

## ПРОМЫШЛЕННОЕ ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ АЛЬБИОН

**Майк Хорн**

Руководитель гидрометаллургического направления

Xstrata Technology

4 этаж, Квин Стрит, 307, Брисбен, Квинсленд,  
4001

**Тел.** +61 7 3833 8539

**Факс** +61 7 3833 8555

**Эл. почта** mhourn@xstrata.com.au

Данкан У. Тернер,

Кандидат технических наук, Генеральный менеджер - Процесс Альбион

Core Resources Pty Ltd

44 Коранна-Стрит, Альбион, Квинсленд 4010,  
Австралия

**Тел.** +61 7 3637 8105

**Факс** +61 7 3637 8199

**Эл. почта** dturner@coreresources.com.au

**Сайт** [www.albionprocess.com](http://www.albionprocess.com)

Докладчик

**Майк Хорн**

### АННОТАЦИЯ

Технология Процесс Альбион™ сочетает в себе ультратонкое измельчение в мельнице IsaMill™ разработки Xstrata Technology с последующим окислительным выщелачиванием при атмосферном давлении в нескольких реакторах для обеспечения высокой эффективности массового переноса кислорода. В Процесс Альбион™ подается сульфидный концентрат, содержащий цветные или драгоценные металлы. Технология Процесс Альбион™ применяется для окисления сульфидных минералов, присутствующих в концентрате, и высвобождения металлов для дальнейшего извлечения традиционными методами. Цикл окислительного выщелачивания протекает практически при нейтральном показателе рН при переработке упорных концентратов с содержанием золота и серебра, что позволяет упростить схему технологического оборудования и снизить капитальные затраты. При переработке концентратов основных металлов окислительное выщелачивание протекает в кислотных условиях.

Путь от концептуальной разработки до промышленного внедрения Процесса Альбион™ был длинным и тернистым. Технология Процесс Альбион™ была разработана в 1994 году компанией MIM Holdings/Xstrata и запатентована по всему миру. Идея создания Процесса Альбион™ возникла после успешного внедрения первой мельницы IsaMill™ M3000 на руднике Маунт Айза в 1994 году. В течение первых 12 лет компания MIM Holdings рассматривала эту технологию как стратегический актив и, соответственно, не предлагалась заказчикам, не входящим в группу компаний MIM Holdings. В 2005 году, после поглощения MIM Holdings компанией Xstrata, стратегическое направление изменилось, и технологию стали предлагать внешним заказчикам через Xstrata Technology.

Технология вызвала большой интерес, первые лицензии были выданы в 2005 году для проекта Лас Лагунас (Las Lagunas) и в 2006 году для проекта Чертеж (Certej). Промышленное внедрение технологии началось в 2010 году с запуском установки Процесс Альбион™ компании Xstrata в Испании (4 000 тонн в год цинка металлического), далее в 2011 году компания Xstrata запустила вторую установку Процесс Альбион™ в Германии (16 000 тонн в год цинка металлического). Золотодобывающий проект Лас Лагунас будет запущен в 2012 году, проект по переработке упорных золотых руд компании ГПМ будет запущен в 2013 году. Внедрение пятой установки Процесс Альбион™ для проекта по переработке упорных золотых руд на руднике Чертеж в Румынии находится на конечном этапе оформления разрешительной документации.

### ПРОЦЕСС АЛЬБИОН™

Технология Процесс Альбион™ сочетает в себе ультратонкое измельчение и окислительное выщелачивание при атмосферном давлении. В качестве питания в Процесс Альбион™ подается сульфидный концентрат, содержащий основные или драгоценные металлы. Технология Процесс Альбион™ применяется для окисления сульфидных минералов, присутствующих в концентрате, и высвобождения металлов для последующего извлечения традиционными методами.

Первым этапом технологии Процесс Альбион™ является ультратонкое измельчение концентрата по технологии IsaMill™ компании Xstrata. Большинство сульфидных минералов не поддаются достаточно быстрому выщелачиванию при атмосферном давлении. При ультратонком измельчении в кристаллической решетке сульфидного минерала создается сильное напряжение. Благодаря этому количество дефектов кристаллической решетки и трещин по границам зерен увеличивается на несколько порядков по сравнению с неизмельченными минералами. За счет создания напряжения снижается уровень энергии активации для окисления сульфидов, что делает выщелачивание при атмосферных условиях возможным. Скорость выщелачивания также увеличивается за счет увеличения площади поверхности минерала.

Тонкое измельчение также предотвращает пассивирование выщелачиваемого минерала продуктами реакции выщелачивания. Пассивирование происходит, когда продукты выщелачивания, такие как оксиды железа и элементарная сера, осаждаются на поверхности выщелачиваемого минерала. Данные осаждения пассивируют минерал, перекрывая доступ химических веществ к поверхности минерала. Пассивирование, как правило, происходит, как только толщина слоя выпавшей в осадок фазы достигает 2–3 мкм. Ультратонкое измельчение минералов до крупности 80% класса 10–12 мкм исключает пассивирование, поскольку выщелачиваемый минерал распадается до образования слоя осадка достаточной для пассивирования толщины.

После тонкого измельчения минералов пульпа подвергается выщелачиванию в чанах с перемешиванием, известных как реактор выщелачивания Альбион, разработанных компанией Xstrata. В реакторе выщелачивания Альбион для окисления в пульпу выщелачивания на сверхзвуковой скорости подается кислород, в результате повышается эффективность массового переноса. Реактор выщелачивания Альбион рассчитан на эксплуатацию в условиях, близких к точке кипения пульпы, без необходимости охлаждения. Выщелачивание носит автотермический характер, температура пульпы выщелачивания зависит от количества тепла, образованного при реакции выщелачивания. Не предусматривается подвод тепла в чан выщелачивания, а избыточное тепло, образованное в ходе окисления, отводится посредством увлажнения отходящих из чана газов.

## ТЕХНОЛОГИЯ ISAMILL™

IsaMill™ представляет собой промышленную энергоэффективную технологию непрерывного измельчения, специально разработанную для переработки упорных металлических руд. Xstrata Technology поставляет установки IsaMill™ на горнодобывающие предприятия по всему миру. В настоящее время в эксплуатации находится более 100 мельниц в 9 странах. Камера измельчения мельницы IsaMill™ отличается очень высокой энергоемкостью, 300 кВт/м<sup>3</sup>, что обеспечивает компактность и простоту установки. На рисунках 1 и 2 показаны схемы типовых компонентов мельницы IsaMill™.

Для мельницы IsaMill™ используется мелюющая среда крупностью в диапазоне 1,5–3,5 мм. В качестве мелющей среды может выступать самоизмельченный материал, отсортированный из исходной руды, кварцевый песок или керамический бисер.

В мельнице IsaMill™ на валу устанавливается до восьми дисков, каждый из которых выступает в роли отдельного мелющего элемента. Время пребывания пульпы в мельнице приближено к идеальной модели вытеснения практически исключая проскальзывание материала к разгрузке. Благодаря данным характеристикам, IsaMill™ может работать в открытом цикле без циклонов.

Мельница IsaMill™ представлена следующими моделями:

- M1000 (500 кВт), пропускная способность 10–16 тонн в час
- M3000 (1100 кВт), пропускная способность 20–35 тонн в час
- M5000 (1500 кВт), пропускная способность 30–55 тонн в час
- M10000 (3000 кВт), пропускная способность 60–100 тонн в час

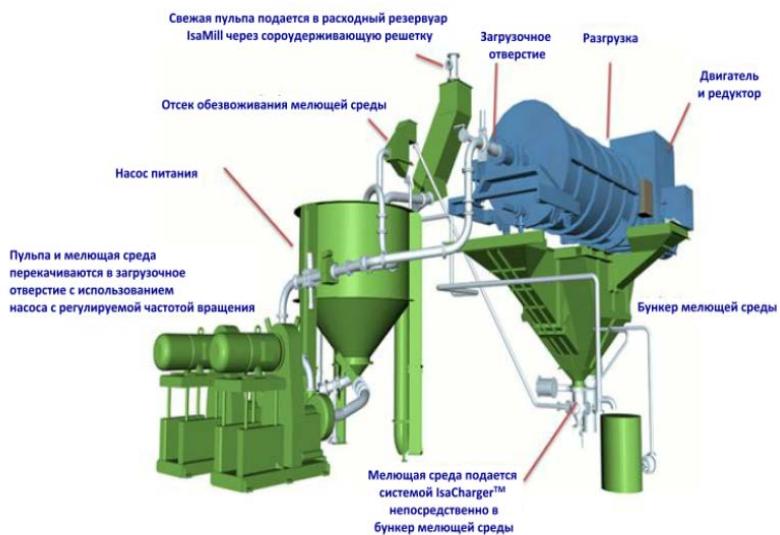


Рисунок 1  
Ключевые компоненты IsaMill™

Мельница IsaMill™ может функционировать в открытом цикле при высокой плотности пульпы, что является ключевым преимуществом в цикле выщелачивания, так как в раствор выщелачивания подается ограниченное количество воды для упрощения водного баланса.

В технологии IsaMill™ используется инертная мелющая среда, которая обеспечивает чистую, отполированную поверхность минералов, что способствует улучшению кинетики выщелачивания. В мельнице достигается четкое распределение по крупности с получением очень небольшого количества крупнозернистого материала. Класс измельчения 98% на стороне разгрузки мельницы, как правило, в 2,5 раза меньше, чем класс измельчения 80%, поэтому в цикл выщелачивания поступает незначительное количество крупнозернистого материала, что обеспечивает очень высокие показатели извлечения металла.

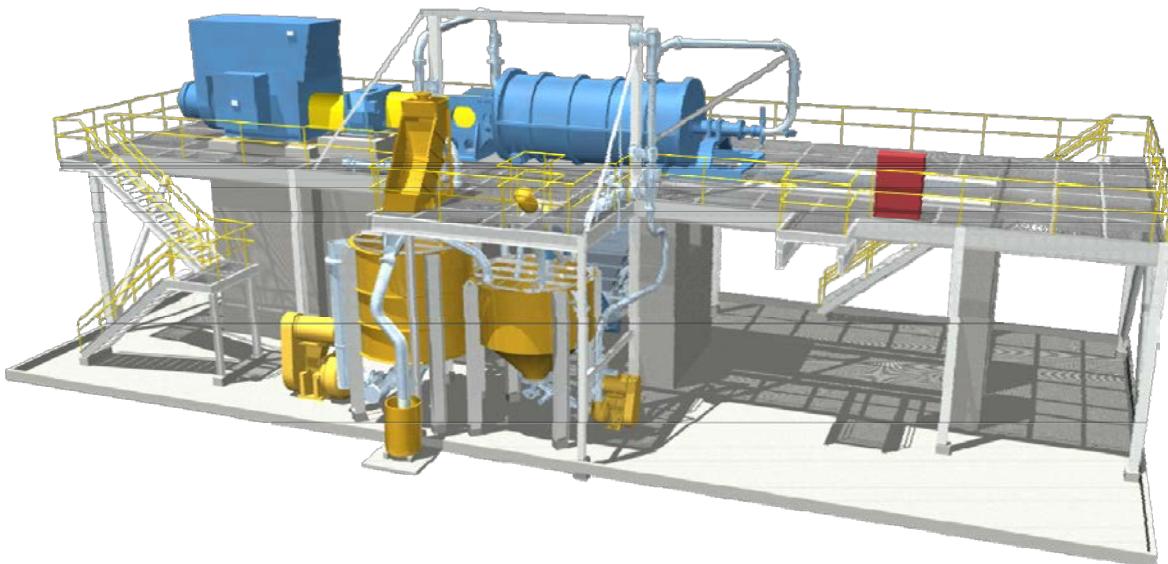


Рисунок 2  
Схема установки измельчения IsaMill™

IsaMill™ является самой высокоинтенсивной технологией измельчения ( $>300 \text{ кВт}/\text{м}^3$ ), а это значит, что мельница также является самой компактной установкой, занимая небольшую площадь при малой высоте. Мельница IsaMill™ имеет горизонтальное устройство, доступ к установке измельчения обеспечивается через площадку на высоте примерно 3 м. Доступ к мельнице и ее техобслуживание упрощается за счет небольшой конфигурации мельницы IsaMill™ и установки измельчения. Обслуживание мельницы IsaMill™ не сложнее стандартного

IsaMill™ позволяет получить в открытом цикле четкое распределение по классам крупности, так как питание проходит через последовательные зоны измельчения перед поступлением в сепаратор продукта. Режим идеального вытеснения исключает проскальзывание, а энергия эффективно направляется на более крупные частицы питания. Сепаратор продукта представляет собой центробежный сепаратор на конце вала мельницы, который вращается с достаточной скоростью, чтобы создавать усилие в 20 «г», в результате чего обеспечивается четкая классификация в мельнице.

обслуживания пульпового насоса. Монтаж внутреннего вращающегося вала выполнен консольным способом со стороны подачи питания, таким образом, болтовые соединения торцевого фланца разгрузки и камеры измельчения можно с легкостью развинтить и раздвинуть гидравлическими домкратами. Остановка на осмотр и замену внутренних изнашивающихся деталей занимает менее 8 часов. При эксплуатации IsaMill™ типовыми показателями коэффициента технической готовности является 99%, коэффициент использования составляет 96%.

Масштабирование IsaMill™ представляет собой простой процесс. При масштабировании с использованием лабораторной мельницы достигается точность в 100%. Для мельниц IsaMill™ масштабирование имеет соотношение 1:1, что способствует снижению рисков проекта

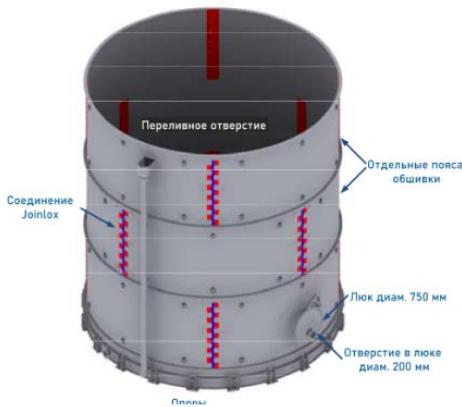
## ОКИСЛИТЕЛЬНОЕ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ

После тонкого измельчения сульфидного минерала он подвергается выщелачиванию в атмосферных условиях в цикле окислительного выщелачивания, состоящем из соединенных между собой реакторов выщелачивания Альбион. Реактор выщелачивания Альбион — это резервуар выщелачивания при атмосферном давлении, разработанный Xstrata Technology для получения высокого массового переноса кислорода, необходимого для окисления сульфидных минералов, при низких капитальных и эксплуатационных затратах [1].

Цикл окислительного выщелачивания в установке выщелачивания Процесс Альбион™ приближен к традиционной установке выщелачивания цианированием, при этом реакторы выщелачивания Альбион соединены последовательно через систему желобов, что обеспечивает движение пульпы самотеком через всю технологическую цепочку выщелачивания. Реакторы выщелачивания Альбион оснащены обводными желобами, для обеспечения возможности вывода реакторов из эксплуатации на периодическое обслуживание. Это низкозатратная система выщелачивания, которая характеризуется простотой и гибкостью в эксплуатации, при этом общая готовность технологической цепочки выщелачивания достигает 99%.

Кислород подается в основание реакторов выщелачивания Альбион с использованием системы сверхзвуковых эжекторных трубок HyperSparge. Разработка системы подачи газа HyperSparge выполняется в совокупности с проектированием системы перемешивания, чтобы обеспечить высокие показатели массового переноса кислорода в реакторе. Мощность перемешивающего устройства невелика, реактор спроектирован с возможностью завершения перемешивания за 1 минуту пребывания в резервуаре. Окружная скорость импеллера подбирается с учетом скорости подачи из системы HyperSparge, чтобы обеспечить оптимальный массовый перенос.

Корпус и нижняя часть реактора выщелачивания Альбион изготовлены из коррозионно-устойчивой легированной стали и установлены на кольцевое балочное или сплошное основание. Соотношение сторон подобрано так, чтобы оптимально сбалансировать высокую скорость массового переноса кислорода и эффективность захвата. Xstrata Technology разработали полностью модульную систему корпуса реактора, которая может быть собрана на месте в три раза быстрее емкостей, свариваемых на месте, при существенно более низкой стоимости. При монтаже реакторов по проекту Xstrata полностью устраняется потребность в сварочных работах. Схема модульного реактора выщелачивания Альбион показана на рисунке 3.



**Рисунок 3**  
Модульный реактор  
выщелачивания Albion

В реакторах используется центральное перемешивающее устройство с гидродинамическими импеллерами. Типоразмеры перемешивающего устройства и геометрия импеллера подбираются Xstrata Technology с использованием проектных соотношений и результатов испытаний таким образом, чтобы обеспечить достаточную мощность для соответствия требованиям массового переноса кислорода в реакторе выщелачивания, а также обеспечения достаточной степени взвешенности твердой фазы и дисперсии газа. При определении конструкции импеллера и интервалов также учитываются вопросы контроля пенообразования в резервуаре. Перемешивающее устройство устанавливается с корпуса резервуара, модульные площадки техобслуживания и опорные конструкции поставляются вместе с реактором выщелачивания Альбион. Ключевые аспекты проектирования перемешивающего устройства, такие как коэффициент заполнения, диаметр импеллера и окружная скорость, и общая скорость прокачки устанавливаются с учетом проектирования системы подачи кислорода для обеспечения оптимального массового переноса кислорода в реакторе.

Система подачи кислорода в реактор выщелачивания Альбион состоит из сверхзвуковых трубок подачи кислорода HyperSparge, которые устанавливаются по окружности реактора ближе к основанию. Система HyperSparge устанавливается снаружи резервуара и проходит через стенки резервуара с использованием герметичных соединений. Инновационная конструкция исключает простой системы подачи кислорода на техобслуживание, так как все узлы установки HyperSparge можно снимать для осмотра без остановки технологического процесса. Высокая эффективность газоулавливания, обеспечиваемая HyperSparge, приводит к низкому расходу газа в реакторе выщелачивания Альбион, таким образом поправка на передаваемую мощность перемешивающего устройства остается небольшой или полностью исключается. Показатели аэрации обычно составляют менее 0,025.

Система HyperSparge подает кислород на сверхзвуковой скорости, обычно в диапазоне 450 – 550 м·с<sup>-1</sup>. За счет сверхзвуковой скорости подачи образуется струя скатого газа, которая захватывает пульпу за счет сдвигового усилия, что обеспечивает крайне эффективный массовый перенос в реакторах выщелачивания Альбион. Уникальная конструкция HyperSparge означает, что для реакторов выщелачивания Альбион мощность перемешивающего устройства может быть намного меньше по сравнению с традиционными системами. На установках Альбион, эксплуатируемых на предприятиях группы Xstrata, при использовании системы HyperSparge достигается эффективность улавливания кислорода в 85% и выше. Типовая схема HyperSparge представлена на рисунке 4. Благодаря образованию высокоскоростной струи на наконечнике HyperSparge обеспечивается чистота сопла и исключается закупоривание.

Систему HyperSparge можно объединить с общей системой управления кислородом, состоящей из мониторинга отходящих газов в трубе и управления давлением подачи HyperSparge. Система управления кислородом используется для поддержания высокой эффективности улавливания кислорода в реакторе выщелачивания Альбион.

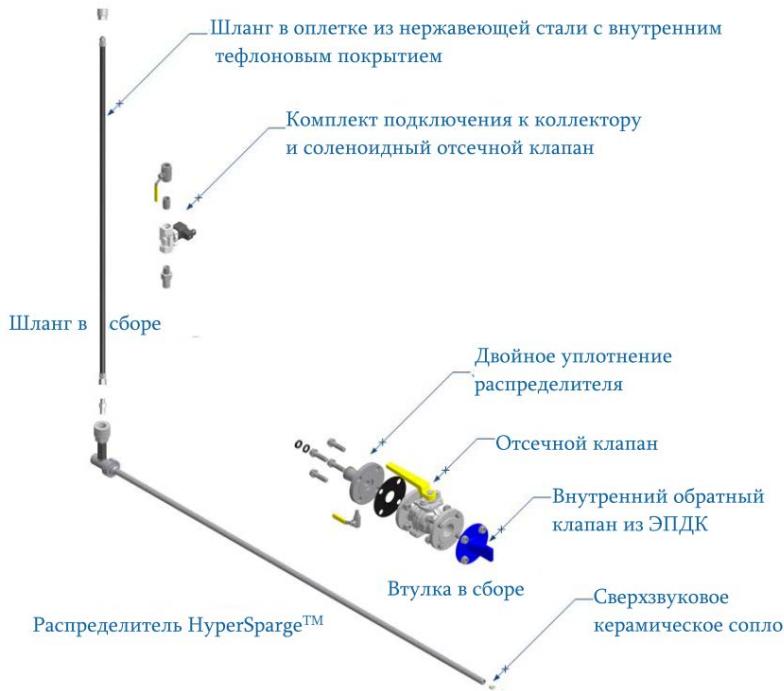


Рисунок 4 Система HyperSparge

допускается возможность установки конденсаторов для рекуперации испаренной воды.

Каждый реактор выщелачивания Альбион оснащен модульными внутренними перегородками, которые способствуют перемешиванию и предотвращают завихрение пульпы, а также модульной вертикальной трубой для предотвращения проскальзывания и облегчения транспортировки крупнозернистого материала через технологическую цепочку выщелачивания.

Реакторы выщелачивания Альбион соединены между собой через систему желобов для переноса пульпы между реакторами. Желоба спроектированы в соответствии с законами гидравлики и приспособлены для переноса пульпы и пены. Конструкция желоба Xstrata Technology предусматривает перемещение пены, что исключает скопление пены в процессе выщелачивания.

Реакторы выщелачивания Альбион не нуждаются во внутренних системах подогрева или охлаждения. Реактор эксплуатируется при равновесной температуре, которая, как правило, составляет 90–98°C, в зависимости от высотной отметки производственной площадки. Источником тепла является реакция окисления сульфидных минералов с отведением тепла из емкости увлажнением отходящих газов. Не требуется ни прямой, ни косвенной системы управления температурой, что упрощает конструкцию и обслуживание емкости. Не требуется устройство внешних градирен или испарительных емкостей.

Окислительное выщелачивание по технологии Процесс Альбион™ предусматривает три первичных контрольных параметра. Основным контрольным параметром выступает pH выщелачивания, который регулируется за счет подачи либо кислоты, либо известняка, для поддержания заданного значения pH. Уставка pH определяется в ходе испытаний и задается на основании требуемой степени окисления сульфидной серы в растворе выщелачивания. Для технологических процессов переработки упорных золотых руд требуется полное окисление сульфида в сульфат, pH поддерживается практически на нейтральном уровне за счет добавления известнякового шлама. Дозирование известняка осуществляется по кольцевому магистральному трубопроводу.

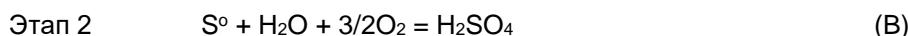
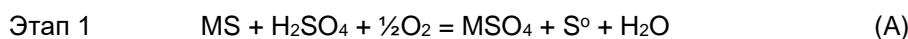
Плотность пульпы в реакторе поддерживается на оптимальном уровне для регулирования вязкости и массового переноса за счет добавления технологической воды. Кислород представляет собой третий контрольный параметр, который регулируется за счет добавления кислорода через систему HyperSparge на основании состава отходящих газов и расхода. Предусмотрен мониторинг температуры, однако в реакторе выщелачивания Альбион контроль температуры не требуется, выщелачивание протекает в автотермическом режиме.

Отверстия дозирования реагентов расположены в крышке реактора выщелачивания Альбион, при этом все дозирующие клапаны и контрольно-измерительные приборы расположены в легкодоступных местах на верхней площадке чана выщелачивания.

Отработанные газы процесса окислительного выщелачивания являются инертными, поэтому реактор выщелачивания Альбион оснащен секционными крышками и трубой для отвода пара из резервуара на безопасную высоту. Так как реакторы выщелачивания Альбион работают при температуре, приближенной к точке кипения пульпы, существенное количество водяного пара выводится из резервуара с отработанными газами, что способствует поддержанию общего водного баланса. Труба отработанных газов спроектирована в виде свободной вытяжной трубы для отвода отработанного газа на безопасную рабочую высоту. Отработанный газ обычно отводится, однако

## ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ОКИСЛИТЕЛЬНОМ ВЫЩЕЛАЧИВАНИИ УПОРНОЙ ЗОЛОТОЙ РУДЫ

В процессе окислительного выщелачивания Процесс Альбион™ происходит окисление сульфидных минералов до элементарной серы или до сульфата. В ходе процесса высвобождается значительное количество тепла, и реакция окислительного выщелачивания протекает при температуре, близкой к точке кипения пульпы. Типовая рабочая температура колеблется в диапазоне от 93 до 98°C. При такой рабочей температуре выщелачивание минералов в процессе Процесс Альбион™ протекает в два этапа. На первом этапе сульфидные минералы окисляются до растворимого сульфата и элементарной серы. На втором этапе элементарная сера окисляется и преобразуется в серную кислоту:



Реакции можно катализировать за счет действия трехвалентного железа в кислотных условиях.

Окислительное выщелачивание протекает при разных значениях pH, начиная от кислой среды и до нейтральной. Контрольное значение pH задает количество элементарной серы по реакции B. Степень окисления элементарной серы может варьироваться от практически нулевой до 100% за счет регулирования pH выщелачивания в диапазоне от 1 до 6.

Когда процесс окислительного выщелачивания протекает в кислотных условиях, при выщелачивании меди, цинка или никеля, окисление элементарной серы в некоторой степени является необходимым для производства кислоты для выщелачивания. В подобных системах фоновая кислотность поддерживается на уровне 5–15 г/л, кислотность раствора выщелачивания поддерживается либо за счет добавления рафината, либо за счет протекания реакции (B), окисление элементарной серы. В Процессе Альбион™ окисление элементарной серы протекает быстро при кислотности ниже 10 г/л и существенно замедляется по мере приближения кислотности к 15 г/л. Таким образом, кислотное выщелачивание Альбион является саморегулирующимся процессом, окисление элементарной серы протекает по мере необходимости для поддержания необходимой кислотности.

Кислотное выщелачивание состоит из двух стадий, где сначала ценный металл подвергается выщелачиванию в кислом кислородсодержащем растворе, затем кислотная пульпа выщелачивания нейтрализуется и осаждается в железо и другие вредные элементы, например, мышьяк. Далее производится извлечение ценных металлов из нейтрализованного раствора выщелачивания. Для извлечения металлов могут применяться традиционные технологии. Извлечение железа при помощи осаждения гетита является предпочтительным процессом нейтрализации для циклов кислотного выщелачивания Процесса Альбион™.

Нейтральное выщелачивание используется для окисления концентратов пирита и арсенопирита, а также концентратов с содержанием теллуридов и селенидов. Нейтральное выщелачивание протекает при pH в диапазоне 5–7 с постоянной подачей щелочи для нейтрализации кислоты и сульфатов железа, образованных при окислении сульфидных металлов. Вся элементарная сера преобразуется в сульфат, в итоге переходит в форму гипса в нейтральный раствор выщелачивания. Продукт нейтрального выщелачивания может применяться в качестве питания установки выщелачивания цианированием, без необходимости фильтрации, противоточной декантации или стадии нейтрализации, позволяя добиться существенной экономии капитальных затрат в сравнении с процессом кислотного окислительного выщелачивания.

При нейтральном pH общая реакция выщелачивания пирита выглядит следующим образом:



Железистый осадок, гетит, обладает высокой стабильностью и не растворяется в цианиде. Осадки, образованные в ходе окислительного выщелачивания в Процессе Альбион™, не образуют ферроцианиды или феррицианиды при выщелачивании цианированием, что упрощает разрушение цианида.

Арсенопирит является распространенным носителем золота во многих упорных золотых концентратах. В зависимости от количества арсенопирита, присутствующего в концентрате, арсенопирит окисляется при нейтральных условиях выщелачивания, с образованием стабильного продукта, арсената железа.

Общая реакция выщелачивания арсенопирита представлена ниже:



Некоторые упорные золотые концентраты могут содержать ряд фаз с содержанием теллурида, таких как  $\text{AgAuTe}$ ,  $\text{AgTe}$ ,  $\text{PbTe}$ ,  $\text{Pb(Bi)Te}$ ,  $\text{PbAu(Sb)Te}$ . Все эти теллуридовые фазы имеют высокое содержание золота и серебра. Выщелачивание теллуридов в окислительном процессе усиливается за счет ультратонкого измельчения, а скорость реакции увеличивается в щелочных условиях. Теллуриды быстро разлагаются при повышенном уровне pH, при этом теллурид окисляется до  $\text{HTeO}_3^+$  и  $\text{Au}^+$ . Золото и теллур осаждаются в виде оксидов.

Разложение теллурида протекает быстро в нейтральных условиях выщелачивания, в соответствии со следующей реакцией:



В условиях нейтрального выщелачивания не образуется элементарная сера, а окисленный осадок не требует большого количества цианида, так как исключается образование тиоцианата. При высокой степени окисления конечный окисленный осадок может быть инертным, без остаточных кислотообразующих компонентов. Благодаря нейтральной среде исключается образование ярозита, что способствует повышению извлечения серебра из окисленного остатка.

Нейтральные рабочие показатели pH при окислительном выщелачивании также способствуют низкой минерализации в растворах выщелачивания. За счет этого повышается растворимость кислорода и существенно снижается образование настыли в процессе Альбион, что упрощает эксплуатацию. Образование гипсовых отложений является основной проблемой циклов нейтрализации, где исходные резервуары функционируют в кислотных условиях. При рабочем уровне pH 5–6, устойчивость иона  $\text{HCO}_3^-$  в растворе является очень низкой относительно кислотных циклов нейтрализации. При нейтрализации кислоты известняк вступает в следующую реакцию:



Кальций осаждает высвобожденный сульфат с образованием гипса. Высокая активность бикарбоната, которая наблюдается при более кислотных условиях, способствует снижению растворимости кальция и перенасыщению системы гипсом. Активность бикарбоната обратно пропорциональна уровню кислотности, таким образом, чем выше pH, тем ниже активность бикарбоната, следовательно, ниже воздействие на растворимость гипса. В идеальных условиях рабочий уровень pH для окислительного выщелачивания следует поддерживать на максимально высоком уровне в зависимости от качества известняка, для минимизации отложений, однако в таком случае ограничивающим фактором становится расход известняка. По этой причине для цикла окислительного выщелачивания используется контрольная уставка pH в диапазоне 5,5–6,5.

## ИСТОРИЯ РАЗРАБОТКИ

Путь от концептуальной разработки до промышленного внедрения Процесса Альбион™ был длинным и тернистым, что свойственно любой новой технологии. Технология Процесс Альбион™ была разработана в 1994 году компанией MIM Holdings (MIM) и запатентована по всему миру [2]. Идея создания процесса Процесс Альбион™ возникла после успешного внедрения первой мельницы IsaMill™ M3000 на руднике Маунт Айза в 1994 году. Технология IsaMill™ была разработана для эффективного измельчения до крупности 80% класса 5–7 микрон для последующего цикла флотации для комплексных свинцово-цинковых месторождений компании Xstrata - МакАртур Ривер и Джордж Фишер.

На тот момент MIM изучали варианты отработки крупного проекта Фрида Ривер/Нена в Папуа-Новой Гвинее через свое подразделение, Highlands Pacific. Руды месторождения Нена не подходили для пирометаллургии по причине высокого содержания мышьяка, рассматривалось несколько вариантов гидрометаллургической переработки. Изначально придерживались варианта автоклавного окисления, так как у MIM имелся опыт работы с данной технологией в своем подразделении в Портгере, Папуа-Новая Гвинея. Проведенные ТЭО показали, что стоимость автоклавного окисления была недоступно высокой, поэтому стали рассматривать более низкозатратные варианты. MIM обладали опытом в атмосферном выщелачивании, которое применялось на совместном предприятии по переработке цинка в Германии,

атмосферное выщелачивание рассматривалось как низкозатратный вариант, достаточно надежный и простой в эксплуатации.

В начале 1994 года проведены первые испытания по изучению сочетания тонкого измельчения и кислородного атмосферного выщелачивания, получены хорошие результаты с извлечением меди свыше 98% из халькопирита, ковеллита и энаргита. Технико-экономические обоснования были выполнены фирмой Davy John Brown в конце 1994 года, экономические показатели процесса выгодно отличались от автоклавного окисления. В 1995 году были поданы первые патентные заявки.

Компания MIM решила отказаться от своей доли в Highlands Pacific в 1996–1997 годах и продала свою часть в совместном предприятии Фрида Ривер. MIM приняли стратегическое решение разрабатывать технологию Процесс Альбион™ в направлении переработки упорного золота. Компания нацелилась на крупный проект Пуэбло Вьехо в Доминиканской Республике. MIM Holdings проводили оценку проекта Пуэбло Вьехо в период с 1997 по 2002 годы, за это время они построили демонстрационную установку Процесс Альбион™ производительностью 1 т/сутки в Брисбене, которая находилась в режиме непрерывного производства на протяжении 18 месяцев. В результате была разработана новая версия Процесса Альбион™, которая предполагала окисление пирита при практически нейтральном рН. Патенты на новый процесс были поданы в 1999 году.

MIM Holdings подали тендерную заявку на участие в проекте Пуэбло Вьехо в 2001 году, однако безуспешно; проект получила компания Placer Pacific, позднее переименованная в Barrick GoldCorp, которая и ныне занимается отработкой проекта.

После неудачного тендера по проекту Пуэбло Вьехо, MIM сменили направление разработки Процесса Альбион™ на цинковые руды и начали разрабатывать проект для крупного рудника МакАртур Ривер на Северной Территории. На руднике МакАртур Ривер добывают бедный цинковый концентрат с повышенным содержанием свинца, меди и железа. Месторождение носит сложный характер, свинец и железо встречаются в виде тонких вкраплений, размером менее 3 микрон, в решетке сфалерита. Технология IsaMill™ сыграла важную роль в разработке рудника МакАртур Ривер компанией MIM Holdings, однако закрытие шахтных печей по технологии Imperial Smelting в конце 90-х зародили опасения по поводу использования концентрата в долгосрочной перспективе.

MIM начали проводить опытно-промышленные испытания цикла Процесс Альбион™ для производства цинка в виде катодов из концентрата рудника МакАртур Ривер в 2001 году. Разработанная технологическая схема предполагала выщелачивание цинка в процессе Альбион и производство катодов с использованием традиционного цикла очистки/электровиннинга, при этом свинец и серебро переходили в осадок с возможностью отправки на плавильный завод для извлечения свинца. Xstrata продолжила разработку проекта после поглощения MIM Holdings в 2003 году, в результате были построены две установки Процесс Альбион™: на цинковом производстве и в Германии. Эти установки рассматриваются в следующем разделе данного документа.

За период с 1994 по 2004 год, технология Процесс Альбион™ рассматривалась как стратегический актив MIM/Xstrata и не предлагалась на внешнем рынке. В 2005 году компания Xstrata приняла решение предлагать проектное решение внешним заказчикам на условиях лицензионного пользования. Xstrata назначила агента, компанию Core Resources, для продвижения своей технологии по всему миру. Технология вызвала большой интерес, и первые лицензии были выданы в 2005 году для проекта Лас Лагунас, в 2006 году для проекта Чертеж. Промышленное внедрение технологии началось в 2010 году, когда была запущена установка Процесс Альбион™ компании Xstrata в Испании (4 000 тонн в год цинка металлического), впоследствии в 2011 году компания Xstrata запустила вторую установку в Германии (16 000 тонн в год цинка металлического).

Золотодобывающий проект Лас Лагунас будет запущен в 2012 году, проект по переработке упорных золотых руд компании ГПМ будет запущен в 2013 году. Внедрение пятой установки Процесс Альбион™ для проекта на руднике Чертеж в Румынии находится на конечном этапе оформления разрешительной документации. Краткая информация по этим проектам будет предоставлена ниже.

## ЦИНКОВЫЕ ПРОЕКТЫ XSTRATA – САН ХУАН ДЕ НИЕВА И НОРДЕНХАМ

Установка Процесс Альбион™ была возведена на заводе по рафинированию цинка Сан Хуан де Ниева в июле 2010 года. Сан Хуан де Ниева является крупнейшим цинковым заводом в мире, годовая производительность превышает 450 000 тонн цинка. Завод принадлежит компании Xstrata, питание установки Процесс Альбион™ преимущественно составляет тонкоизмельченный свинцововый/цинковый концентрат с рудника МакАртур Ривер на Северной Территории. Уникальность циклов Процесс Альбион, которые применяются Xstrata Zinc, заключается в том, что процессы тонкого измельчения и окислительного выщелачивания выполняются на разных предприятиях, а тонкоизмельченный концентрат доставляется морским транспортом.



Рисунок 5  
Реактор выщелачивания Albion на заводе Сан Хуан де Ниева

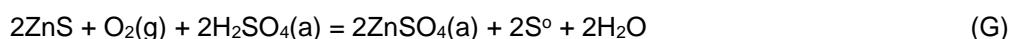
окислительного выщелачивания состоит из реакторов выщелачивания Альбион вместимостью 280 м<sup>3</sup>, высота реактора составляет 9,5 м, диаметр - 6 м.

Один из реакторов выщелачивания Альбион с указанием мест установки трубок HyperSparge показан на рисунке 5.

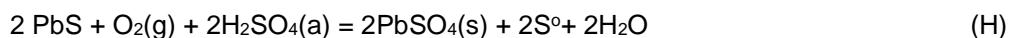
Пульпа концентрата и отработанный электролит подаются в реакторы выщелачивания Альбион вместе с остаточной пульпой из цикла нейтрального выщелачивания, при этом ферритовые осадки из нейтрального выщелачивания подаются в цикл выщелачивания Альбион для окисления. В результате цикл выщелачивания Процесс Альбион™ выступает в роли традиционного выщелачивания в горячей кислоте для извлечения цинка из ферритовых осадков.

Кислород подается в основание реактора выщелачивания Альбион по восьми (8) сверхзвуковым эжекторным трубкам HyperSparge, происходит перемешивание пульпы с использованием перемешивающего устройства с двойным гидродинамическим импеллером, установленным в центральной части. Время пребывания в цикле окислительного выщелачивания составляет примерно 28 часов.

Сфалерит является основным цинксодержащим минералом в концентрате с рудника МакАртур Ривер, он окисляется с получением растворимого сульфата цинка и элементарной серы. При протекании реакции происходит потребление кислоты и кислорода:

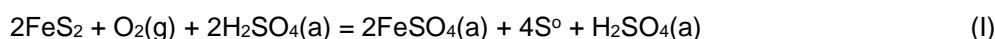


Свинец присутствует в концентрате в виде галенита и окисляется практически полностью в сульфат свинца, который остается в осадке выщелачивания:



На ранних стадиях выщелачивания образуется некоторое количество плumbоярозита, однако он преобразуется в сульфат свинца по мере протекания выщелачивания.

На руднике МакАртур Ривер получают относительно бедный цинковый концентрат с повышенным содержанием железа в виде пириита. При уровнях кислотности, характерных для окислительного выщелачивания, выщелачивание пириита протекает медленно, а значимые показатели окисления достигаются только после окисления более 90% сфалерита, по причине гальванического воздействия. Реакция выщелачивания пирита в кислотных условиях в окислительном выщелачивании представлена ниже:



Элементарная сера медленно вступает в реакцию при концентрации кислоты в растворе выщелачивания равной 40–160 г/л, типовым показателем является менее 5% окисления:



Цикл окислительного выщелачивания также используется для извлечения цинка из ферритовых фаз, которые не подвергаются выщелачиванию в существующем цикле выщелачивания цинкового огарка. Высокая рабочая температура в цикле выщелачивания приводит к быстрому разложению ферритов, по реакции:



Окисленная пульпа с установки окислительного выщелачивания перерабатывается с получением элементарной серы и свинца в виде отдельных продуктов. Сначала пульпа направляется на сгущение, пески сгустителя направляют в серии флотомашин емкостью 10 м<sup>3</sup> с извлечением элементарной серы <sup>3</sup>. Флотационный концентрат с содержанием до 70% вес. элементарной серы проходит фильтрацию в рамном фильтр-прессе, затем фильтрат возвращается в цикл сгущения. Сернистый концентрат передается на обжиговую установку и обжигается с получением серной кислоты.

Хвосты цикла флотации проходят фильтрацию в горизонтальном ленточном фильтре, осадок с высоким содержанием свинца реализуется предприятиям вторичной переработки свинца. Фильтрат и промывочная жидкость с горизонтального ленточного фильтра возвращаются в цикл сгущения. Верхний продукт сгустителя подается в существующий цикл осаждения яросита для удаления железа, после чего выполняется осаждение цинковой пыли и материал подается в электролизный цех.



Рисунок 6  
Реактор выщелачивания Albion в  
Норденхаме

Фотография установки окислительного выщелачивания Прессесс Альбион™ на заводе в Норденхаме представлена на рисунке 6.

Осадок выщелачивания с установки окислительного выщелачивания Прессесс Альбион™ на заводе в Норденхаме также реализуется вторичным производителем свинца на местном рынке.

Сводные ключевые эксплуатационные характеристики двух установок Прессесс Альбион™ на цинковых заводах Xstrata показаны в таблице 1.

Таблица 1

Сводные данные по установкам Прессесс Альбион™ на цинковых заводах Xstrata

Параметр	Сан Хуан де Ниева	Норденхам
----------	-------------------	-----------

Скорость загрузки, тонн в час		
Концентрат рудника МакАртур	1	4
Осадок нейтрального выщелачивания	0,25	1
Состав концентрата		
Цинк - %	47,2%	47,2%
Свинец - %	8,17%	8,17%
Железо - %	5,4%	5,4%
SiO <sub>2</sub> - %	4,3%	4,3%
Медь - %	0,8%	0,8%
Сера - %	47,2%	47,2%
Объем резервуара - м <sup>3</sup>	280	800, 280
Извлечение при выщелачивании - % вес.	98,6	98,8
Преобразование в элементарную серу	<5	<5
Расход кислоты выщелачивания - кг/тонну	488	470
Расход кислорода выщелачивания - кг/тонну	209	214
Состав осадка		
Сера - %	43	42
Цинк - %	1,3	0,8
Свинец - %	15,5	16,2
Железо - %	8,4	8,1
SiO <sup>2</sup> - %	7,5	7,1
Медь - %	0,20	0,20

## PANTERRA GOLD – ЛАС ЛАГУНАС

Проект Лас Лагунас - проект по добыче золота и серебра из упорной руды, принадлежит компании Panterra Gold Limited. Проект предполагает переработку пиритных хвостов процесса CIL с высоким содержанием золота/серебра с рудника Розарио в Доминиканской Республике. Проект находится в 15 км к западу от столицы провинции Коту, приблизительно в 100 км к северо-западу от столицы страны, Санто-Доминго. Горный отвод примыкает к золотому руднику Пуэбло Вьехо компании Barrick Gold Corp.

Хвостохранилище было построено в 1991 году и было заполнено сульфидными хвостами с карьеров рудника Розарио в период с 1992 по 1999 годы. Рудник Розарио отрабатывался компанией Rosario Dominicana S.A, горнодобывающей корпорацией, принадлежавшей и управляемой правительством Доминиканы. Запасы окисленных руд на руднике были сработаны в конце восьмидесятых, питание установки содержит все возрастающие количества сульфидов, преимущественно в виде пирита, с небольшой долей энаргита. Вмещающая порода преимущественно состоит из литоидного туфа с небольшим количеством углекислого сланца.

Производство на руднике Розарио было законсервировано в 1999 году по причине повышения упорности руды. На момент закрытия рудника, извлечение золота и серебра на установке сорбционного выщелачивания (CIL) упало до уровня ниже 30%, неизвлечено золото остается в виде микроскопических включений в пирит. Переработка все более упорных руд в начале девяностых привела к образованию большого количества хвостов с содержанием золота +3,5 г/тонну, которые размещены в хвостохранилище Лас Лагунас.

Подразделение компании PanTerra Gold, EnviroGold (Las Lagunas) Limited, выиграло международный тендер и подписало контракт с правительством Доминиканской Республики в 2004 году, с получением права повторной переработки хвостов на условиях соглашения о долевом участии в прибыли с правительством. Выявленные ресурсы проекта по стандарту JORC составили 5,137 млн тонн руды с содержанием 3,8 г/т золота и 38,6 г/т серебра.

Годовая производительность проекта составит 65 000 унций в год золота и 600 000 унций серебра в год. Проект предполагает получение существенной прибыли от серебра, для проекта был выбран цикл нейтрального окислительного выщелачивания Процесс Альбион™ по причине высокого извлечения золота и серебра из окисленного осадка. Технологическая схема была разработана компанией Xstrata Technology, испытания проводились на исследовательской базе в Брисбене в 2004–2006 годах.

Строительство проекта было завершено в первом квартале 2012 года, проект на данный момент находится на стадии пуско-наладочных работ. Капитальные затраты по проекту составляют

приблизительно 82,7 млн долларов США, эксплуатационные расходы прогнозируются на уровне 30,68 долларов США/тонну, итоговая себестоимость единицы продукции составляет 307 долларов США на унцию золотого эквивалента.

Технологическая схема предусматривает использование электрической драги для извлечения 100 тонн/час хвостов из хранилища. Хвостохранилище также используется для повторного размещения переработанных хвостов и отрабатывается ячейками. Пульпа, поднятая драгой, направляется на хранение в резервуар объемом 223 м<sup>3</sup>, после чего перекачивается на шаровую мельницу мощностью 700 кВт для зачистки поверхности минералов перед флотацией. Пульпа перерабатывается в серии флотомашин с получением сульфидного концентрата с содержанием в среднем 14 г/т золота и 125 г/т серебра, при 16% вес. сульфидной серы. В схеме одна стадия коллективной основной флотации из пяти флотационных машин объемом по 40 м<sup>3</sup>.



Рисунок 7  
Установка измельчения IsaMill,  
Лас Лагунас

Флотационный концентрат производится со скоростью 28 т/час, затем проходит сгущение в высокоскоростном сгустителе перед подачей на установку Процесс Альбион™. Установка Процесс Альбион™ состоит из мельницы IsaMill™ M3000 с установленной мощностью 1,5 МВт и пяти реакторов выщелачивания Альбион из нержавеющей стали объемом 600 м<sup>3</sup>. Каждый из реакторов выщелачивания Альбион оснащен 12 сверхзвуковыми эжекторными трубами HyperSparge, рабочий уровень pH составляет 5,5 при постоянной подаче известнякового шлама. Известняк подается в каждый из реакторов выщелачивания Альбион из центральной кольцевой магистрали. Известняк для цикла Процесс Альбион™ добывается из известнякового карьера.

Технологическая установка Альбион работает при практически нейтральном pH, пирит окисляется до гетита, а весь сульфид переходит в гипс. Извлечение золота из окисленного осадка превышает 90%, и поскольку не происходит образование ярозита в цикле выщелачивания, извлечение серебра также превышает 90%. Выщелачивание протекает в автотермических условиях при 98°C, отработанный газ отводится из реакторов через трубы.



Рисунок 8  
Установка окислительного  
выщелачивания, Лас Лагунас

Установка окислительного выщелачивания имеет размеры, рассчитанные на окисление 80–85 тонн в сутки сульфида в сульфат. Кислород подается на установку Процесс Альбион™ из кислородной установки вакуумной короткоциклической адсорбции производительностью 220 тонн в сутки, которая находится в собственности и под управлением Panterra Gold. Фотография установки измельчения IsaMill M3000 для проекта Лас Лагунас показана на рисунке 7. Фотография реакторов выщелачивания Альбион, с показанным корпусом реактора, точками монтажа сопел HyperSparge и трубами отвода отходящих газов, показана на рисунке 8.

Окисленный осадок из установки Процесс Альбион™ сгущается примерно до 45% вес., пески сгустителя охлаждаются в градирне пульпы с 80°C до 45°C, после чего подается в процесс выщелачивания цианированием.

Цикл CIL состоит из одного резервуара нейтрализации объемом 496 м<sup>3</sup>, 6 резервуаров сорбционного выщелачивания (CIL) по 441 м<sup>3</sup> каждый и цикла элюирования AARL. Хвосты цикла CIL возвращаются в хранилище.

## ПРОЕКТ ГПМГПМ ГОЛД

Проект ГПМГПМ ГОЛД принадлежит компании ГеоПроМайнинг ООО (ГПМГПМ) и находится в Армении. В составе проекта открытый карьер в поселке Зод недалеко от границы с Азербайджаном, а обогатительная фабрика находится у Араката, неподалеку от границы с Турцией. Золотосодержащая руда, добываемая на руднике Зод, перевозится на Ааратскую ЗИФ

по государственной железной дороге.

Металлургическое предприятие в Аарате изначально было построено советским правительством в 1973 году и выполняло роль центрального обогатительного производства для переработки пиритных золотых руд, при этом флотационные концентраты отправлялись в Россию для извлечения золота. Проект был приобретен компанией First Dynasty Mines в начале 1990-х, была построена установка CIL, в 1997 она была запущена для извлечения золота из хвостов обогащения. Все технологическое оборудование все еще функционирует на Ааратской ЗИФ, в рамках проекта будет проведена его реконструкция. В течение короткого периода времени в начале 2000-х проект принадлежал компании Sterlite Gold, впоследствии был приобретен ГПМ в конце 2007 г. Компания ГПМ перерабатывала низкосульфидные руды и габбро с рудника Зод в промежуточный период.

Месторождение Зод изначально состояло из легко обогащаемых выветрелых окисленных руд, перекрывающих сульфидные руды. В ходе горнодобывающих работ запасы окисленных руд были истощены, теперь на Ааратской ЗИФ перерабатывается сульфидная руда с сокращающимся содержанием золота. Для повышения извлечения золота из сульфидных руд, ГПМ планирует установить технологическую установку Процесс Альбион™ на Ааратской ЗИФ.

В оставшейся части месторождения среднее содержание серы составляет 1,4% вес., со средним содержанием золота 4,54 г/т и содержанием серебра 4,65 г/т. В оставшейся части промышленных запасов, менее 30% золота относится к легко обогащаемому типу, остальное золото заключено в сульфиды и теллуриды. В сульфидной фазе золото преимущественно связывается с арсенопиритом и в меньшей степени с пиритом. Содержание мышьяка в месторождении составляет 0,3% вес.

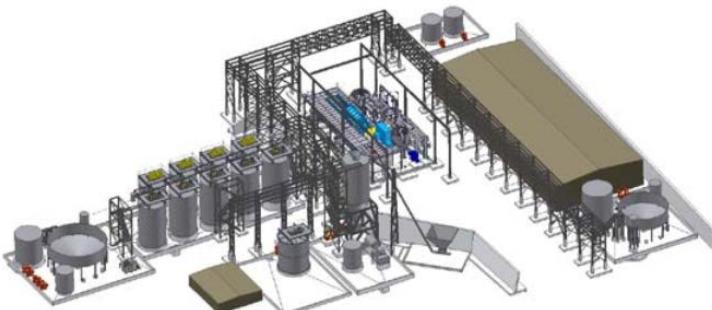


Рисунок 9  
Установка Albion Process™ на  
заводе GPM Gold

Измельчение карьерной руды осуществляется на параллельных технологических линиях измельчения, которые состоят из одной мельницы самоизмельчения и двух шаровых мельниц. Измельченная пульпа затем перерабатывается в цикле флотации для получения сульфидного концентрата. Цикл флотации состоит из коллективной основной/контрольной флотации с последующей перечисткой. Концентрат перечистной

флотации подается в установку Процесс Альбион™ для окисления перед циклом CIL.

Хвосты измельчения также подаются на установку CIL и смешиваются с окисленным осадком перед переработкой. На проекте уже имеется цикл измельчения, который был установлен в 1976 году, в рамках проекта будет проведена его модернизация. На площадке имеются некоторые компоненты цикла флотации, которые также будут реконструированы в рамках реализации проекта. Xstrata Technology предоставляет услуги детального проектирования для реконструкции цикла флотации. В рамках проекта будет проведена частичная модернизация цикла CIL.

Средняя производительность установки Процесс Альбион™ составит 94 007 тонн в год концентрата перечистной флотации, применяя расчетный коэффициент 15% к номинальной производительности, получаем проектную производительность в 108 108 тонн в год. Концентрат перечистной флотации имеет содержание 20% вес. железа, 18–20% вес. сульфида и 2,5 – 3,5% вес. мышьяка. Содержание в концентрате составит примерно 40 г/т золота и 35 г/т серебра. Изометрическое представление установки Альбион для золотодобывающего проекта ГПМ показано на рисунке 9.

Предусматривается измельчение концентрата перечистной флотации до крупности 80% класса 11,1 мкм в мельнице IsaMill™ M3000 с установленной мощностью 1 120 кВт. Измельченный концентрат подается в цикл окислительного выщелачивания. Объем цикла выщелачивания рассчитывается исходя из тридцати (30) часов времени пребывания пульпы в цикле выщелачивания, который состоит из девяти реакторов выщелачивания Альбион объемом по 225 м<sup>3</sup> каждый.

Реакторы выщелачивания Альбион изготовлены из сплава LDX 2101, перемешивание

выполняется устройством, оснащенным двойным гидродинамическим импеллером, установленным в центральной части. Конструкция импеллера разрабатывается с целью обеспечения необходимой концентрации газа и скорости прокачки раствора, чтобы добиться оптимального протекания реакции в резервуаре. Реакторы выщелачивания Альбион будут идентичными, Xstrata Technology использует модульную систему ZipaTank™. Оборудование ZipaTank™ будет поставлено на площадку модульными секциями для последующей сборки. Квалифицированных мастеров в Армении не очень много, поэтому на заводе будет широко применяться модульное исполнение.

Подача кислорода в реактор выщелачивания осуществляется через девять (9) распределителей кислорода HyperSparge™ с кислородных установок вакуумной короткоцикловой абсорбции производительностью 60 тонн в сутки. Уровень pH в каждом реакторе выщелачивания Альбион поддерживается за счет подачи известнякового шлама в реактор. Известняк подается в реакторы выщелачивания Альбион из центральной кольцевой магистрали. Для проекта предусмотрена линия измельчения и распределения известняка производительностью 6 тонн в час, где известняк крупностью -20 мм измельчается до крупности 80% класса 75 микрон для дозирования в процесс окислительного выщелачивания. Крупнозернистый известняк поступает с цементного завода в 3 км к востоку от фабрики.

Пульпа из цикла окислительного выщелачивания Процесс Альбион™ самотеком по желобу попадает в отдельно стоящий сгуститель диаметром 10 м, сгущенная пульпа с содержанием твердой фазы 41% вес. подается на установку сорбционного выщелачивания (CIL) и смешивается с хвостами цикла измельчения. Извлечение золота из окисленного осадка составит 93 – 96% вес., извлечение серебра - 90–93% вес.

Xstrata Technology выполняет полный объем проектирования и поставки оборудования Процесс Альбион™ для проекта ГПМГПМ ГОЛД на условиях фиксированной цены. В объем работ также входит цикл измельчения и распределения известняка, а также кислородная установка. На площадке приступили к строительно-монтажным работам, начало пуско-наладочных работ запланировано на март 2013 года.

## ПРОЕКТ ЧЕРТЕЖ, РУМЫНИЯ

Проект Чертеж находится в Западной Румынии в районе «золотого четырехугольника» в горах Апусени, Трансильвания. Проект находится на расстоянии 12 км от города Дева, рядом с городом Чертеж. Компании European Goldfields принадлежит 80% проекта, через их подразделение Deva Gold S.A. На территории проекта действует открытый карьер, который находился под управлением государственной горнодобывающей компании Minvest до 2006 года. Руда с рудника перерабатывается на производстве измельчения и флотации в Чертеже. Компания Deva Gold обладает действующим разрешением на отработку рудника.

Месторождение Чертеж представляет собой эпимеральное месторождение со степенью сульфидации от низкой до средней. Основными сульфидными минералами являются пириты с небольшим содержанием арсенопирита. В руде присутствуют сульфиды меди и цинка, которые переходят во флотационный концентрат. Золото встречается преимущественно в виде микроскопических включений в решетке пирита и арсенопирита.

Проект предполагает открытый метод добычи производительностью 3 млн тонн руды в год в течение одиннадцати с половиной лет. Планируется производство 160 000 унций золота и 820 000 унций серебра в год в форме сплава доре, что эквивалентно общему значению извлечения в 81% для золота и 75% для серебра.

Технологическая схема состоит из цикла измельчения и флотационной установки для извлечения сульфидных минералов в концентрат, который подается в установку Процесс Альбион™. Цикл измельчения состоит из дробилки, мельниц ПСИ и шаровых мельниц, которые измельчают до крупности 80% класса 106 микрон. Измельченная руда направляется в цикл основной/перечистной флотации с получением 28 тонн в час пиритного концентрата. Содержание в концентрате составит 35% вес. железа, 43% вес. сульфидов и 0,5%вес. мышьяка. Содержание в концентрате золота составит 15–18 г/т и серебра - 90 г/т.

Установка Процесс Альбион состоит из мельницы IsaMill™ M10000 с установленной мощностью 3000 кВт и пяти реакторов выщелачивания Альбион объемом 1500 м<sup>3</sup>. На выходе из мельницы IsaMill™ M10000 получают измельченный продукт крупностью 80% класса 11,5 микрон. Типоразмер установки Альбион подбирается с учетом окисления 180 тонн сульфида в сульфат в сутки.

В качестве питания установки служит упорный пиритный концентрат, установка Процесс

Альбион™ работает практически при нейтральном уровне рН, который поддерживается за счет добавления известнякового шлама в реакторы через центральную кольцевую магистраль. Известняк добывается в местных карьерах. Для подачи кислорода в цикл Процесс Альбион™ используется криогенная кислородная установка производительностью 520 тонн в сутки, которая находится под управлением компании European Goldfields, степень чистоты кислорода 95% объем.

Окисленный осадок из установки Процесс Альбион™ проходит сгущение, нижний продукт сгустителя охлаждается в открытой градирне пульпы. Затем охлажденный нижний продукт подается в традиционную установку выщелачивания цианированием, в которой используется цикл разрушения цианида INCO для извлечения ценных металлов. Степень извлечения золота из окисленного осадка после Процесса Альбион™ составит 93% вес.

Целевой показатель окисления пиритов в Процессе Альбион™ установлен на уровне 70–75%, при этом в отношении окисления медных и цинковых сульфидов ожидается окисление менее 5% при нейтральном уровне рН. Расход кислорода составит 270 кг/тонну перечистного концентрата с расходом известняка 450 кг/тонну.

Базовое техническое проектирование для проекта Чертеж было выполнено в 2008 году, проект сейчас находится на стадии получения разрешительной документации. Начало детального проектирования проекта запланировано на 2012 год.

# ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СЛОЖНОСТИ ПРОМЫШЛЕННОГО ВНЕДРЕНИЯ

## МЕЛЬНИЦА ISAMIL™

Технология IsaMill™ была разработана в рамках совместного проекта между MIM Holdings и Netzsch GmbH, Германия, в начале 1990-х. Первая промышленная мельница была установлена на руднике Маунт Айза в 1994 году. Технология IsaMill™ представляет собой революционный подход к измельчению, который позволил расширить диапазон экономически целесообразного измельчения до крупности 80% класса 5–7 микрон. При разработке технологии IsaMill™ компании столкнулись с рядом технических сложностей.

В числе первых технических сложностей при проектировании IsaMill™ инженеры столкнулись с проблемой передачи энергии для измельчения до тонкой фракции. Для получения материала крупности 80% класса 5–7 микрон, который изначально закладывался для мельниц IsaMill™, требовался размер мелющей среды 2–5 мм, а традиционные вращающиеся мельницы начинают центрифугировать шаровую загрузку при крупности среды менее 30–35 мм.

Мельницы с перемешиванием изначально разрабатывались для исключения центрифугирования мелющей среды, одним из ранних представителей подобных мельниц служат башенные мельницы и мельницы Metprotech. Данные мельницы расширили диапазон размеров мелющей среды до 10–12 мм, однако ни одна мельница не могла обеспечить перемешивание слоя мелющей среды при мелких размерах без существенного увеличения шаровой загрузки или центрифугирования.

Для решения проблем, связанных с увеличением объема мелющей среды и центрифугированием для мельницы IsaMill™ было разработано перемешивающее устройство, которое состояло из нескольких плоских дисков, присоединенных под прямым углом к центральному валу. Данную систему перемешивания можно рассматривать как рабочее колесо без нагнетания, вся энергия передается среде за счет сдвигового усилия, а не за счет создания потока. Вал устанавливается горизонтально в слое мелющей среды, в цилиндрическом корпусе. В дисках предусмотрены отверстия ближе к средней линии диска для обеспечения циркуляции пульпы вокруг диска. Благодаря отверстиям между дисками создается локальное завихрение пульпы. Сочетание 7–8 потоков пульпы в типовой мельнице IsaMill™ приводит практически к идеальному вытеснению по всей мельнице. Благодаряенным характеристикам, IsaMill™ может работать в открытом цикле без циклонов.

Благодаря горизонтальному расположению, выбранному проектировщиками IsaMill™, также получилось решить проблему с высоким крутящим моментом раскрепления, которая была свойственна башенным мельницам и мельницам Metprotech. Крутящий момент раскрепления создается из-за массы среды, которая вертикально распределяется на нижние рабочие колеса на валу. Горизонтальное расположение мельницы и использование дисковых перемешивающих устройств позволили практически исключить крутящий момент раскрепления при запуске мельницы.

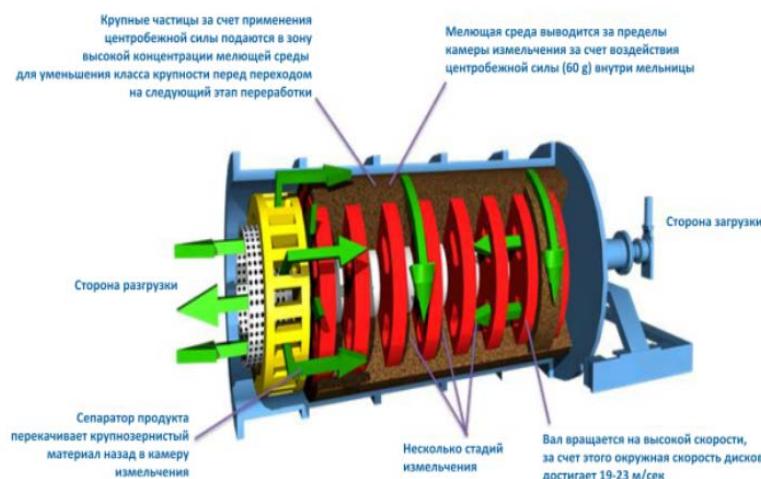


Рисунок 10  
Рабочий механизм IsaMill™

Горизонтальное расположение вала мельницы создало несколько инженерных сложностей, вал мельницы был спроектирован в виде консольно-подвешенного элемента, без подшипника на конце вала, а вес вала поддерживался одним подшипниковым узлом. Вал погружается в пульпу, поэтому требуется обеспечить его герметизацию. Рассматривалось несколько вариантов герметизации, и проектировщики мельницы остановились на сальниковом уплотнении, по аналогии с центробежным пульповым насосом.

Удержание мелющей среды в мельнице IsaMill™ также представляло технические сложности. При ранних разработках проводились испытания с решетками, устанавливаемыми внутри мельницы для удержания мелющей среды и обеспечения потока пульпы, однако они имели склонность к забиванию. В итоге было найдено элегантное решение за счет изменения геометрии и типа последнего диска на конце вала IsaMill™.

Вал устанавливался на выталкиватель на конце вала, расстояние между последним диском и выталкивателем было уменьшено для обеспечения центробежного движения слоя мелющей среды между выталкивателем и последним диском.

Данная конструкция получила название сепаратор продукта. Сепаратор продукта является очень эффективным устройством классификации, который создает усилие до 20 «g», и позволяет получить четкий размер отсечения, благодаря чему среда удерживается в мельнице, что позволяет пульпе с легкостью вытекать из мельницы. Перепад давления в IsaMill™ обычно не выше 200 кПа. Принцип работы сепаратора продукта показан на рисунке 10

Разработка IsaMill™ еще не завершена, компания Xstrata Technology продолжает усовершенствовать различные аспекты конструкции мельницы. В настоящее время выполняется большая работа по изучению новых типов изнашивающихся компонентов для продления срока службы дисков и футеровки мельницы, а также проектирование мельницы большего размера с установленной мощностью 8 МВт.

## ОКИСЛИТЕЛЬНОЕ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ

Основной задачей при проектировании реактора выщелачивания Альбион было создание системы, способной обеспечить коэффициент массового переноса кислорода, необходимый для применения быстрой кинетики выщелачивания, которая достигается при тонкоизмельченном продукте IsaMill™. Для процесса окислительного выщелачивания скорость массового переноса должна находиться в диапазоне 3–5  $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{ч}^{-1}$ . Данная скорость массового переноса соответствуют коэффициенту массового переноса в диапазоне 0,5–0,9  $\text{с}^{-1}$ .

В традиционных системах атмосферного окисления, таких как реакторы бактериального выщелачивания и ферментации, массовый перенос обеспечивается сдвиговым усилием, которое создается за счет разницы ускорений между газовой фазой и пульпой. Для создания сдвигового усилия используется окружная скорость перемешивающего устройства. Мощность перемешивающего устройства пропорциональна окружной скорости в кубе, таким образом, для небольшого повышения сдвигового усилия и массового переноса требуется экспоненциальное увеличение мощности.

Мощность на единичный объем, необходимая для достижения скорости массового переноса в этом диапазоне, составляет порядка 2–5  $\text{кВт}\cdot\text{м}^{-3}$  пульпы[5]. Окружная скорость перемешивающего устройства находится в диапазоне 5–8  $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$ , таким образом, профиль скоростей потока, создаваемого в пульпе, находится ниже 10  $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$  на наконечнике лопасти перемешивающего устройства, и рассеивается по мере удаления пульпы от лопасти. Реактор выщелачивания Альбион спроектирован для достижения необходимой скорости массового переноса при одной десятой от данной мощности.

При проектировании реактора выщелачивания Альбион применили иной подход для снижения потребности в мощности. В реакторе выщелачивания Альбион для создания основного сдвигового усилия в резервуаре используется подача газа на сверхзвуковой скорости. Скорость подачи газа порядка 500  $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$  является типовой для кислородной эжекторной трубы HyperSparge, в то время как при использовании типовой мешалки достигается скорость 4–8  $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$ . Сверхзвуковая подача кислорода является намного более эффективным методом создания сдвигового усилия, чем традиционное перемешивание, что позволяет существенно снизить общий подвод мощности в резервуар.

Требование к мощности перемешивающего устройства уменьшается, окружная скорость может быть снижена с сокращением передаваемой мощности перемешивающего устройства. Взвеси твердой фазы в окислительном выщелачивании не являются обременительными, так как тонкоизмельченное питание и пульпа обычно носят однородный характер и рассматриваются как неоседающие продукты.

Скорость массового переноса кислорода описывается следующим уравнением:

$$dO_2/dt = k_L a (C_{sat} - C)$$

где:

$k_L$  = коэффициент массового переноса через пленки жидкости при переносе кислорода в раствор ( $\text{м.с}^{-1}$ )

$a$  = удельная площадь поверхности газа, то есть соотношение площади поверхности пузырьков к объему воды ( $\text{м}^2/\text{м}^3 = \text{м}^{-1}$ ).

$C_{sat}$  = растворимость кислорода в пульпе в состоянии насыщения ( $\text{г.м}^{-3}$ )

$C$  = уровень кислорода в пульпе в устойчивом состоянии ( $\text{г.м}^{-3}$ )

Обычно  $k_L$  и  $a$  комбинируются для представления коэффициента массового переноса в системе,  $k_{La}$ . Значение  $k_{La}$  подвергается наибольшему воздействию сдвигового усилия в резервуаре.

Растворимость кислорода в пульпе в состоянии насыщения,  $C_{sat}$ , зависит от рабочей температуры раствора выщелачивания, гидростатического давления в реакторе выщелачивания и химических свойств раствора выщелачивания. Окислительное выщелачивание направлено на максимальное повышение растворимости кислорода в пульпе. Соотношение сторон реактора выщелачивания увеличено для обеспечения повышенного гидростатического давления в основании резервуара для повышения значения растворимости кислорода в состоянии насыщения. Оптимальное соотношение сторон составляет примерно 1,2 – 1,5. Если соотношение сторон выше, стоимость монтажа резервуара увеличивается и перевешивает технологические преимущества, обеспечиваемые глубиной реактора.

В процессе нейтрального выщелачивания Процесса Альбион™ низкая минерализация также способствует растворимости кислорода в насыщенном состоянии. Уровень минерализации составляет порядка 25–35  $\text{г.л}^{-1}$ , относительно 200–300  $\text{г.л}^{-1}$  в кислотных условиях.

Баланс между мощностью перемешивающего устройства и мощностью системы кислородных распределителей также является результатом проведенных испытаний при разработке технологии Процесс Альбион™. Значение  $k_{La}$  для реактора выщелачивания Альбион определяется при опытных испытаниях путем измерения скорости повышения содержания кислорода в пульпе окислительного выщелачивания при заданных условиях, относящихся к импеллеру и системе HyperSparge. При испытаниях учитываются конечные плановые размеры и соотношение сторон промышленного резервуара, а также система подачи кислорода HyperSparge. Xstrata Technology располагает испытательной базой в Брисбене для сбора ключевых данных до проектирования реактора. Обычно выполняется ряд испытаний химического поведения пульпы для получения стабильной системы, которая сможет выдерживать изменения в составе концентрата на протяжении существования проекта.

В рамках программы разработки технологии Процесс Альбион™ было разработано соотношение массового переноса для системы выщелачивания, выраженное следующим образом:

$$k_{La} = A * [P_{общ.}/V]^{\alpha} * [U_s]^{\beta} * C^T$$

где:

$k_{La}$  = коэффициент массового переноса в

реакторе,

$V$  = объем резервуара в  $\text{м}^3$

$U_s$  = поверхностная скорость газового потока,  $\text{м.с}^{-1}$

$P_{общ.}$  = передаваемая мощность сверхзвукового распределителя + передаваемая мощность импеллера, в  $\text{кВт.м}^{-3}$

$C$  = Постоянная температуры в системе

$T$  = рабочая температура

Баланс между рабочими параметрами HyperSparge, мощностью перемешивающего устройства и требованиями потока устанавливался на основании данного соотношения.

Основание проектирования для реактора выщелачивания Альбион, подобранное Xstrata Technology, оказалось целесообразным, вышеприведенная скорость массового переноса была достигнута при сложнейших химических условиях раствора выщелачивания на установках Процесс Альбион™ в Испании и Германии, при эффективности улавливания кислорода до 85%.

Ввод кислорода в практически кипящую пульпу также создает определенные сложности при проектировании. Время, необходимое для насыщения пузырька газа в практически кипящей системе составляет менее 1 секунды [4], таким образом, вводимый газ быстро расширяется в

объеме для уравновешивания давления водяного пара при рабочей температуре реактора. В результате могут возникать воздушные зазоры в резервуаре в зонах повышенного сдвигового усилия, таких как наконечники импеллера и распределителя. Система перемешивания должна быть спроектирована с учетом газовых нагрузок, и импеллер следует выбирать с учетом поддержания передаваемой мощности при газовыделении. Предпочтительно использовать импеллер с пустотельными лопатками и нисходящим радиальным потоком. Гидродинамические лопатки восходящего потока также можно использовать при подобных газовых нагрузках, однако подобная система еще не испытывалась в промышленном масштабе. Обычно используются двойные импеллеры ввиду соотношения сторон резервуара, поэтому следует уделять особое внимание относительному диаметру импеллера для ограничения образования зон высокого коэффициента пустот внутри реактора.

Использование сверхзвуковой системы HyperSparge также способствует подаче кислорода в пульпу, приближенную к точке кипения. Кислород вводится в виде струи распределителя, а не отдельных пузырьков, большая часть массового переноса кислорода протекает до того, как струя распадается на облако из пузырьков. Это ограничивает конечный объем газа, вводимый в систему перемешивания.

Тепловой баланс в процессе окислительного выщелачивания Процесс Альбион™ задается скоростью окисления сульфидных минералов. Плотность пульпы обычно меняется на разных участках технологической цепочки, чтобы поддерживать относительно постоянный температурный профиль в цикле окислительного выщелачивания, рабочая температура в резервуарах обычно 95 – 98°C. В реакторах не требуется дополнительное охлаждение, так как температура поддерживается исключительно за счет испарения воды из системы за счет увлажнения отходящих газов. Не требуется применение охлаждающих змеевиков или теплообменников.

Температура резервуара приближена к точке кипения, однако не может достичь точки кипения в системе газового распределения. Пузырьки газа, образующиеся в реакторе, состоят из смеси кислорода, двуокиси углерода, азота и пара. Парциальное давление водяного пара будет ниже, чем давление кипения воды по причине присутствия не вступивших в реакцию газов. Равновесие устанавливается в реакторе выщелачивания Альбион при температуре ниже точки кипения воды на высотной отметке производственной площадки. Это обычно на 2–3 градуса ниже температуры кипения в теплоизолированном резервуаре или немного ниже для резервуаров с частичной изоляцией.

Относительное количество трубок HyperSparge в каждом реакторе выщелачивания Альбион также разнится для обеспечения сбалансированного теплоотвода из каждого резервуара в технологической цепочке. Выпариваемая вода переходит в отходящий газ резервуара выщелачивания, который отводится через трубу резервуара с естественной тягой воздуха. Реакторы выщелачивания Альбион накрываются секционной крышкой для улавливания отходящих газов и перенаправления их в трубу.

Цикл окислительного выщелачивания Процесс Альбион™ может функционировать при разных показателях кислотности, материалы строительства испытываются на этапах лабораторных и пилотных испытаний. Xstrata Technology обладает обширной базой данных подходящих материалов для установок Процесс Альбион™

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- [1] Bartsch et al, "Benefits of Using the Albion Process for a North Queensland Project, and a Case Study of Capital and Operating Cost Benefits Versus Bacterial Oxidation and Pressure Oxidation Randol Gold Conference, Perth, 2005 [Преимущества применения технологии Albion Process на проекте в Северном Квинсленде и практический анализ преимуществ в разрезе капитальных и эксплуатационных затрат в сравнении с бактериальным и автоклавным окислением]
- [2] Hourn et al, "Atmospheric mineral leaching", Australian Patent No. 700850, 1996 [Атмосферное выщелачивание полезных ископаемых]
- [3] Hourn et al, "Method for treating precious metal minerals", Australian Patent No. 744356, 1999 [Метод переработки минералов драгоценных металлов]
- [4] Middleton et al, "Gas-Liquid Mixing in Turbulent Systems", Handbook of Industrial Mixing, John Wiley and Sons, 2004. [Смешивание газа и жидкости в турбулентных системах]
- [5] Smith, J. M et al, "Proc 2<sup>nd</sup> European Conf Mixing", BHRA Fluid Engineering, Cranfield, 1977. [Материалы второй европейской конференции по смешиванию]