определить, в какой мере это связано с установкой флотомашины Джеймсон, а в какой - с повышенной производительностью IsaMill (они были установлены одновременно). Независимо от этого, общим следствием является повышение содержания свинца в концентрате на 5% до 55% при увеличении извлечения свинца на 5%.

Циркуляционная нагрузка между циклом основной флотации и циклом перечистной флотации/флотомашинной Джеймсон невелика и нередко составляет всего 110% содержания свинца в питании нового цикла перечистной флотации. Таким образом, при использовании данного сырья, при данном высвобождении и схеме цикла можно добиться высокого общего извлечения по фабрике при низкой циркуляционной нагрузке.

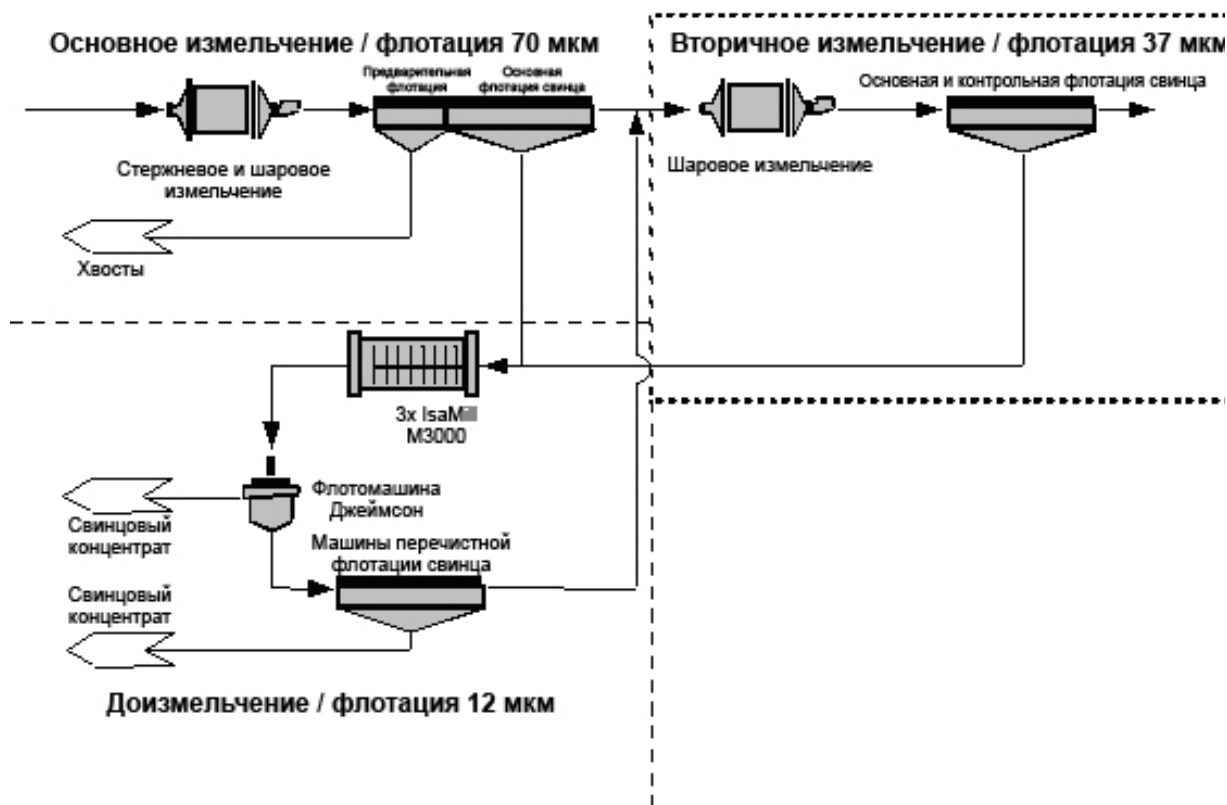


Рисунок 9. Технологическая схема цикла основной и перечистой флотации свинца, Маунт Айза

Флотомашина Джеймсон при использовании для перечистой флотации свинца очень хорошо извлекает мелкие, высвобожденные, быстро флотируемые частицы галенита. Как показано на рис. 10, 93% галенита представлено частицами крупностью менее 12 мкм, причем большинство из них не крупнее 6 мкм. Хотя флотомашина Джеймсон лучше извлекает такие тонкие частицы, традиционный цикл перечистой флотации лучше извлекает более крупные частицы (рис. 11). Флотомашина Джеймсон обеспечивает высокое извлечение крупной фракции при намного более высоком качестве концентрата (содержание свинца 60%) и более низком извлечении пустой породы по сравнению с традиционным циклом перечистой флотации (содержание свинца 51%). Одновременное применение флотомашин Джеймсон и традиционного цикла перечистой флотации позволяет эффективно извлекать как тонкий высвобожденный, так и крупный менее высвобожденный галенит, обеспечивая хорошее извлечение в конечный свинцовый концентрат при меньшем уносе тонких частиц.

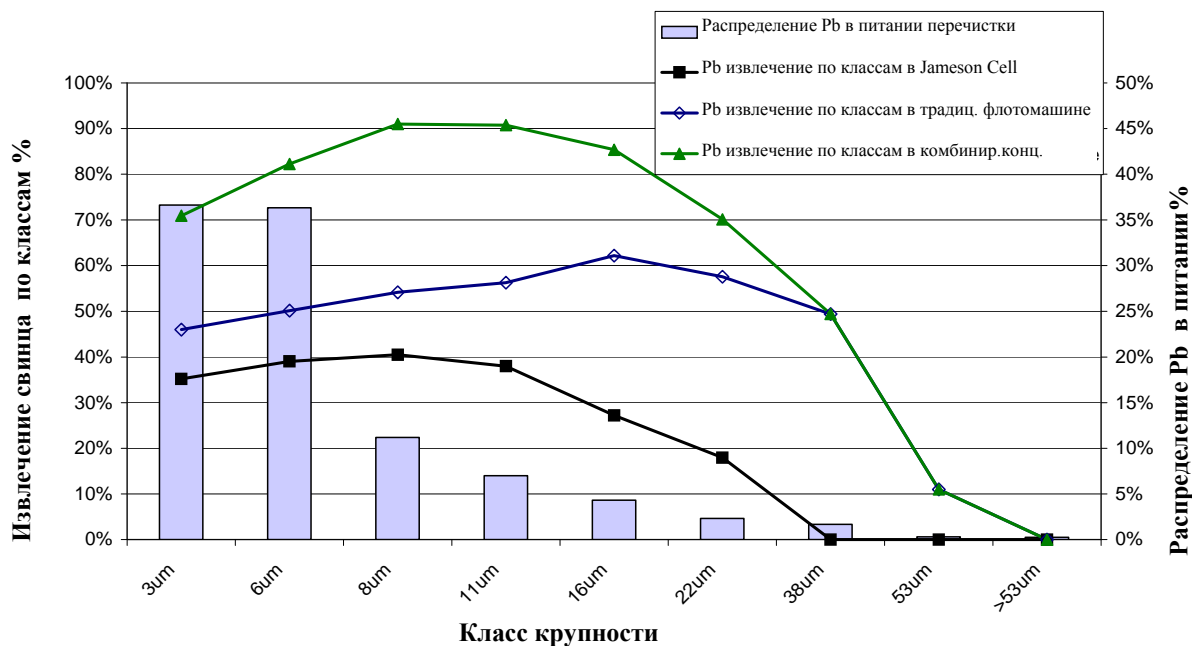


Рисунок 10. Зависимость извлечения от крупности, цикл перемешивающей флотации свинца на свинцово-цинковой обогатительной фабрике Маунт Айза

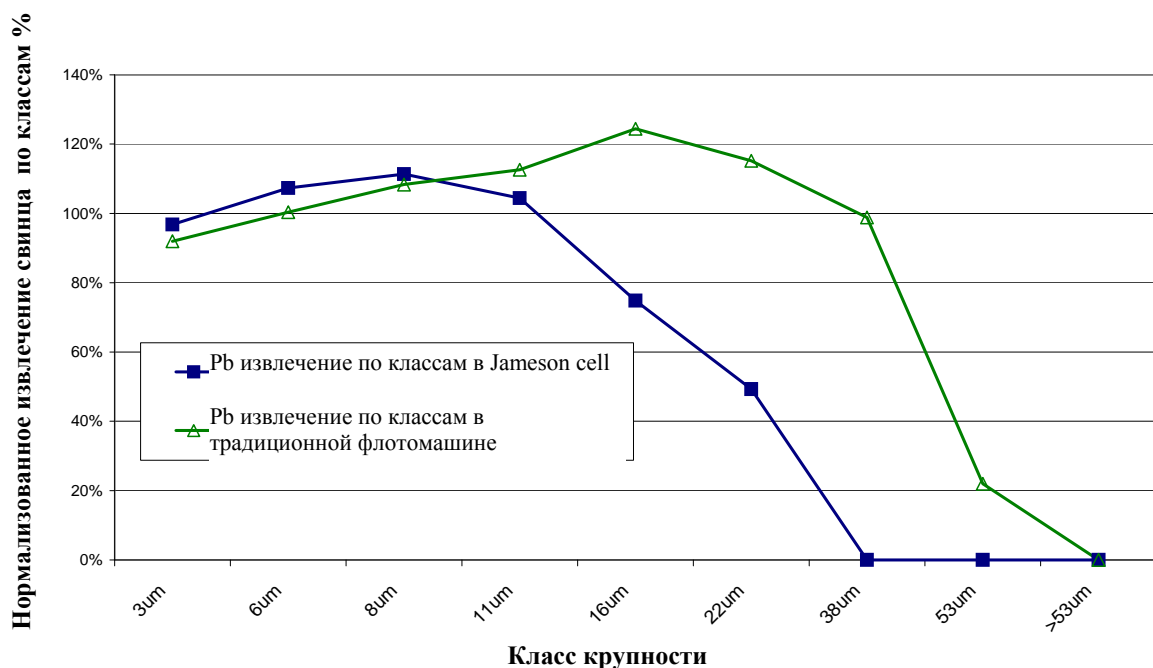


Рисунок 11. Нормализованная зависимость извлечения от крупности, цикл перемешивающей флотации свинца

До модернизации основным безрудным минералом, извлекаемым в цикле перемешивающей флотации свинца, был сфалерит, а основная часть потерь цинка в цикле флотации

приходилась на бинарные частицы сфалерита и галенита, попадающие в свинцовый концентрат. Доизмельчение питания переместной флотации свинца до 12 мкм высвободило значительную долю бинарных частиц, обеспечив лучшую сепарацию сфалерита в цинковый цикл (и более эффективную сепарацию пиритных примесей). На рис. 12 показана эффективная сепарация сфалерита из свинцового концентрата, в особенности во флотомашине Джеймсон. Очень хорошие показатели сепарации тонкого цинка и пирита во флотомашине Джеймсон по сравнению с традиционными флотомашинами указывают на то, что высокая интенсивность флотомашин Джеймсон позволяет оперативно извлекать быстро флотируемые минералы и эффективно отделять минералы с низкой скоростью флотации. По сравнению с традиционными флотомашинами, флотомашина Джеймсон увеличивает разницу в скорости флотации между быстро и медленно флотируемыми минералами.

Если бы установленные флотомшины Джеймсон имели большую производительность, сепарация сфалерита из свинцового концентрата была бы еще лучше.

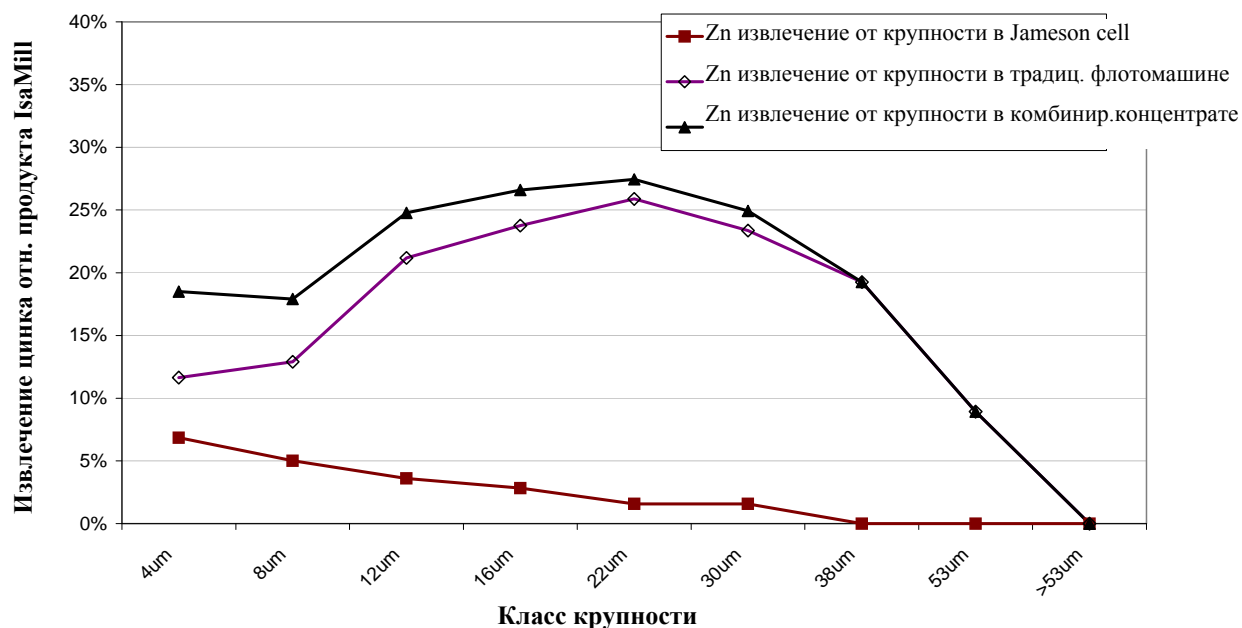


Рисунок 12. Извлечение цинка в зависимости от крупности в цикле переместной флотации свинца

Проект 2: Эффективность флотомашины Джеймсон для предварительной флотации меди, Маунт Айза

Медные рудные тела на месторождении Маунт Айза содержат естественно флотируемый мелкозернистый углесодержащий пирит и естественно флотируемый тальк, загрязняющие медный концентрат. Примесь пирита снижает содержание медного концентрата, уменьшая производительность медеплавильного комбината и увеличивая потери меди в металлургические шлаки. Примесь талька увеличивает содержание магния в медном концентрате, что существенно снижает эксплуатационную готовность медеплавильного комбината и общий выход меди, повышая точку плавления шлаков, а соответственно и рабочую температуру (что, в свою очередь, ускоряет износ огнеупорной футеровки и сокращает срок службы плавильного цеха), а магний агрессивно воздействует на огнеупорную футеровку плавильных печей, также сокращая срок эксплуатации.

Первоначально переработка на медной обогатительной фабрике Маунт Айза состояла из флотации с последующей депрессией углесодержащего пирита и талька. Проведенные в 1990-е годы исследования показали, что предварительная флотация естественно гидрофобной пустой породы предпочтительна по сравнению с депрессией. Первый цикл предварительной флотации состоял из флотационных колонн. Эти колонны были переустановлены в 1996 году, однако увеличение количества талька и углесодержащего пирита в рудных телах обусловило необходимость возобновления цикла предварительной флотации. В конце 1990-х годов увеличение содержания примесей в концентрате и потерь меди в концентрат предварительной флотации стало причиной для установки цикла предварительной перечистной флотации с использованием флотомашин Джеймсон. Флотомашин Джеймсон (модель E2514/3 с IRC – внутренней системой рециркуляции хвостов) в качестве машин предварительной перечистной флотации были установлены согласно схеме, показанной на рис. 6, в рамках проекта расширения обогатительной фабрики в 2002 году (Carr, Harbort, Lawson, 2003).

Основным результатом установки флотомашин Джеймсон для предварительной перечистки стало уменьшение загрязнения медного концентрата естественно флотируемыми безрудными минералами. На рис. 13 показано, что примесь пирита в медном концентрате значительно уменьшилась после пуска флотомашин Джеймсон несмотря на увеличение содержания пирита в питании, произошедшее в этот период.

Потери меди в концентрат предварительной флотации также уменьшились. До установки флотомашин Джеймсон концентрат предварительной флотации содержал 2-2,5% меди, затем содержание снизилось до 1-1,5%. Количество естественно флотируемого материала в питании увеличилось, а выход в новом цикле удвоился в периоды высокого содержания естественно флотируемого безрудного материала в питании обогатительной фабрики при сохранении низких потерь меди.

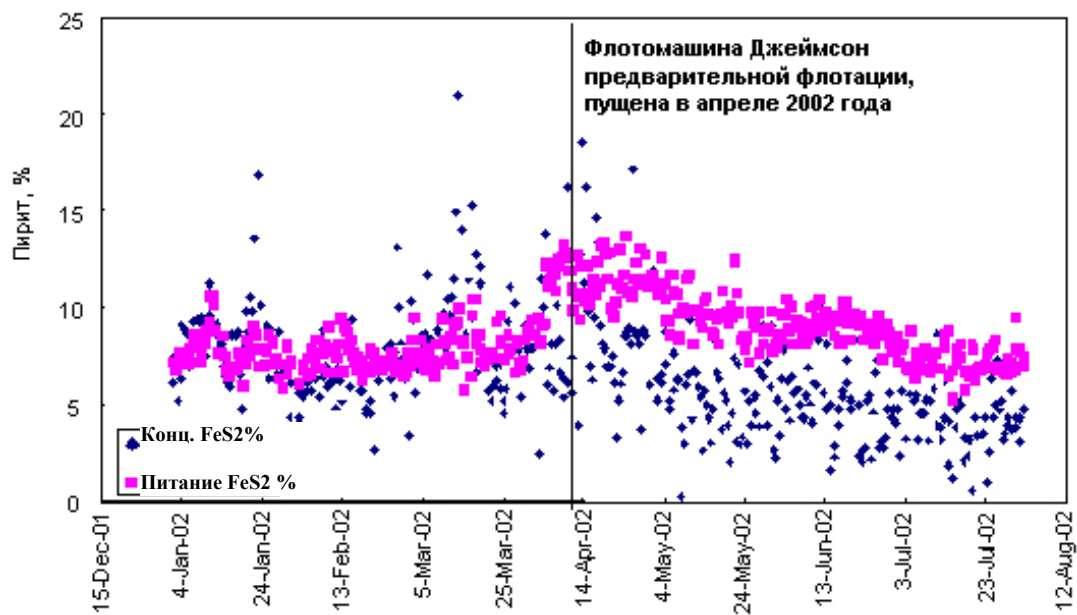


Рисунок 13. Загрязнение медного концентрата пиритом до и после пуска флотомашины Джеймсон

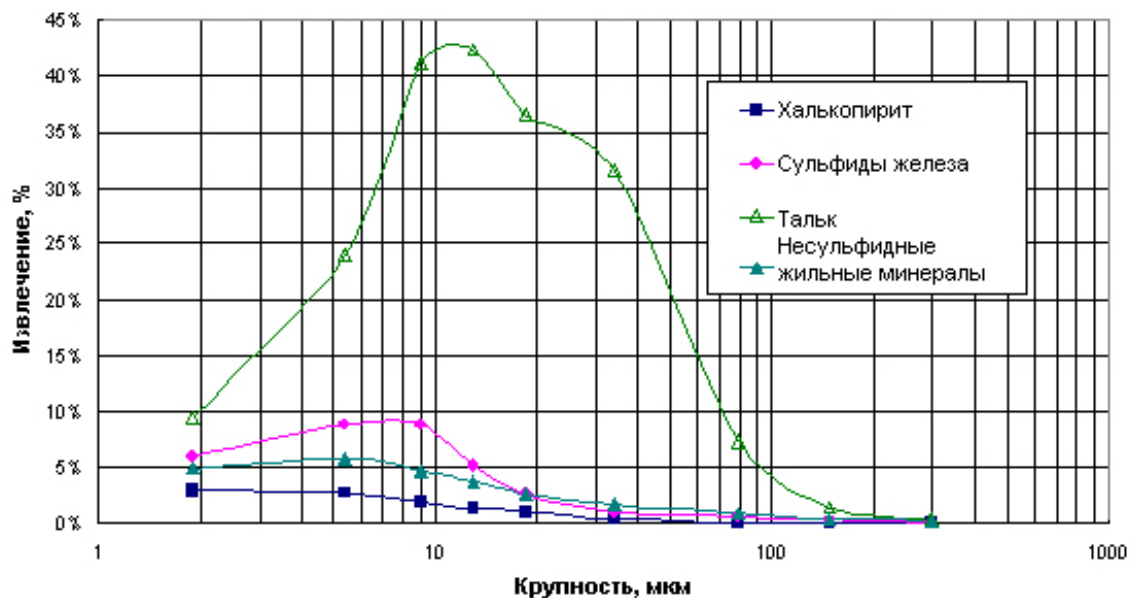


Рисунок 14. Извлечения в зависимости от крупности, цикл предварительной флотации

График зависимости извлечения от крупности в цикле предварительной флотации (рис. 14) указывает на хорошее отделение частиц талька средней крупности и естественно флотируемого углесодержащего пирита при минимальных потерях меди. Согласно результатам анализа концентрата предварительной флотации, содержание меди составило 1%. Необходимо отметить, что в настоящее время извлечение меди ниже, чем извлечение несulfидных безрудных минералов, что указывает на хорошую эффективность сепарации меди.

Проект 3: Эффективность цикла переработки медных шлаков, Маунт Айза

Медные металлургические шлаки перерабатываются на медной обогатительной фабрике партиями с использованием одной линии измельчения и основной флотации. Исторически для перечистки шлаков применялись традиционные машины перечистной флотации. После успешного опыта применения колонной флотации на обогатительной фабрике Хилтон цикл медных шлаков был переведен на колонную флотацию. В рамках модернизации медной обогатительной фабрики в 2002 году была установлена специальная перечистная флотомашинa Джеймсон (модель E2532/6) для перечистки конвертерных шлаков и шлаков RHF (рис. 15) (Carr et al 2003).



Рисунок 15. Технологическая схема цикла переработки медных шлаков на обогатительной фабрике

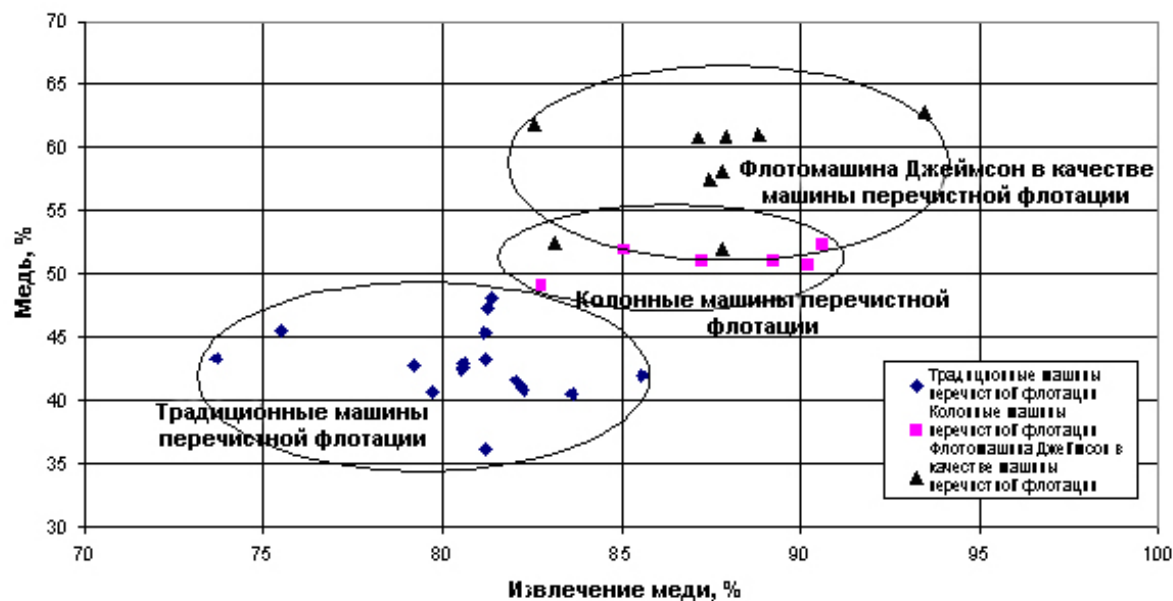


Рисунок 16. Эффективность цикла переработки медных шлаков в зависимости от типа перерывной флотомашин

Эффективность цикла переработки медных шлаков на протяжении нескольких лет и в зависимости от технологической схемы показана на рис. 16. Установка трех колонн диаметром 2,5 м и высотой 17 м для перерывной флотации шлаков позволила повысить содержание и извлечение медного концентрата в цикле переработки медных шлаков, однако эффективность стала еще выше после замены колонн флотомашин Джемсон (E2532/6). В настоящее время концентрат шлака смешивается с халькопиритным медным концентратом для поддержания постоянного качества питания медеплавильного комбината.

Проект 4: Пилотный цикл основной скоростной флотации меди с использованием флотомашин Джеймсон, Маунт Айза

Пилотные испытания основной скоростной и основной флотации меди с использованием флотомашин Джеймсон (рис. 17) были проведены в составе программы испытаний в целях проекта модернизации флотации на медной обогатительной фабрике (Harbort, 2002). Данная технологическая схема будет реализована в составе второй очереди проекта модернизации.



Рисунок 17. Цикл скоростной основной флотации и основной флотации с использованием флотомашин Джеймсон

Первый этап тестов скоростной основной флотации имел целью получить извлечение меди 60% при содержании меди в концентрате 30%. При испытаниях было получено среднее извлечение меди 63,37% при среднем содержании меди в концентрате 29,4% (рис. 18). 80% тестов показали результаты выше требуемого извлечения, хотя при немного более низком содержании в концентрате. Это означает, что концентрат скоростной основной флотации может направляться непосредственно в конечный концентрат со снижением нагрузки на циклы перечистной и повторной флотации.

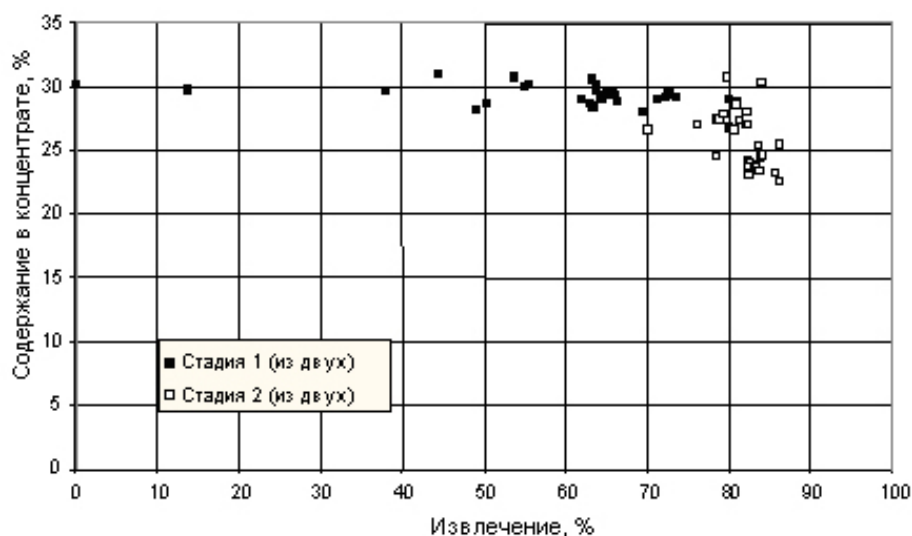


Рисунок 18. Испытания основной флотации меди в две стадии с использованием флотомашин Джеймсон

Использование флотомашин Джеймсон в основной флотации хвостов скоростной флотации повысило извлечение меди до 87% при общем содержании меди в концентрате основной флотации/скальпирования 25% (рис. 18). Это можно сравнить с действующими машинами основной флотации, обеспечивающим содержание меди 17% и извлечение 89%. Основная флотация в отдельно взятой флотомашине Джеймсон обеспечивает извлечение меди 60% при содержании 15%. Концентрат основной флотации будет направляться в цикл перечистной флотации для дальнейшей переработки.

Любопытно, что время пребывания во флотомашине Джеймсон, выполняющей данные задачи, составляет примерно 1 минуту на каждом этапе.

Согласно предлагаемой схеме, двухстадийный цикл основной флотации с использованием флотомашин Джеймсон заменит действующие 30-летние машины основной флотации. Хвосты основной флотации из флотомашин Джеймсон будут направляться на контрольную флотацию в $4 \times 100 \text{ м}^3$ Wemco, установленные при выполнении первой очереди модернизации. Концентрат контрольной флотации направляется в цикл доизмельчения, продукт которого поступает на перечистную флотацию.

Высокий выход является еще одним преимуществом флотомашин Джеймсон при скоростной основной флотации. При 1000 т/ч и содержании меди в питании 3,5% флотомашин Джеймсон обеспечивает среднее извлечение меди 63,37% при среднем содержании меди в концентрате 29,4%, т.е. при использовании флотомашин Джеймсон за одну стадию флотации извлекается 75 т/ч конечного концентрата.

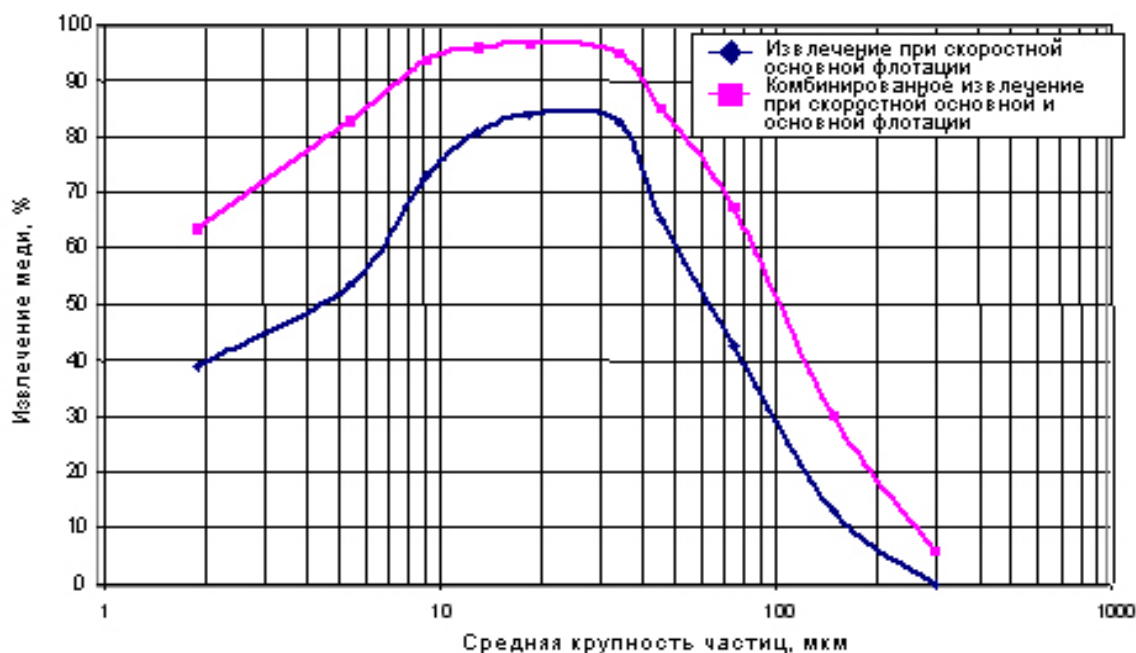


Рисунок 19. Извлечение в зависимости от крупности, флотомашина Джеймсон для основной флотации меди

График зависимости между крупностью и извлечением во флотомашине Джеймсон в качестве машины основной флотации меди (рис. 19) показывает очень высокое извлечение из фракций 9-38 мкм. Эти фракции хорошо высвобождаются и быстро флотируются и поэтому должны направляться непосредственно в конечный концентрат. Более крупные фракции недостаточно извлекаются, потому что они плохо высвобождаются и медленно флотируются. Их невозможно извлечь в высококачественный концентрат без загрязнения последнего и снижения его содержания. Более тонкие фракции (<6 мкм) извлекаются умеренно, поскольку они также медленно флотируются. Условия, создаваемые для сепарации крупных комposites и минимизации вовлечения тонкой пустой породы, способны обеспечить только умеренное извлечение этих медленно флотируемых фракций.

Плохо извлекаемые крупные комposites и медленно флотируемые тонкие фракции будут извлекаться в цикле контрольной флотации, и направляться на доизмельчение, где комposites будут высвобожжены и переработаны в цикле перечистной флотации.

Проект 5: Цикл перечистой флотации, Minera Alumbraera

Компания Minera Alumbraera Ltd эксплуатирует обогатительную фабрику Алумбрера в Аргентине. Фабрика была пущена в 1997 года и перерабатывала 80 000 т/сутки, а после расширения в 2003 году перерабатывает 100 000 т/сутки золотосодержащей меднопорфировой руды. Эта фабрика является одной из немногих в мире, использующих исключительно флотомашин Джеймсон в цикле перечистой флотации.

Первоначальная технологическая схема фабрики Алумбрера (рис. 20) состояла из 2 параллельных циклов. Каждый цикл состоял из мельниц полусамомельчения мощностью 13,4 мВт, продукт которых поступал в 2 шаровые мельницы мощностью 6 мВт для измельчения до P_{80} 150 мкм. Каждая линия флотации состояла из 8 флотомашин ОК100 в основной флотации, после которых была установлена мельница доизмельчения для доведения питания перечистой флотации до класса P_{80} 37 мкм. Перечистная флотация происходит в двух параллельных циклах с использованием флотомашин Джеймсон.

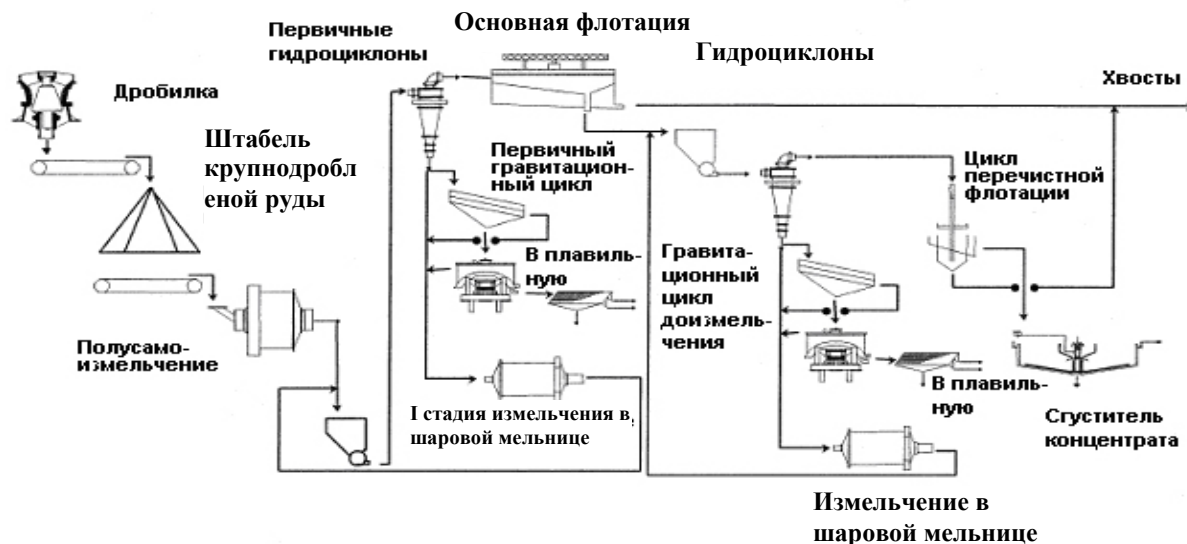


Рисунок 20. Технологическая схема Minera Alumbraera (Harbort *et al*, 2000)

Каждый цикл перечистки состоит из четырех машин первой перечистой флотации R5233/12, одной машины второй перечистой флотации R5245/12 и двух машин контрольной флотации R5233/12 (рис. 21). Концентрат перечистой флотации сгущается и перекачивается по трубопроводу длиной 312 км на фильтрующую установку в Сан Мигель де Тукуман, откуда продукт доставляется по железной дороге в порт для отгрузки.

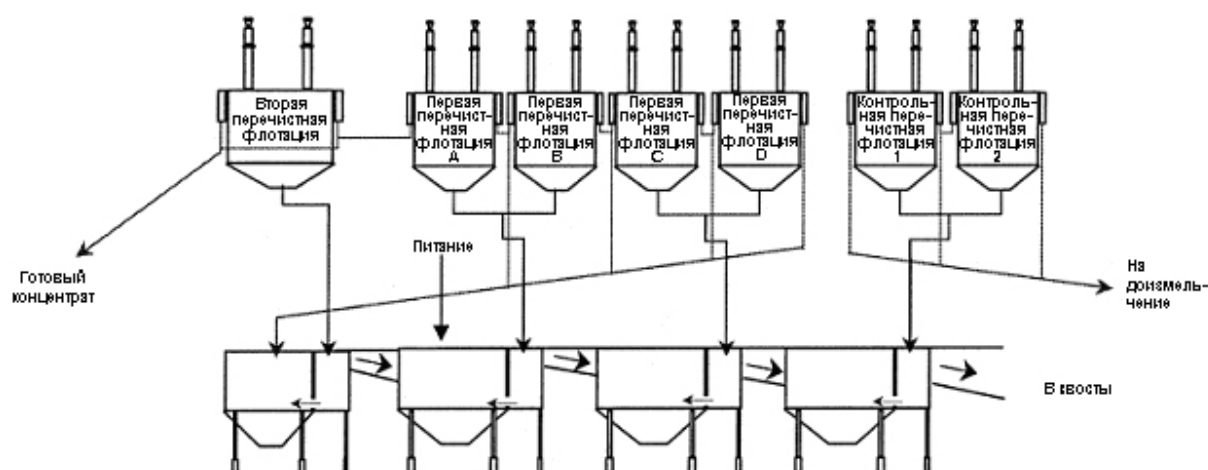


Рисунок 21. Схема цикла перечистой флотации, Minera Alumbrera (Harbort *et al*, 2000)

Данные флотации после пуска в эксплуатацию показывают, что извлечение меди в цикле перечистой флотации свыше 95% при средней производительности возможно, причем машина первой перечистой флотации А способна производить конечный концентрат при извлечении 70%. (Harbort *et al* 2000).

Характеристика извлечения в зависимости от крупности в цикле перечистой флотации меди показана на рис. 22. График подтверждает хорошее извлечение меди во всех классах крупности, особенно крупнозернистого хорошо высвобожденного халькопирита. В готовом концентрате халькопирит высвобожден на 90% благодаря крупнозернистой минерализации и тщательному доизмельчению в цикле.

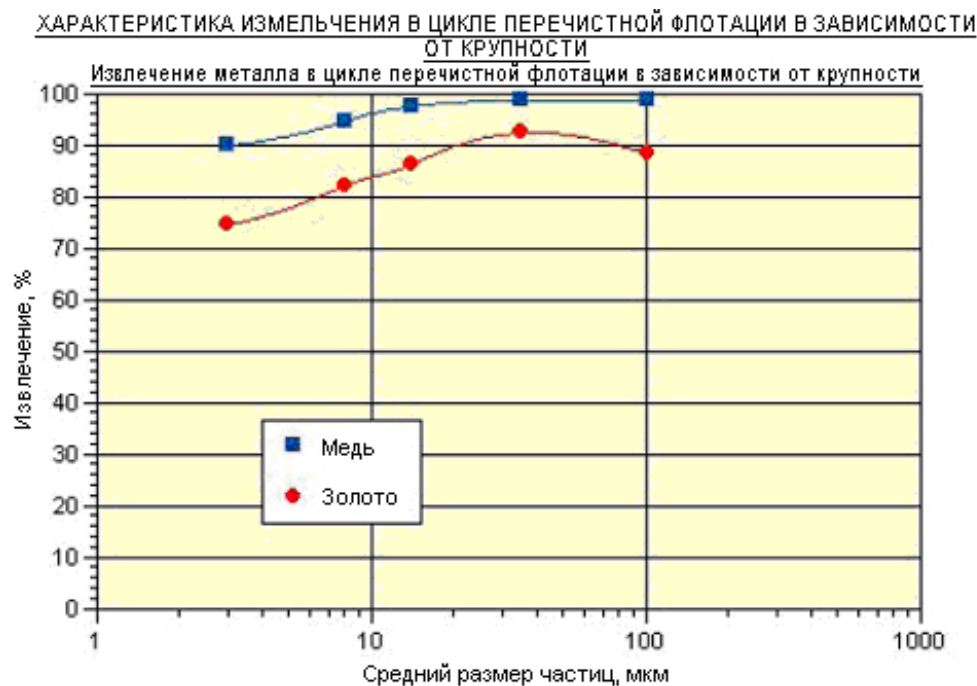


Рисунок 22. Извлечение в зависимости от крупности в цикле перечистой флотации, Minera Alumbrera (G&T, 2002)

После пуска в эксплуатацию производительность обогатительной фабрики Алумбрера выросла до более чем 100 000 т/сутки. Увеличению производительности способствовала установка третьей линии измельчения и увеличение на 50% мощностей основной и контрольной флотации. Эта модернизация была выполнена без увеличения производительности цикла перемешивающей флотации.

С момента пуска в эксплуатацию содержание меди в рядовой руде упало с 1% до 0,5%, а содержание в концентрате основной флотации - с 10% до 5%. Флотомашины Джеймсон обеспечивают вдвое более высокий коэффициент обогащения по сравнению с первоначальной схемой, что подтверждает способность флотомашин Джеймсон производить высококачественный концентрат и обеспечивать высокий коэффициент обогащения.

Текущие условия эксплуатации служат еще одним подтверждением надежности конструкции флотомашин Джеймсон, поскольку весь концентрат на фабрике Алумбрера производят первоначально установленные флотомашин Джеймсон. Однако это не значит, что возможности для дальнейшего совершенствования отсутствуют. Исходя из современного понимания флотомашин Джеймсон, а также сильных и слабых сторон традиционных флотомашин и флотомашин Джеймсон, авторы убеждены, что идеальным решением было бы добавить к флотомашинам Джеймсон несколько традиционных машин контрольной флотации, чтобы в полной мере использовать преимущества обеих конструкций и создать гибридный цикл с более низкой себестоимостью. В настоящее время предлагается новая схема цикла, позволяющая с использованием существующего оборудования уменьшить циркуляционную нагрузку и обеспечить высокий коэффициент обогащения для повышения качества конечного концентрата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С начала 1990-х годов флотомашин Джеймсон с большим успехом применяются в циклах обогащения угля и циклах SXEW, однако их применению для руд цветных металлов препятствовали особенности ранних моделей и отсутствие понимания наилучших методик их применения в циклах флотации руд цветных металлов. Конструктивные усовершенствования последнего десятилетия и более глубокое понимание сильных и слабых сторон и технологических аспектов флотомашин Джеймсон позволяют проектировать циклы с использованием флотомашин Джеймсон в качестве надежного решения при флотации руд цветных недргоценных металлов.

Флотомашин Джеймсон способны обеспечить хорошие показатели захвата минералов с высокой кинетикой и получение высококачественного концентрата при минимальном уносе. Флотомашин Джеймсон являются машинами высокой интенсивности, в которых высокая скорость сдвига создает маленькие пузырьки, селективно собирающие минералы с высокой кинетикой. Компактность конструкции позволяет рационально применять промывку пены, уменьшая механический унос и получая высококачественный концентрат за один проход. Умеренное извлечение, наблюдаемое, как правило, при использовании одной флотомашин Джеймсон при флотации руд цветных металлов, может быть повышено за счет увеличения коэффициента рециркуляции, установки дополнительных флотомашин Джеймсон или дополнительных традиционных флотомашин.

Идеальным применением флотомашин Джеймсон часто является гибридный цикл с традиционными флотомашинами, обеспечивающий более высокую эффективность при меньшей стоимости и меньшей занимаемой площади по сравнению с любой из технологий, взятой в отдельности.

Хотя флотомшины Джеймсон идеально подходят для использования в новых технологических схемах, а благодаря их компактности и небольшой габаритной высоте они являются прекрасным решением при расширении и модернизации существующих производств. Флотомшины Джеймсон могут быть установлены для повышения эффективности флотации на действующем предприятии, а также являются экономичным решением для проектов расширения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Carr, D., Harbort, G., Lawson, V., 2003, Expansion of the Mount Isa Mines Copper Concentrator Phase One Cleaner Circuit Expansion, Eighth Mill Operators' Conference, AUSIMM, Townsville, QLD

Clayton, R., Jameson, G.J., Manlapig, E.V., 1991, The Development and Application of the Jameson Cell; Minerals Engineering, July-Nov 1991

Cowburn, J.A., Stone, R., Bourke S., Hill, B., 2005, Design Developments of the Jameson Cell, Centenary of Flotation Symposium, AUSIMM Brisbane

Dawson W.J., Jackson, B.R., 1995, Evolution of Jameson Cells for Solvent Extraction Applications, Copper Hydrometallurgy Forum, Brisbane

G&T Metallurgical Services, 2002, Modal analysis of the Plant Process Streams, January, 2002, Minera Alumbra, Argentina, Report KM1256 - Consultant Report

Harbort, G.J., Murphy, A.S., Budod, A., 1997, Jameson Cell Developments at Philex Mining Corporation, Sixth Mill Operators' Conference, AUSIMM, Madang, PNG

Harbort GJ, Lauder D, Murphy AS, Miranda J, 2000, Size by Size Analysis of Operating Characteristics of Jameson Cell Cleaners at the Bajo de Alumbra Copper / Gold Concentrator, Seventh Mill Operators Conference, AUSIMM, Kalgoorlie

Harbort GJ, 2002, Pilot Plant Jameson Testwork at the Mount isa Copper Concentrator, MIM Holdings Limited - Internal Report.

Jameson, G.J., Harbort, G., Riches, N., 1991, The Development and Application of the Jameson Cell Fourth Mill Operator's Conference, AUSIMM, Burnie, Tasmania

Jameson, G.J., Goffinet, M., Hughes, D., 1991, Operating Experiences with Jameson Cell at Newlands Coal Pty Ltd, Queensland, 5th Australian Coal Preparation Conference

Jameson, G.J. and Manlapig, E.V., 1991 - Flotation cell design - experiences with the Jameson Cell, 5th AusIMM Extractive Metallurgy Conference.

Riches, N.J., 1991 - Jameson Cell testing of AG Mill discharge. MIM Holdings Limited - Internal Report.

Young, MF, J D Pease, JD, Fisher, KS., 2000, The George Fisher Project to Increase Recovery in the Mount Isa Lead/Zinc Concentrator, Seventh Mill Operators Conference, AUSIMM, Kalgoorlie