

## Улучшение работы медно-молибденовых схем с применением флотомашин Jameson Cell

Вирджиния Лоусон (Virginia Lawson)\*

1. Менеджер по технологии Jameson Cell, Glencore Technology, Австралия

### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Спорным вопросом является то, что частицы молибденита, из-за своей формы, могут быть более чувствительными к гидродинамическому воздействию, чем частицы минералов, содержащих медь. Частицы молибденита пластинчатой формы могут располагаться в одну линию по ходу технологического потока, и таким образом, иметь более низкую вероятность столкновения с пузырьками. Повышение турбулентности может способствовать увеличению частоты и эффективности столкновения, что в свою очередь может способствовать повышению скорости аккумуляции частиц.

Во флотомашине Jameson Cell высокая степень сдвига материала, создаваемая падающей струей, разбивает увлекаемый воздух на множество очень мелких пузырьков и обеспечивает повышенное столкновение пузырьков воздуха с частицами. Гидродинамические условия для сбора частиц внутри аэратора и разделения в емкости являются идентичными для лабораторных, полупромышленных и промышленных флотомашин Jameson Cell. Масштабирование размеров оборудования является прямым и апробированным. Высокая интенсивность может обеспечить наилучшие условия для усовершенствования флотации молибденита при коллективной медно-молибденитовой флотации.

В настоящей статье приведены практические примеры полупромышленных испытаний по усовершенствованию флотации молибденита в условиях флотации меди и молибденита.

**Ключевые слова:** Jameson Cell, флотация, медно-молибденовые сульфиды, молибденит, полупромышленная флотация.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Флотация, по определению Агауа и др. (2013), является комплексным многосторонним технологическим процессом, тремя ключевыми параметрами которого являются характеристики руды, химические процессы и характеристики оборудования. На каждой фабрике в системе обогащения минерального сырья каждый из этих факторов имеет большее или меньшее влияние на процесс. При сепарации флотируемых минералов от нефлотируемых минералов применение оборудования с промывкой пены является очень важным для минимизации увлечения пустой породы в концентрат. При извлечении флотируемых ценных минералов, таких как халькопирит/молибденит или флотируемых минералов, где только один является ценным, например, халькопирит/пирит, процесс сепарации будет зависеть от свойств руды, от технологической схемы ее обогащения, химии процессов и конкретных характеристик оборудования.

Самый важный фактор, воздействующий на работу флотационного оборудования, – это способность этого оборудования производить мелкие пузырьки, т.к. это влияет и на кинетику флотации, и на пропускную способность. Эффективное столкновение пузырьков с частицами и максимизация извлечения в пенный продукт позволяют обеспечить высокое извлечение и эффективное использование установленной мощности оборудования. Флотомашин Jameson Cell представляет собой превосходное устройство для достижения умеренного извлечения при высокой пропускной способности, а также отличную сепарацию от нефлотируемой пустой породы. Применение этой машины для флотации минерального сырья, например, коллективной флотации минералов, содержащих медь и молибденит, является предпочтительным благодаря превосходной эффективности аккумуляции ценных компонентов и стабильности пены. Использование промывной воды максимизирует содержание ценного компонента в концентрате посредством устранения увлекаемых частиц пустой породы в концентрат. В настоящей статье приведены примеры превосходной эксплуатации флотомашин Jameson Cell для флотации меди и молибденита, а также подтверждающие обоснования с примерами по лабораторной и полупромышленной эксплуатации, наряду с применением результатов этих работ для промышленных флотомашин Jameson Cell.

## **ТЕХНОЛОГИЯ JAMESON CELL**

Технология Jameson Cell была изобретена в конце 1980-х годов для преодоления конструктивных и эксплуатационных недостатков колонных и традиционных флотомашин. Начиная с первой коммерческой установки в 1989 году, технология постоянно совершенствовалась с целью повышения надежности и простоты использования. В настоящее время по всему миру установлено свыше 340 флотомашин для выполнения различных флотационных задач. Последние разработки сочетают в себе оригинальные преимущества образования мелких пузырьков и небольшой занимаемой площади оборудования, наряду с минимальным объемом технического обслуживания и простотой конструкции для удобства работы оператора. Jameson Cell – это устройство для флотации, основанное на механике жидкостей. Преимуществами этой инновационной машины являются:

- Стабильное формирование пузырьков малого диаметра без внешнего оборудования или диспергаторов;
- Интенсивное перемешивание пульпы с пузырьками малого диаметра, обеспечивающее быструю флотацию без механического перемешивания;
- Высокая производительность при небольшой занимаемой площади;
- Промывка пены для максимального повышения содержания в концентрате за одну стадию флотации;
- Быстродействие и простое управление;
- Стабильность эксплуатации и рабочих параметров процесса независимо от изменений расхода питания;
- Отсутствие движущихся частей, простота установки и обслуживания, высокий коэффициент эксплуатационной готовности.

При применении технологий традиционной и колонной флотации требуются коэффициенты масштабирования при использовании результатов лабораторных или полупромышленных испытаний для разработки промышленной технологии. Эти коэффициенты учитывают вариации в геометрии камер, принципы перемешивания (проскальзывание материала) и интенсивность расхода электроэнергии между единицами оборудования различного размера. Коэффициенты масштабирования также могут меняться в зависимости от задач флотации, характеристики питания и кинетики флотации.

Для технологических схем с флотомашинами Jameson Cell никаких коэффициентов масштабирования не требуется. Это возможно благодаря тому, что поверхностная скорость струи, естественное всасывание воздуха и гидродинамические условия для перемешивания одинаковы для всех типоразмеров флотомашин, от лабораторного до промышленного уровня. Эксплуатационные характеристики и параметры процесса в аэраторе идентичны не зависимо от размера флотомашин. Для машин большего типоразмера используется большее количество аэраторов. Прямое масштабирование было апробировано на многих предприятиях, в частности, по обогащению угля, цветных и благородных металлов, экстракции раствором и обогащения нерудных полезных ископаемых. На Рисунке 1 представлены два примера масштабирования оборудования от полупромышленного до промышленного уровня для обогащения цветных металлов.

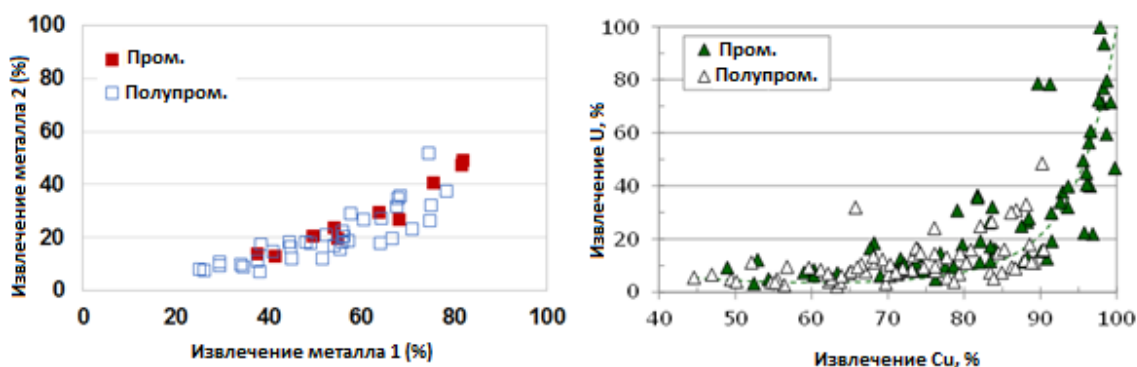


Рисунок 1 – Примеры полупромышленных испытаний и промышленного производства, демонстрирующие состоятельность масштабирования

Непрерывные полупромышленные испытания на предприятии могут обеспечить профилактику рисков для проекта, наряду с эксплуатационными данными, необходимыми для подтверждения капитальных затрат на внесение изменений в схему обогащения минерального сырья. Однако в этом нет необходимости, т.к. Jameson Cell также можно масштабировать по результатам лабораторных исследований. Лабораторное тестирование может быть выполнено на полупромышленной установке L150 Jameson Cell или также можно выполнить тесты на разбавленном питании перечистой флотации непосредственно на предприятии, данные тесты разработаны компанией Glencore Technology. Процедуры этих тестов были описаны в работе Huynh и др. (2014) и в настоящее время получили подтверждение своей эффективности на нескольких установках Jameson Cell. Пример лабораторного тестирования на разбавленном питании флотации и результаты полупромышленных испытаний приведены на Рисунке 2. Эти лабораторные тесты могут быть выполнены операторами фабрики, с течением времени можно отслеживать вариативность питания для того, чтобы лучше прогнозировать ожидаемые улучшения работы процесса, в частности устранения фактора попадания пустой породы на различных потоках на фабрике. Применение промывной воды в ходе полупромышленных испытаний и при промышленной эксплуатации флотомашин Jameson Cell является фундаментальным для удаления увлекаемой пустой породы.

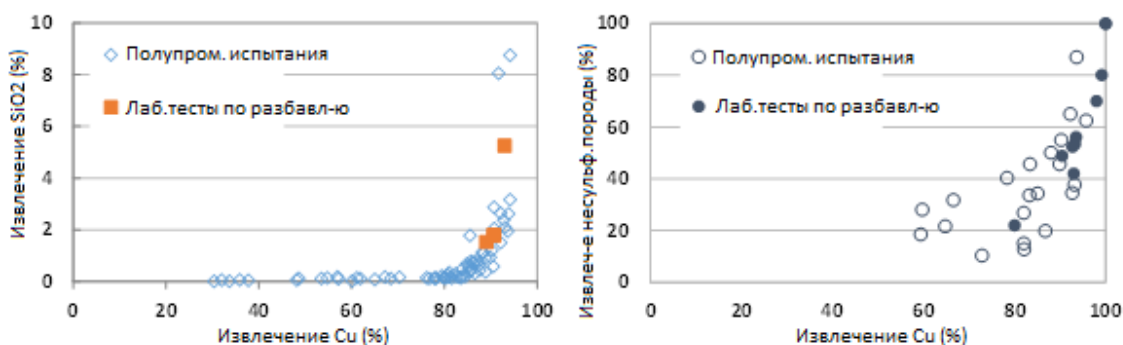


Рисунок 2 – Сравнение результатов полупромышленных испытаний и лабораторных тестов на разбавленном питании флотации

### Эффективность столкновения

В процессе флотации происходит столкновение пузырьков воздуха с частицами минералов, при этом эти частицы прилипают или прикрепляются к пузырькам воздуха и затем переходят в пенную фазу. Весь этот процесс называется аккумуляцией (англ. *collection*), эффективность этой аккумуляции,  $E$ , можно выразить следующим равенством:

$$E = E_c \cdot E_a \cdot E_s \quad (1)$$

где  $E_c$  – это эффективность столкновения,  $E_a$  – это эффективность прикреплению или прилипания, и  $E_s$  – это эффективность стабильности.

Во флотомашине Jameson Cell присутствует высокая скорость перемешивания наряду с наличием большой площади межфазной поверхности, поэтому происходит быстрый контакт и присоединение гидрофобных частиц к поверхностям пузырьков. Фактически, при высокой доле пустого пространства, пульпа является тонкой пленкой, которая окружает пузырьки воздуха. Этот механизм обеспечивает высокую эффективность стабильности, при котором флотационная емкость играет роль емкости для разгрузки, в которую пульпа выходит из нижней части аэратора, при этом пульпа переходит в состояние покоя.

Процесс извлечения частиц посредством флотации является чувствительным как к крупности частиц, так и к углу контакта (Crawford and Ralston, 1988). Традиционный график зависимости извлечения от класса крупности показывает, что тонкие частицы (<10 мкм) и крупные частицы (>100 мкм) флотируются плохо. Причины неэффективности флотации этих частиц различаются; тонкие частицы наиболее вероятно следуют в направлении потоков во флотационной камере, в следствие чего снижается эффективность столкновения, а крупные частицы наиболее вероятно открепляются от пузырьков из-за турбулентности или разрывающей силы, присутствующих во флотационной камере. Улучшение флотации наблюдается, когда турбулентность увеличивает аккумуляцию частиц на пузырьках, обеспечивается зона покоя для уменьшения отсоединения частиц от пузырьков, а также обеспечивается максимизация извлечения в пенный продукт. Флотомашин Jameson Cell обеспечивают все указанные условия.

### Пропускная способность

Авторы Finch и Dobby (1990) описали модель, которая была разработана Espinosa-Gomez и др. (1988) с целью представить понятие пропускной способности во флотации, это понятие теперь широко используется в технологиях флотации и на различных производствах. В основе модели приняты крупность частиц -  $d_p$  и плотность частиц -  $\rho_p$ .

$$C_a = K d_p \rho_p \quad (2)$$

В результате полупромышленных и промышленных испытаний была определена линейная зависимость для тонких частиц в полупромышленных и небольших промышленных колоннах. Далее в работе Patwardhan и Nonaker (2000) модель была усовершенствована посредством использования данных многочисленных лабораторий, и промышленных предприятий, где установлены Jameson Cell. Новая модель представлена ниже:

$$C_a = k d_{50}^a \sigma^d \frac{n_p d_{50}^3 \rho_p}{d_b^3} J_g \quad (3)$$

где:

$$n_p = \frac{2d_b}{d_b - \sqrt{(d_b^2 - d_{50}^2)}} \quad (4)$$

и

$$d_b = b_c J_g^c \quad (5)$$

где  $d_{50}$  – это средняя крупность частиц,  $\sigma$  – это модуль гранулометрического состава,  $a, b, c, d$ , и  $k$  – константы,  $d_b$  – диаметр пузырьков, а  $J_g$  – поверхностная скорость газа, измеряемая в см/с.  $b_c$  – это константа с тремя разными значениями для лабораторных, полупромышленных и промышленных колонн; параметры были определены экспериментальным путем соответственно наблюдаемым снижениям пропускной способности и повышению площади поперечного сечения колонн. Для получения дополнительной информации по ключевым параметрам см. Patwardhan и Nonaker (2000).

Флотомашины Jameson Cell зарекомендовали себя благодаря высокой пропускной способности, которая согласно отчетным документам находится на более высоком уровне, чем в колоннах и традиционных флотационных камерах. Согласно модели, представленной выше, высокая пропускная способность достигается за счет малого размера пузырьков, высокой эффективности возникновения контакта, и высокого извлечения в пенный продукт, благодаря наличию зоны покоя для выхода пены, а также за счет небольшого объема емкостей и малого времени пребывания материала в цикле. Из уравнения (3) следует, что размер пузырьков является ключевым определяющим параметром пропускной способности, которая отличает флотомашины Jameson Cell. Подтверждение малого размера пузырьков представлено в работе Университета МакДжилл (McGill University) и продемонстрировано на Рисунке 3.

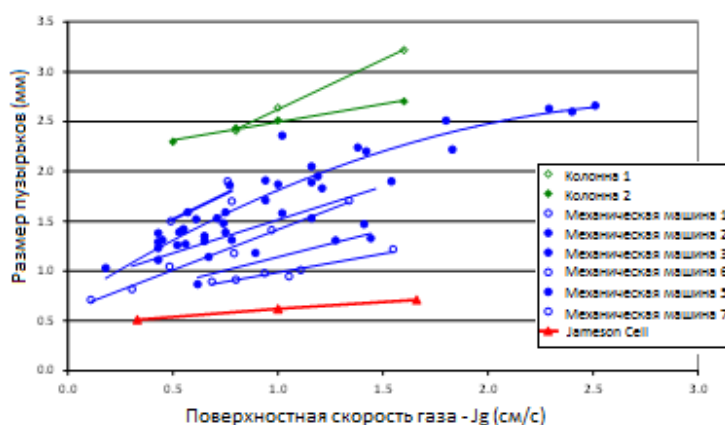


Рисунок 3 – Зависимость размера пузырьков от параметра  $J_g$  для различных технологий флотации

Демонстрируемое увеличение пропускной способности можно увидеть на примере, представленном в медной флотации, где в полупромышленную установку Jameson Cell подавали питание колонной флотации, при этом было достигнуто значительное улучшение пропускной способности по сравнению с колоннами, находящимися в эксплуатации. Было достигнуто улучшение в три раза, что представлено на Рисунке 4.

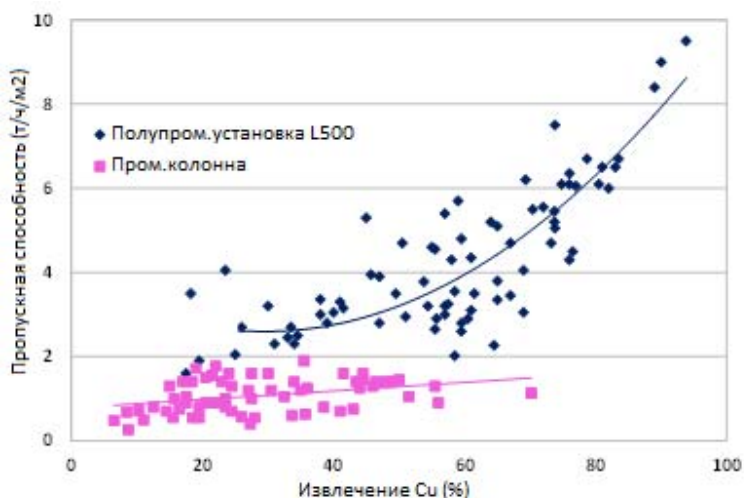


Рисунок 4 – Пропускная способность полупромышленной установки Jameson Cell в сравнении с колоннами в эксплуатации

### Извлечение в пенный продукт

Zanin, Grano и Ametov (2010) проводили наблюдения в схеме с колоннами перемешивающей флотации меди и молибдена, с целью определить относительное значение зоны аккумуляции и пенной фазы. Для этого они отобрали образцы с разных точек, включая точку чуть ниже границы разделения пены и пульпы, и выполнили гранулометрический анализ. Характеристики по меди оказались типичными для аналогичных колонн медной флотации, при этом частицы среднего размера, около 30 мкм, характеризовались более высоким извлечением, чем менее и более крупные частицы. Извлечение молибдена было очень низким, и составило менее 10% во всех диапазонах классов крупности. Анализ классов крупности показал, что содержание молибдена в пенной фазе было очень низким, в то время как содержание меди было высоким. Это привело авторов к выводу, что извлечение молибдена в пенный продукт по всей колонне значительно ниже, чем извлечение меди.

Seaman, Franzidis и Manlapig (2004) предположили, что селективное непопадание частиц в пену может быть результатом одного из следующих трех механизмов:

1. Отрыв слабо прикрепленных частиц по мере того, как агрегаты прибывают на границу разделения пульпы и пены. Это может быть вызвано силами, воздействующими на агрегаты, т. к. эти силы быстро изменяют скорость движения при столкновении частиц на границе фаз.
2. Селективный отрыв частиц от поверхности пузырьков во время возникновения явлений прилипания, происходящих в пене, и в ходе разрыва пузырьков на поверхности пены. Это маловероятный вариант, предполагается, что данный процесс является неселективным при внезапном разрыве пленки пузырьков.
3. Селективное повторное прикрепление частиц, которые отсоединяются от пузырьков в ходе процесса прилипания. Этот процесс не может произойти при высокой пенной нагрузке из-за отсутствия доступных мест для повторного прикрепления.

Seaman, Franzidis и Manlapig (2006) предполагают, что извлечение в пену присоединенных частиц во флотационной камере происходит селективно, в зависимости от размера частиц, плотности и гидрофобности. Результаты исследований вышеуказанных авторов подтвердили селективный перенос прикрепленных частиц в пенную фазу. Граница разделения пульпы и пены является важной зоной, в которой можно в значительной степени улучшить прикрепление частиц к поверхности пузырьков, а также снизить значительную часть потерь извлечения в пенную фазу. Honaker и Ozsever (2003) изучали процесс отсоединения частиц для систем, где условия стремились от условий, ограничивающих кинетику, к условиям, ограничивающим пропускную способность; при этом фактор попадания пустого материала был в большей степени устранен. Они отметили значительную степень обогащения по всей зоне пенной фазы в условиях высокой нагрузки твердых частиц и пришли к выводу, что процесс отсоединения частиц является селективным, при этом частицы, имеющие самую слабую связь с поверхностью пузырьков преимущественно отсоединяются.

В ходе дальнейшей работы авторов Honaker, Ozsever и Parekh (2006) было установлено, что условия, при которых применялись ограничения пропускной способности, привели к повышению селективности флотации за счет селективного отсоединения частиц в результате уменьшения поверхности пузырьков и противотока, который возникает между зоной аккумуляции и зоной пены. В ходе промышленных исследований авторов Rahman, Ata и Jameson (2015) с применением устройства, описанного в работе Rahman, Ate и Jameson (2013) была выполнена оценка влияния переменных промышленных показателей на извлечение ценных компонентов в пенный продукт. Очевидным образом было обнаружено, что скорость воздуха оказывает значительное положительное влияние на извлечение частиц; как в зоне аккумуляции, так и в пенной зоне, наряду с этим наблюдалось снижение качества концентрата в результате извлечения частиц при более низком содержании ценного компонента. Было также обнаружено, что глубина пенного слоя также имеет большое значение, при этом извлечение в пенный продукт значительно снижалось по мере увеличения отсоединения частиц, в результате чего наблюдалось значительное повышение качества частиц. Результаты промышленных исследований указывают на то, что извлечение в пенный продукт может составлять от 75 до 85 процентов при правильном выборе рабочих параметров, это можно наблюдать на фабриках с непрерывным режимом работы. Флотомшины Jameson Cell работают при меньшей глубине пенного слоя, чем при колонной флотации, это может способствовать улучшению извлечения в пенный продукт.

При селективном обогащении сульфидных минералов можно применять высокую циркулирующую нагрузку для увеличения конкуренции за пространство пузырьков, чтобы удалить менее гидрофобные частицы, поскольку схемы работают в условиях, близких к ограничениям пропускной способности. Об этом сообщалось в отчетных данных по сепарации меди от никеля и при флотации пентландита и пирротина (Lawson и др. 2014). Такой же непреднамеренный и нежелательный эффект наблюдается при флотации меди и молибдена. Welsby (2014) определил, что при флотации молибдена требуется высокая стабильность пены для достижения максимального извлечения, наиболее вероятно, из-за конкуренции по прилипанию в пене между очень гидрофобными медными минералами и умеренно гидрофобным молибденитом при ограниченной площади поверхности пузырьков. При обогащении молибденита концентрация вспенивателя должна составлять от четырех до семи раз выше дозы критического прилипания; в то время как дозировка в два – три раза выше была



достаточной для обогащения меди. Отсюда следует, что положительные результаты по обогащению во флотомашинах Jameson Cell могут включать улучшение стабильности пены.

### **Флотация молибденита**

Молибденит состоит из атома молибдена, окруженного шестью атомами серы, расположенных в виде гексагонального слоя. Несмотря на то, существует также тригональная система, она менее распространена (Castro и др., 2016). Соединения S-Mo-S имеют сильные ковалентные связи в слоях, в то время как между прилегающими S-S слоями существуют слабые молекулярные силы. Как сообщалось в работе Triffett и др. (2008), эти слабо скрепленные слои легко расщепляются в ходе процессов измельчения. Из-за такой структуры, полученный в результате измельчения продукт может иметь очень гидрофобные поверхности и инертные края. Именно эти факторы, скорее всего, будут основными факторами индивидуальной гидрофобности частиц. Молибденит характеризуется как гидрофобный анизотропный минерал (Laskowski, 2012). Эта группа также включает тальк и графит.

Ametov и др. (2008) утверждали, что этот фактор, связанный с формой частиц молибденита может быть причиной для низкого извлечения во флотационных схемах по сравнению с обогащением медных минералов в этой же схеме. В их работе была использована повышенная турбулентность, при уменьшении плотности твердой фазы в пульпе, в лабораторных и промышленных схемах, целью было продемонстрировать, что повышенная турбулентность при низкой плотности твердых частиц будет иметь положительное влияние на эффективность столкновений частиц с пузырьками. Результаты их работы показали, что, хотя изменения плотности питания не повлияли на извлечение меди, эти изменения повлияли на извлечение молибденита, а именно – наблюдалось повышение извлечения при меньшей плотности питания флотационной схемы. Этот эффект был продемонстрирован как на действующем производстве путем проведения испытаний, так и по результатам лабораторных исследований на питании флотации. При более низкой плотности питания содержание меди и молибденита было улучшено.

Один из выводов из работы Ametov и др. (2008) заключается в том, что и морфология частиц, и гидродинамика во флотомашине, могут играть важную роль при извлечении молибденита. Частицы молибденита из-за своей формы, наиболее часто выстраиваются вдоль линий потока, что уменьшает вероятность их столкновения с пузырьками. Повышение извлечения по результатам их работ заключалось в значительном улучшении извлечения более крупных частиц. Также предполагается, что это улучшение по извлечению крупных частиц происходит из-за высокого соотношения поверхности частиц к их краям, по сравнению с мелкими частицами, которые имеют более высокую долю краев, принимающих участие в процессе, по сравнению с их поверхностью.

Другие работы, проведенные на действующем предприятии по обогащению меди/молибденита, включают в себя работы Hernandez-Aguilar и Basi (2009) на Медном руднике Highland Valley. Это исследование сфокусировано на схеме молибдена и, в частности, на двух последних колоннах в схеме перемешивающей флотации. Уменьшение размера пузырьков приводит к 4-5-кратному увеличению производительности и извлечения по колоннам, а также к незначительному увеличению содержания, при условиях, когда большая часть пузырьков имела диаметр менее 1 мм.

В дополнение к различиям параметров работы флотационных схем в результате изменения гидродинамических условий Triffett и Bradshaw (2008) выявили корреляции между типами

руд, которые, наиболее вероятно, приводят к снижению извлечения молибденита при составлении шихт из различных типов руд. Данное снижение эффективности обогащения было более значительным для молибденита, чем для медных минералов. Последующие лабораторные испытания этих гипотез авторами Zanin и др. (2009) подтвердили, что молибденит более чувствителен к операционной среде, чем сульфидные медные минералы. Более высокие концентрации Ca, Mg, Fe и K были определены в медленно флотируемом молибдените, что соотносится с наличием скарнов.

Молибденовая флотация зависит от типа руды, а также от своей анизотропной природы. Условия флотации, которые были предложены для промышленных испытаний, с целью улучшения процесса флотации, могут быть соотнесены с аналогичными улучшениями процесса флотации во флотомашинах Jameson Cell. Хотя гидродинамические факторы имеют большое значение, наиболее вероятен случай, когда тип руды в значительной степени влияет на процесс.

## **СХЕМЫ НА ДЕЙСТВУЮЩИХ ФАБРИКАХ**

Флотационные схемы в Северной и Южной Америке, как правило, разработаны с учетом циркулирующей нагрузки на перечистной стадии колонной флотации для обеспечения высокого извлечения в схеме, несмотря на, как правило, низкое стадийное извлечение молибдена в колоннах. Эта особенность разработанных схем описывается в работах Zanin, Grano и Ametov (2010), а также Bulatovic, Wyslouzil и Kant (1998). В работе Zanin, Grano и Ametov (2010) описываются характеристики типичной медно-молибденовой технологической схемы с использованием традиционных флотомашин и колонн. В приведенном примере, на колонну перечистной флотации извлечение составляет 56 процентов по меди и лишь 7 процентов по молибдену. Общее извлечение по фабрике составляет 67 процентов, что было достигнуто лишь благодаря очень высокой циркулирующей нагрузке, возвращающей молибденит в питание колонны. Посредством измерений твердых частиц, расположенных чуть ниже границы разделения пульпы и пены, Zanin, Grano и Ametov (2010) пришли к выводу, что содержание меди было высоким в пенной фазе в то время как содержание молибдена – низким.

В Таблице 1 представлены некоторые промышленные данные для демонстрации поведения данного процесса, представлены четыре предприятия, на которых работают колонны на первой стадии перечистной флотации, при этом извлечение меди составляет от 55 до 65 процентов, а извлечение молибдена составляет от 7 до 23 процентов. В схемах контрольной перечистной флотации извлекается чуть больше 95 процентов оставшейся меди и молибдена и создается высокая циркулирующая нагрузка, чтобы обеспечить удовлетворительные показатели извлечения для общей схемы.

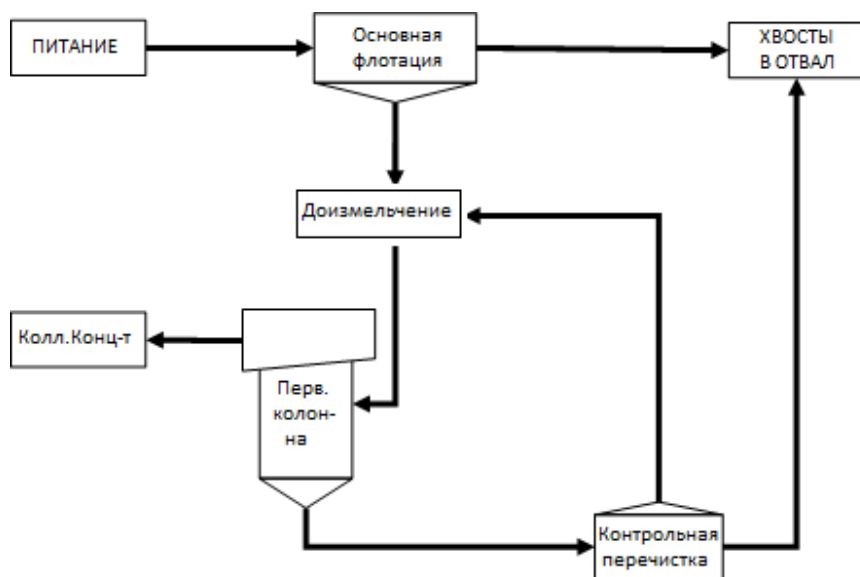


Рисунок 5 – Типичная технологическая схема коллективной флотации меди и молибдена

Таблица 1 – Извлечение ценных компонентов по стадиям

	Извлечение Cu	Извлечение Mo	Улучшение Cu	Улучшение Mo	Селективность Cu:Mo
<i>Участок 1</i>					
Колонна первой перечистки	59	17	1.4	0.4	3.5
Колонна контрольной флотации	84	76	1.3	1.3	1.1
<i>Участок 2</i>					
Перечистная флотация	67	33	7.8	3.8	2.0
Контрольная перечистная флотация	94	92	1.1	2.8	1.0
<i>Участок 3</i>					
Колонна первой перечистки	65	15	3.9	0.9	4.3
Контрольная перечистная флотация	98	92	2.0	2.0	1.1
<i>Участок 4*</i>					

Колонна первой перечистки	56	7	2.3	0.3	8.0
Контрольная перечистная флотация	99	99	н/д	н/д	1.0
<i>Участок 5</i>					
Колонна первой перечистки	55	23	н/д	н/д	2.4

\* по данным Zanin, Grano и Ametov (2010)

### **ФЛОТОМАШИНЫ JAMESON CELL ДЛЯ ПЕРВОЙ СТАДИИ ПЕРЕЧИСТКИ**

Из информации, представленной по молибденовой флотации, а также из данных по фабрикам, представленных в Таблице 1, можно сделать вывод, что извлечение молибдена является низким по столбцам и колоннам перечистной флотации, вероятно, из-за плохого распределения пузырьков по размеру, низкой эффективности аккумуляции, плохого извлечения в пенный продукт и потенциальных ограничений пропускной способности. Учитывая, что все эти специфические условия лучше во флотомашине Jameson Cell, можно ожидать улучшения характеристик процесса.

На Рисунке 6 приведены результаты сравнения лабораторных и полупромышленных флотомашин L500 Jameson Cell для четырех различных производств. Как было отмечено ранее, результаты лабораторных и полупромышленных испытаний согласуются, указывая на то, что лабораторных данных достаточно для демонстрации ожидаемых характеристик работы флотомашин Jameson Cell. На двух фабриках существующие схемы колонной флотации также находятся под наблюдением, и обеспечивается сравнение процессов. Во всех случаях селективность Cu:Mo улучшается в Jameson Cell, при этом высокое извлечение меди и молибдена было достигнуто на всех участках. Характеристики работы на каждом из объектов немного отличаются и такие факторы, как вскрытие материала, химия и типы руды, являются факторами, воздействующими на процесс.

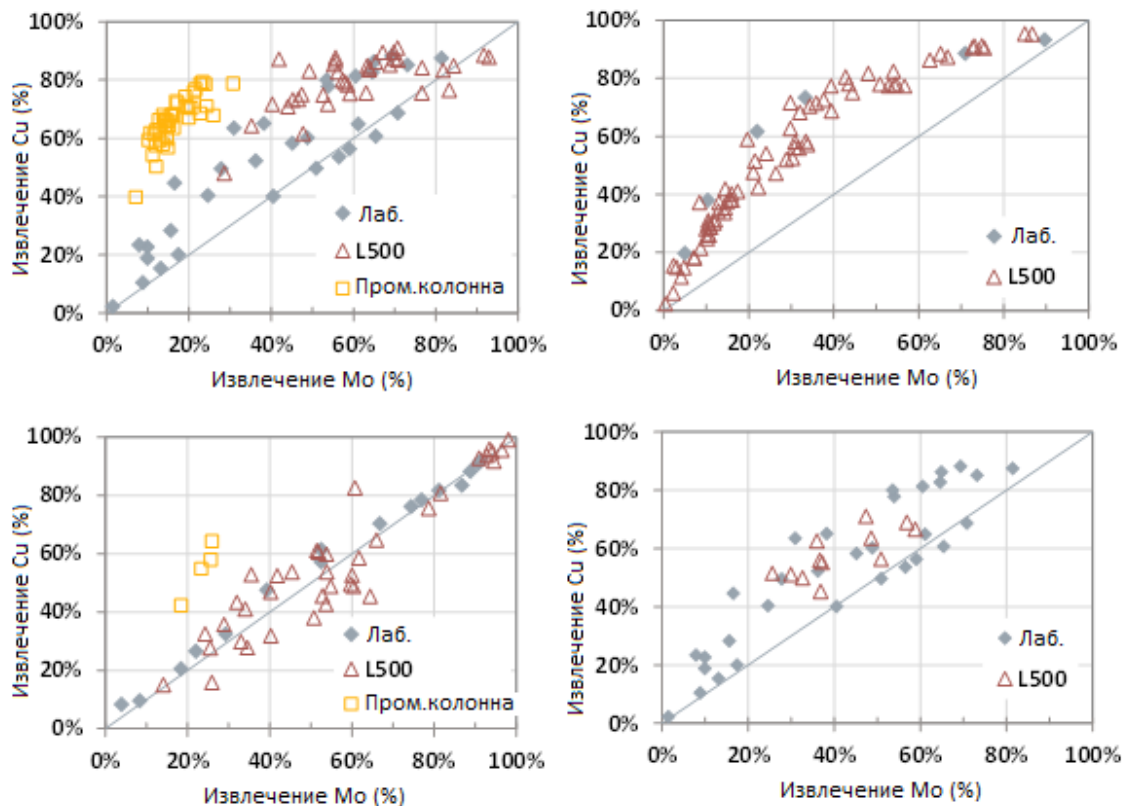


Figure 6 – Эксплуатация флотомашин Jameson Cell на первой стадии перечистной флотации меди и молибдена

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подтверждающие данные, полученные по результатам испытаний на действующих фабриках, показывают, что флотомшины Jameson Cell можно масштабировать непосредственно от лабораторного до промышленного уровня. Это возможно осуществить потому, что скорость струи, всасывание воздуха и гидродинамические условия для смешивания одинаковы во флотомшинах разного типоразмера от лабораторной L150 до промышленной установки. В дополнение к испытаниям L150, были разработаны традиционные лабораторные тесты, которые имитируют эксплуатацию флотомашин, эти тесты можно легко выполнить на промышленном участке, чтобы определить преимущества работы Jameson Cell в широком диапазоне условий эксплуатации на фабрике. Примеры масштабирования от лабораторной установки L150 и от выполнения испытаний на разбавленном питании на стадии перечистной флотации до пилотных испытаний на установке L500 и в промышленном режиме были продемонстрированы.

При флотации молибдена в медно-молибденовых схемах на практике рабочих фабрик часто наблюдается низкое извлечение на первой стадии перечистной флотации. Для того, чтобы обеспечить приемлемые показатели извлечения на фабрике, как правило, используется каскад традиционных флотомашин на стадии контрольной перечистки с целью извлечения

молибдена и формирования высокой циркулирующей нагрузки, направляемой обратно в схему перечистной флотации. Плохое извлечение молибдена по сравнению с медью может быть результатом низкой эффективности столкновений частиц с пузырьками, плохого извлечения в пенный продукт и селективного отсоединения частиц в пенной фазе, а также, возможно, из-за превышения пропускной способности. Применение флотомашин Jameson Cell для выполнения задач перечистной флотации имеет несколько гидродинамических преимуществ, которые были продемонстрированы в ходе полупромышленных испытаний. Пузырьки меньшего диаметра, интенсивное перемешивание и небольшая глубина пенного слоя позволяют обеспечить высокое извлечение в пенный продукт, в некоторых случаях соотношение по извлечению меди и молибдена может достигать 1: 1.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ametov, I., Grano, S.R., Zanin, M., Gredelj, S., Magnuson, R., Bolles, T., Triffett, B., (2008) 'Copper and molybdenite recovery in plant and batch laboratory cells in porphyry copper rougher flotation' *Proceedings of the XXIV International Mineral Processing Congress (IMPC)*, Beijing, China, Vol 1., pp. 1129-1137.
- Araya, R., Huynh, L., Young, M., & Arburo, K. (2013) 'Solving challenges in copper cleaning circuits with the Jameson Cell', *Proceedings of Procemin 2013*, Gecamin, Santiago. pp. 261-271.
- Bulatovic, S. M., Wyslouzil, D. M., & Kant C. (1998) 'Operating practices in the beneficiation of major porphyry copper/molybdenum plants from Chile: Innovated technology and opportunities, a review', *Minerals Engineering*, vol. 11, No. 4, pp. 313-331.
- Castro, S., Laskowski, J.S. (2015) 'Depressing effects of flocculants on molybdenite flotation', *Minerals Engineering*, vol. 74, pp. 13-19.
- Castro, S., Lopez-Valdivieso, A., Laskowski, J.S. (2008) 'Review of the flotation of molybdenite. Part I: surface properties and floatability', *International Journal of Mineral Processing*, vol. 148, pp. 48-58.
- Finch, J. A., & Dobby, G. S. (1990) 'Column Flotation', Oxford: Pergamon Press.
- Hernandez-Aguilar, J. R. & Basi, J. (2009) 'Improving Column Flotation Cell Operation in a Copper/Molybdenum Separation Circuit', *Proceedings of the 41<sup>st</sup> Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors*, Ottawa, Ontario, pp. 39-61.
- Honaker, R. Q. & Ozsever, A. V. (2003) 'Evaluation of the selective detachment process in flotation froth', *Minerals Engineering*, vol. 16, pp. 975-982.
- Honaker, R. Q., Ozsever, A. V. & Parekh, B. K. (2006) 'Selective detachment process in column flotation froth', *Minerals Engineering*, vol. 19, pp. 687-695.
- Huynh, L., Araya, R., Seaman, D. R., Harbort, G., Munro, P. D. (2014). 'Improved cleaner circuit design for better performance using the Jameson Cell', *Proceedings Twelfth Mill Operators Conference*, Townsville, Queensland, pp. 141-152.
- Kelebek, S., Yoruk, S., & Smith, G.W. (2001) 'Wetting behaviour of molybdenite and talc in lignosulphonate/MIBC solutions and their separation by flotation', *Separation Science and Technology*, vol. 36 (2), pp. 145-157.
- Laskowski, J.S. (2012) 'Anisotropic minerals in flotation circuits', *CIM Journal*. Vol 3., No. 4. Pp. 203-213.

- Lauder, D. W., Mavotoi, M., & Glatthaar, J. W. (2003) 'Fluorine Removal from Ok Tedi Copper/Gold concentrates', *Proceedings Eighth Mill Operators Conference*, Townsville, Queensland, pp. 203-209.
- Lawson, V., Hill, G., Kormos, L., Marrs G. (2014) 'The separation of pentlandite from chalcopyrite, pyrrhotite and gangue in nickel projects throughout the world', *Proceedings Twelfth Mill Operators Conference*, Townsville, Queensland, pp. 153-162.
- Patwardhan, A., Honaker, R. Q. (2000) 'Development of carrying capacity model for column froth flotation', *International Journal of Mineral Processing*, vol. 59, pp. 273-293.
- Rahman, R. M., Ata, S., & Jameson, G. J. (2013) 'Froth recovery measurements in an industrial flotation cell', *Minerals Engineering*, vol. 53, pp. 193-202.
- Rahman, R. M., Ata, S., & Jameson, G. J. (2013) 'Study of froth behaviour in a controlled plant environment – Part 1: Effect of air flow rate and froth depth', *Minerals Engineering*, vol. 81, pp. 152-160.
- Seaman, D. R., Franzidis, J-P. & Manlapig, E. V. (2004) 'Bubble load measurement in the pulp zone of industrial flotation machines – a new device for determining the froth recovery of attached particles', *International Journal of Mineral Processing*, vol. 74, pp. 1-13.
- Triffett, B., Veloo, C., Adair, B.J.I., & Bradshaw, D. (2008) 'An investigation of the factors affecting the recovery of molybdenite in the Kennecott Utah Copper bulk flotation circuit', *Minerals Engineering*, vol. 21, pp. 832-840.
- Welsby, S. D. D. (2014) 'Pilot scale frother testing at Highland Valley Copper', *Proceedings of the 46<sup>th</sup> Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors*, Ottawa, Ontario, pp. 301-314.
- Zanin, M., Ametov, I., Grano, S., Zhou, L. & Skinner, W. (2009) 'A study of the mechanisms affecting molybdenite recovery in a bulk copper/molybdenum flotation circuit', *International Journal of Mineral Processing*, vol. 93, pp. 256-266.
- Zanin, M., Grano, S. & Ametov, I. (2010) 'Technical challenges in the flotation of molybdenite from porphyry copper ores', *Proceedings of the XXV International Mineral Processing Congress (IMPC)*, Brisbane, Queensland, Australia, pp. 2651-2661.