

# РЕНТАБЕЛЬНОЕ ИЗВЛЕЧЕНИЕ И ОБОГАЩЕНИЕ МЕТАЛЛОВ ИЗ ПРОМЕЖУТОЧНОГО ПРОДУКТА И ХВОСТОВ

П. Войт<sup>1</sup>, М. Хурн<sup>1</sup>, В. Лоусон<sup>1</sup>, Дж. Андерсон<sup>1</sup> и Д. Малла<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>*Glencore Technology*

*160 Ann St*

*Brisbane, Australia 4000*

(\*Ответственный автор: paul.voigt@glencore.com.au)

<sup>2</sup>*Glencore Zinc*

*PMB 6, Mount Isa*

*Queensland, Australia, 4825*

## АВТОРЕФЕРАТ

По мере снижения исходного содержания ценных компонентов в рудах, сопровождаемого нарастанием сложности рудных тел, становится все сложнее проектировать и применять традиционные методы и технологические схемы переработки минерального сырья в кондиционный концентрат. В частности, в зоне повышенного риска находятся горно-обогатительные предприятия, поставляющие концентраты более низкого сорта или концентраты, содержащие нежелательные примеси. Экономические показатели таких предприятий особенно восприимчивы к ценам на металлы, требованиям к концентратам и доступности на рынке других, более чистых концентратов. Промышленная ценность рудных тел такого рода может быть увеличена посредством улучшения показателей извлечения путем получения, помимо кондиционного концентрата, также низкосортного промежуточного концентрата, предназначенного для дальнейшей переработки.

В горно-обогатительной промышленности наибольшей экономической эффективностью обладают меры по снижению содержания примесей, принимаемые как можно в производственной цепи. Такие технологии, как тонкое измельчение и флотация мелкой фракции, зарекомендовали себя как эффективные способы удаления примесей при переработке минерального сырья. При этом, как правило, забывают о том, что гидрометаллургические циклы также могут быть интегрированы в общую технологическую схему для повышения общего по фабрике извлечения. Применительно к полиметаллам, это, главным образом, объясняется тем, что гидрометаллургические процессы связывают с извлечением металлов или применением дорогостоящих и токсичных осаждающих флотореагентов после перевода ценных минералов в раствор. Эти процессы могут быть очень дорогостоящими, особенно учитывая рост затрат на энергоресурсы и неудовлетворительные показатели экономии на капитальных затратах с увеличением масштаба в связи с низкими объемами производства при переработке промежуточных продуктов.

Компания Glencore Technology (GT) имеет недавний опыт переработки потоков промпродуктов, низкосортных концентратов и хвостов в качестве дополнения к технологической схеме обогащения упорных золотых и полиметаллических руд. Преимущество данного решения заключается в отделении потока низкосортного промежуточного концентрата от первичного цикла или потока хвостов с обогащением до промпродукта, имеющего такое же или более высокое содержание, чем первичный концентрат, и пригодного для смешивания с получением кондиционного концентрата. Это позволяет фабрике работать в более благоприятной части кривой содержания и извлечения, избегая при этом затрат, связанных с извлечением металлов. Данное решение особенно привлекательно для действующих предприятий, так как оно может быть реализовано без остановки производства.

Ниже рассмотрены два примера из практики с приведением технологических схем и калькуляций, иллюстрирующих преимущества предлагаемой GT схемы переработки низкосортных потоков.

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных проблем, стоящих перед мировой промышленностью золота и полиметаллов, является повсеместно наблюдаемая тенденция к снижению исходного содержания ценных компонентов в руде. Эта проблема существует на действующих горно-обогатительных предприятиях, а также представляет собой значительную трудность при обосновании новых проектов. Рисунок 1 показаны исходные содержания различных руд, добывших по всему миру в период с середине 19-го века по 2010 год (CSIRO 2015).

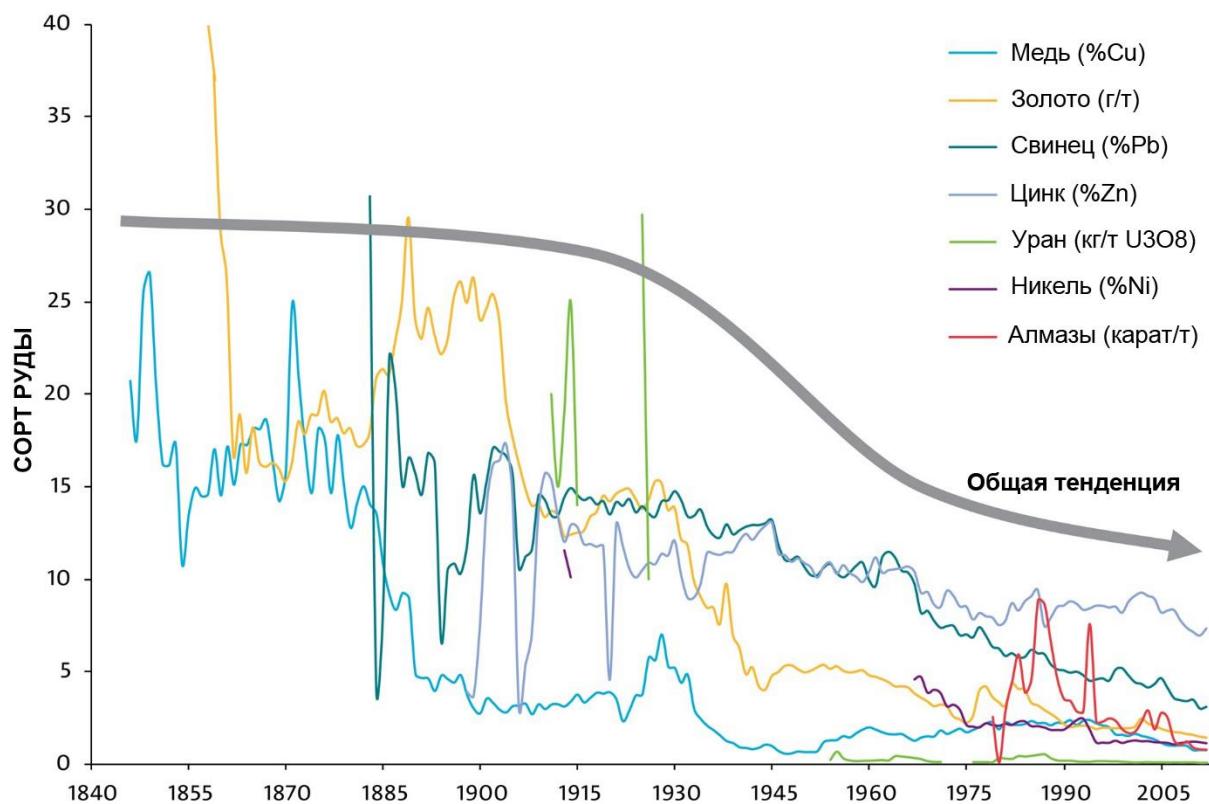


Рисунок 1 - Исходные содержания полиметаллических и золотых руд.

Новые проекты или новые рудные тела на действующих месторождениях, имеющие достаточно высокое исходное содержание, как правило, не следуют этой глобальной тенденции, но это сопровождается соответствующим увеличением геолого-металлургической сложности. Это имеет большое значение для горно-обогатительных предприятий, потому что количество металла в питании может поддерживаться неизменным без увеличения расхода руды, однако это означает ухудшение количественных и качественных показателей продукта, получаемого с помощью той или иной технологической схемы. Хотя переработка высокосортной, но сложной руды позволяет сохранить неизменным содержание металла в питании, получение желаемых показателей содержания или извлечения может оказаться невозможным.

Например, проблемы, возникающие при флотации сложной руды на обогатительной фабрике, концентрат с которой поступает на металлургический комбинат, включают следующие:

- Невозможность найти оптимальную с экономической точки зрения позицию на кривой содержания и извлечения и невозможность получить показатели содержания и извлечения, необходимые для рентабельности сбыта концентрата металлургическим комбинатам
- Необходимость жертвовать сортом конечного концентрата посредством использования промежуточного концентрата, который позволяет повысить общее извлечение, но отрицательно сказывается на содержании ценных компонентов

- Невозможность отделения ценных минералов, содержащихся в рудном теле, влекущая производство коллективного концентрата, закупаемого металлургическими комбинатами на невыгодных условиях

Рисунок 2 показана общая тенденция к менее выраженной зависимости между содержанием и восстановлением по мере увеличения извлечения.

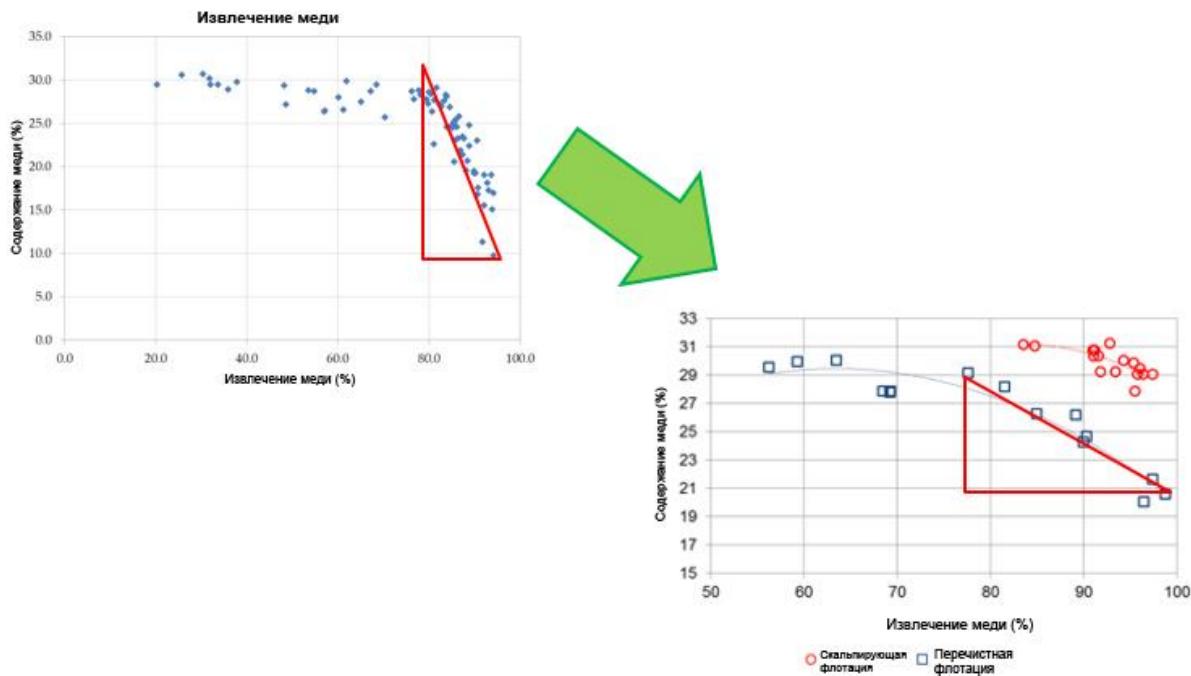


Рисунок 2 - Менее выраженная зависимость между содержанием и извлечением ведет к необходимости снижения качества концентрата для получения желаемого извлечения

Угол наклона кривой содержания и извлечения, в целом, уменьшился, сделав положение предприятий на кривой неоптимальным. Это является отражением общей тенденции к необходимости переработки руды все большей сложности для поддержания неизменным исходного содержания. Сложность руды влияет на кривую, показанную на Рисунок 2, по той причине, что по мере возрастания сложности минералы становятся трудно отделять друг от друга, и поэтому они извлекаются вместе. Существует множество механизмов, объясняющих этот процесс, и они хорошо описаны в литературе.

Некоторые типы руды непригодны для обогащения методами, применяемыми для переработки минерального сырья, если необходим концентрат для отгрузки на металлургические комбинаты. Одним из примеров таких руд являются сильно выветрелые или окисленные руды, обогащаемые с помощью кучного выщелачивания или выщелачивания недробленой руды с извлечением меди и кобальта. Такой метод обогащения подходит для некоторых типов руды при возможности создания достаточной инфраструктуры с небольшими затратами. Например, чтобы кучное выщелачивание руды было рентабельным, необходимо, чтобы оксидные или вторичные минералы помещались в руде, имеющей минимальную прочность и проницаемость при укладке в штабель, а также достаточно низкое чистое потребление кислоты. Кроме того, требуется отдельная установка для жидкостной экстракции выщелоченной в раствор меди и установка электровиннинга для производства товарной катодной меди. Применимость этой схемы зависит от наличия надежных источников относительно дешевой электроэнергии.

Руды, которые не вписываются в стандартные схемы флотации или кучного выщелачивания, традиционно относят к отходам. Как правило, их называют сложными, или труднообогатимыми, рудами. Однако такие руды больше не могут рассматриваться как отходы, учитывая содержащийся в них металлы и высокую стоимость предварительного удаления этого материала, перекрывающего более рентабельные в отработке рудные тела. Нередко затраты на удаление вскрышной породы способны сделать весь проект добычи нерентабельным, если не извлечь из нее ценный металл.

#### Переработка сложных руд на обогатительной фабрике

В период бума в горнодобывающей промышленности с 2004 по 2009 год быстрый рост цен на металлы в сочетании со все более длительными сроками пуска проектов в промышленную эксплуатацию привели к тому, что добывающие компании перешли к стратегии строительства обогатительных фабрик по типовым схемам. Типовая ОФ позволяла значительно сократить продолжительность этапов проектирования и закупки оборудования для проекта и быстрее запустить производство, чтобы извлечь максимальную выгоду от роста цен на металлы. Одна из наиболее распространенных типовых ОФ показана в виде упрощенной технологической схемы на рис. 3.

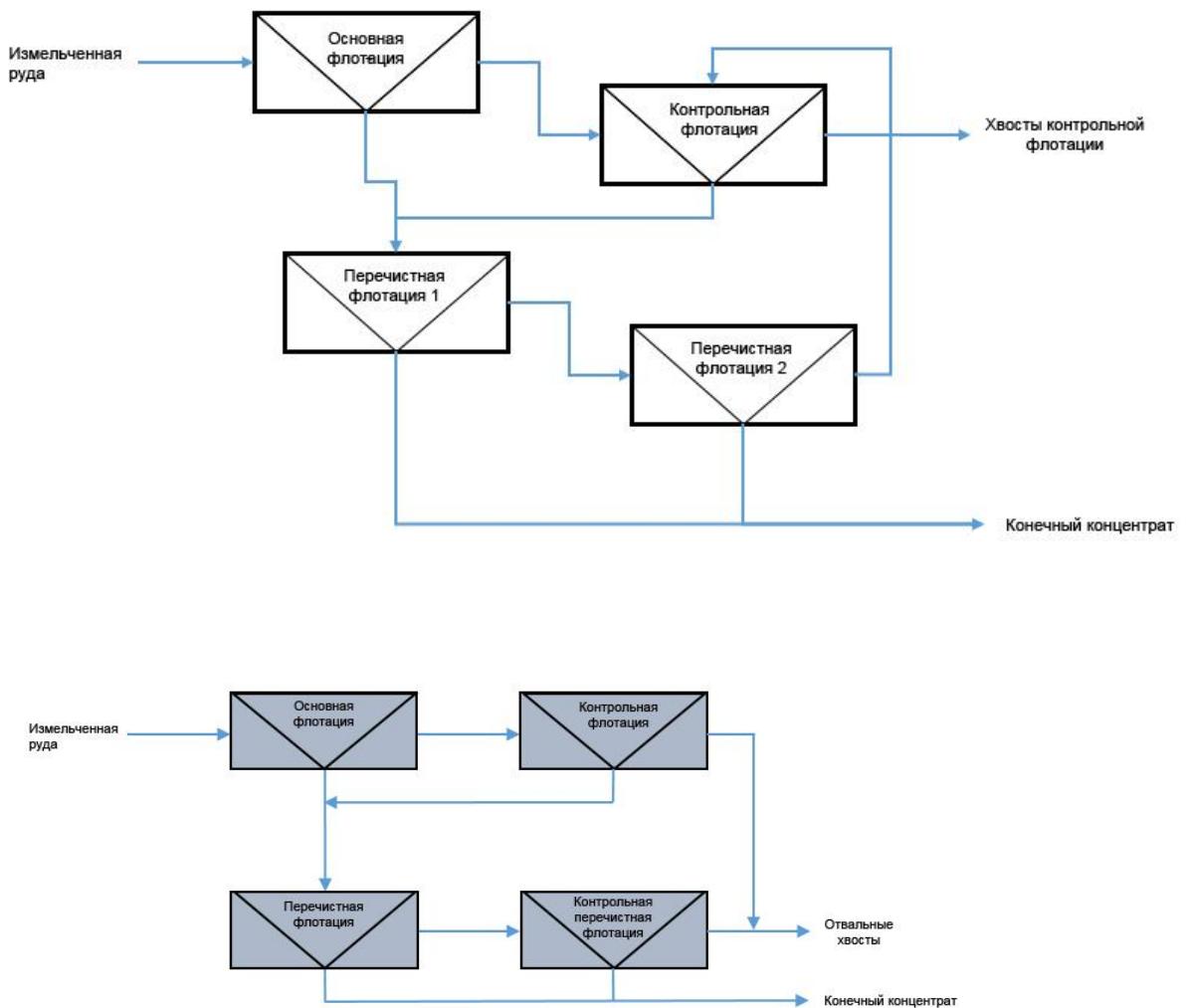


Рисунок 3 – Принципиальная схема флотационной установки

Применение типовой ОФ обосновано в том случае, если планируется строительство ряда фабрик на проектах с идентичными геологическими и металлургическими условиями. Типовая ОФ также является отличным решением, если между проектами ожидаются незначительные различия и стандартная технологическая схема может быть адаптирована к ним. Однако при переработке сложных руд, когда одно месторождение может содержать несколько зон с различными металлургическими свойствами, очень трудно разработать единую технологическую схему, способную обогащать все типы руды с максимальной экономической эффективностью.

На рис. 2 показано, что переработка по неизменной технологической схеме все более сложной руды приводит к необходимости выбора между извлечением и содержанием либо загрязнением конечного концентратса нежелательными металлами и жильными минералами. Это может существенно повлиять на экономические показатели проекта.

## Доработка ОФ для переработки сложных руд

Доработка стандартной технологической схемы с целью переработки сложных руд, как правило, предполагает два подхода. Первый заключается в увеличении степени измельчения. Этот подход основан на том, что если требуемый показатель содержания или извлечения ценного минерала не достигнут, минерал не высвобождается из жильной породы и не имеет открытых поверхностей, необходимых для флотации. Хотя упор на первичное измельчение сохраняется, по мере увеличения сложности руды в схему, как правило, включают доизмельчение концентратов в мельнице тонкого измельчения, такой как Isamill™. Технологическая схема этого типа показана на рис. 4.

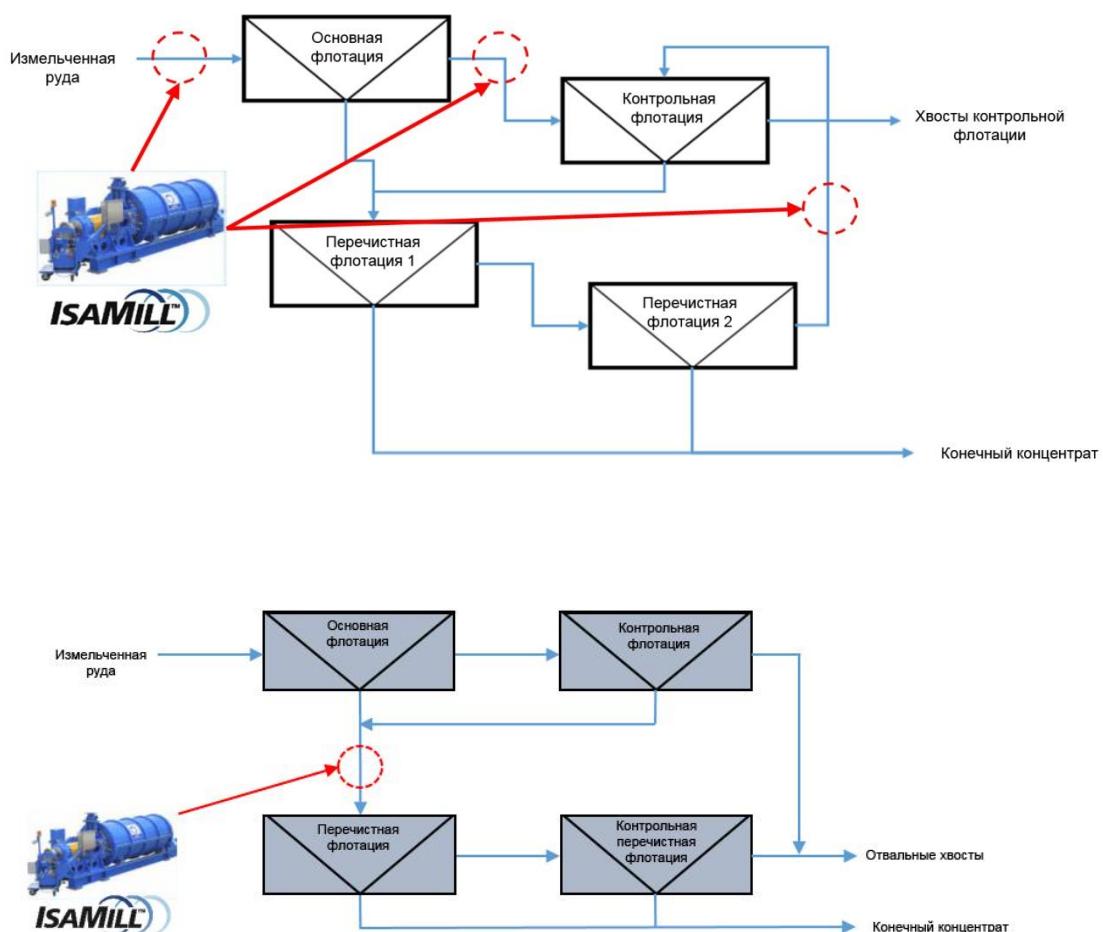


Рисунок 4 - Доработка стандартной технологической схемы для тонкого измельчения

Добавление доизмельчения концентратов к циклу флотации, как показано на рис. 4, основано исключительно на увеличении высвобождения. Когда минералы высвобождены, они должны затем подвергнуться флотации, что может создать дополнительные проблемы, так как мелкие частицы имеют более медленную кинетику флотации и требуют больше времени пребывания для получения таких же показателей извлечения.

Второй подход к доработке стандартной технологической схемы заключается в увеличении времени пребывания посредством установки дополнительных флотомашин или внесения изменений в конфигурацию цикла, как показано на рис. 5.

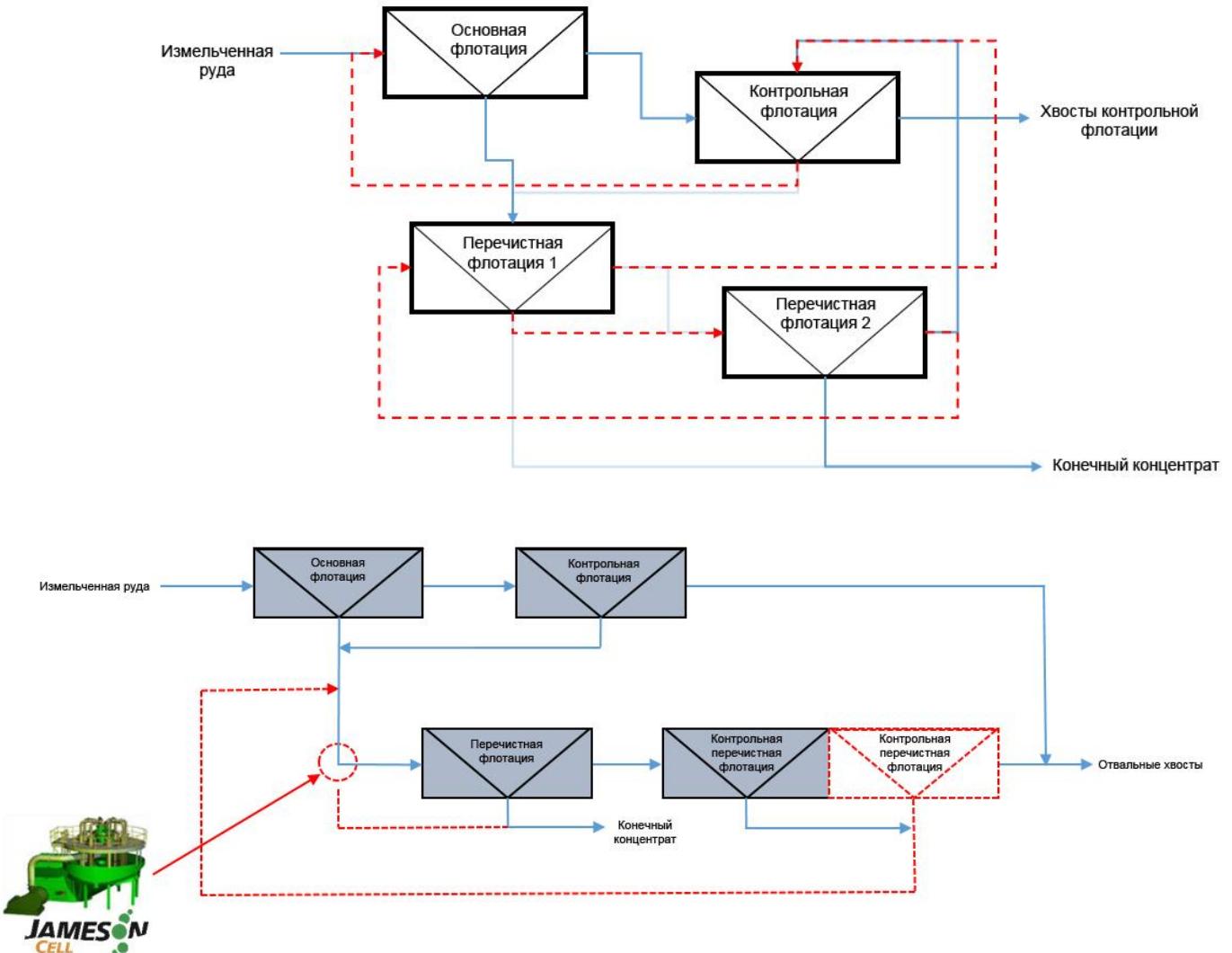


Рисунок 5 - Доработка стандартной технологической схемы для увеличения времени пребывания или с внесением изменений в конфигурацию цикла

Если применяется доизмельчение, как правило, требуется модификация цикла с увеличением времени пребывания. В качестве альтернативы, технологическая схема может быть дополнена другими оборудованием флотации, таким как флотомашина Джеймсон, опыт применения которой для повышения эффективности флотации мелких фракций по сравнению с механическими флотомашинами хорошо описан в литературе.

Несложные доработки стандартной технологической схемы флотации обоснованы, если они приводят к повышению показателей содержания и извлечения ценных металлов до экономически приемлемых. Однако некоторые наиболее сложные руды не в полной мере реагируют на такие модификации и требуют более комплексного подхода.

Еще одна сложность возникает при осуществлении новых проектов или внесении изменений в технологические схемы действующих ОФ с целью переработки более сложных руд, когда схема цикла направлена на обогащение самой сложной в металлургическом отношении зоны рудного тела. В таких ситуациях схема становится более сложной, чем это необходимо для обогащения большей части запасов руды. Последовательность отработки и непригодность некоторых типов руды к штабелированию делают невозможным обогащение более сложных руд в рамках отдельных кампаний. Это может привести к избыточности мощностей флотации и доизмельчения, используемых лишь периодически, и неэффективному использованию капитала.

#### Процесс GT для переработки сложных руд

На протяжении последних 20 лет в горно-обогатительной промышленности сделаны значительные достижения в области технологий и оборудования для переработки полезных ископаемых и гидрометаллургии. Компания GT находится в числе лидеров в этой области благодаря следующим технологиям:

- IsaMill™ - высокоэффективная технология тонкого измельчения в горизонтальной мельнице с перемешиванием с использованием инертной керамической среды измельчения
- Флотомашина Джеймсон™ - пневматическая флотомашина высокой энергоинтенсивности без подвижных частей, обеспечивающая образование мелких пузырьков
- Процесс Альбион™ - тонкое измельчение с последующим атмосферным выщелачиванием для получения концентратов упорных и полиметаллов, включая экономичное извлечение полиметаллов из раствора в высокосортный концентрат с применением недорогих реагентов

Процесс Альбион™ представляет собой патентованную технологию, созданную компанией Glencore в 1994 году. Процесс Альбион™ состоит из двух основных стадий. Первая стадия заключается в ультратонком измельчении сульфидного концентрата в мельнице IsaMill™ производства Glencore Technology до класса 80% мельче 10-15 мкм. Вторая стадия заключается в окислительном выщелачивании тонкоизмельченных сульфидов с целью разрушения сульфидной матрицы и высвобождения драгоценных и полиметаллов для дальнейшего извлечения. В настоящее время по всему миру в эксплуатации находятся пять установок, основанных на процессе Альбион™, которые применяются для обогащения драгоценных и полиметаллов металлов.

Учитывая возрастающую сложность руд, компания GT предлагает технологическую схему, которая представляет собой сочетание вышеописанных достижений в области процессов переработки минерального сырья и гидрометаллургии. Традиционная технологическая схема флотации по-прежнему применяется в новых проектах или на действующих производствах, сталкивающихся с возрастающей сложностью руды, но с добавлением гидрометаллургического цикла для переработки низкосортных концентратов, отводимых из цикла флотации, чтобы сгладить колебания в режиме работы фабрики. Один из вариантов данной концепции показан на рис. 6.

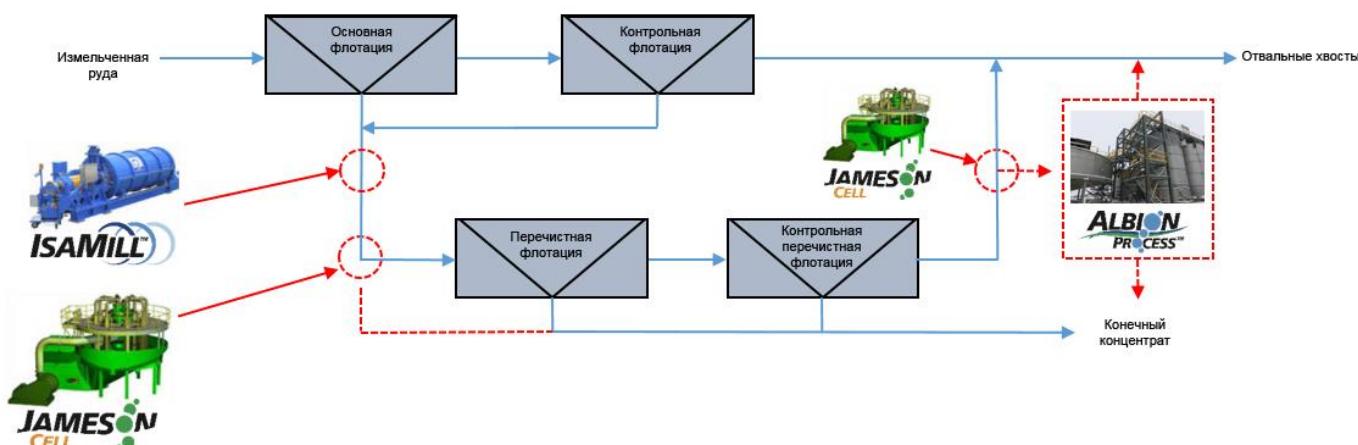


Рисунок 6

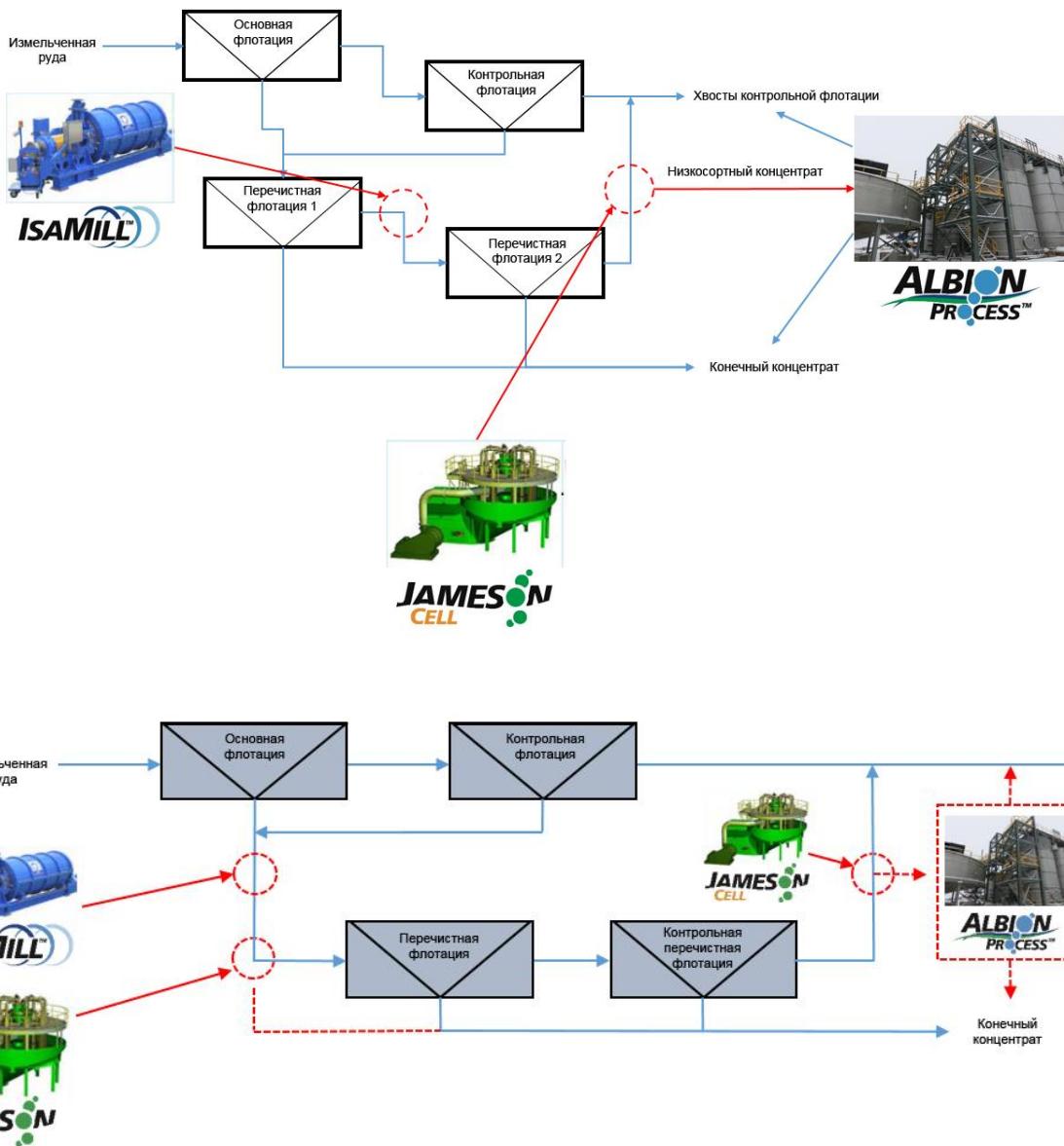


Рисунок 6 - Концепция, предлагаемая ГТ для обогащения сложных руд

На рис. 6 показан один из вариантов модификации традиционной технологической схемы, если существует возможность получения концентрата перечистной флотации 1 с желаемым содержанием, однако извлечение ниже желаемого и требуется вторая стадия перечистки. Содержание в концентрате перечистной флотации 2, тем не менее, ниже желаемого, что приводит к ухудшению качества концентрата в результате разубоживания и уменьшению выручки от поставок на металлургические комбинаты. В модифицированной технологической схеме применяется тонкое измельчение хвостов перечистной флотации 1 и извлечение во флотомашине Джеймсон низкосортного концентрата из хвостов перечистной флотации 2. Низкосортный концентрат отводят из цикла и обогащают в отдельном гидрометаллургическом цикле. Сложные частицы промпродукта, извлекаемые флотомашиной Джеймсон, удаляются из цикла и не возвращаются в установку флотации.

Стадия тонкого измельчения способствует высвобождению ценных минералов в хвостах перечистной флотации 1, что позволяет повысить сорт концентрата перечистной флотации 2. Кроме того, появляется возможность уменьшить массовое извлечение при перечистной флотации 2 и сосредоточить

внимание на содержании, т.к. предусмотрено обогащение хвостов перечистной флотации 2 с извлечением унесенного в них металла.

Поскольку мельница IsaMill<sup>TM</sup> обеспечивает высвобождение перед перечистной флотацией 2, материал, поступающий во флотомашину Джеймсон, не требует дополнительного измельчения. Это позволяет добиться максимальной эффективности измельчения в IsaMill<sup>TM</sup>, поскольку оно улучшает высвобождение перед флотацией и делает материал, извлекаемый впоследствии, пригодным для подачи в процесс Альбион<sup>TM</sup>.

Процесс Альбион<sup>TM</sup> не нуждается в высоком качестве концентрата, производимого флотомашиной Джеймсон. Установлено, что рентабельная переработка возможна при содержании меди в концентрате выше 5%. Одна из проблем, возникающих при интеграции процесса Альбион<sup>TM</sup> в технологическую схему, заключается в снижении затрат на извлечение металлов, выщелачиваемых в раствор. Минимизация затрат возможна с помощью процесса, разработанного GT для цинка, меди, никеля и кобальта и основанного на применении извести или известняка для непрерывного осаждения полиметаллов при контролируемом значении pH. При таком осаждении, как правило, возникает проблема одновременного осаждения гипса. GT разработаны процедуры, позволяющие преодолеть эту проблему путем тщательного управления технологическим режимом таким образом, чтобы частицы гипса вырастали до размеров значительно грубее оксидов полиметаллов и могли быть отделены в гидроциклоне, как показано на Рисунок 7.

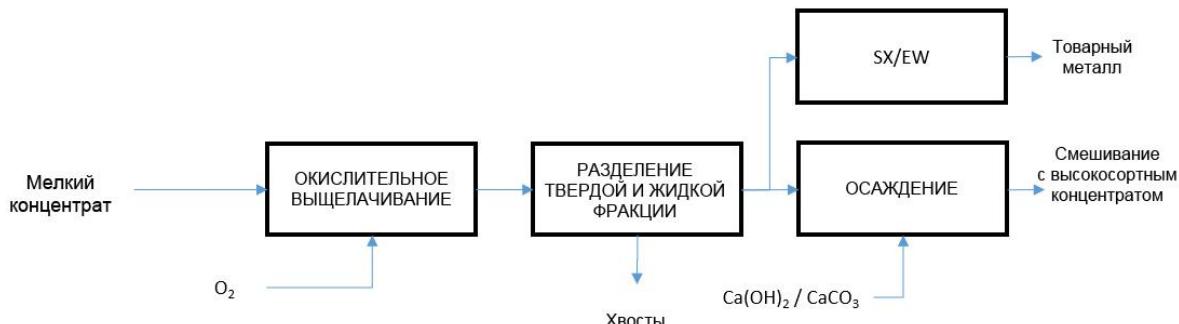


Рисунок 7 - Интеграция процесса Альбион<sup>TM</sup> в технологическую схему переработки минерального сырья

В цикле обогащения меди питанием процесса Альбион<sup>TM</sup> является низкосортный (5%) промежуточный медный концентрат, который подвергается выщелачиванию в раствор и осаждению в виде 45%-ного концентрата оксида меди. Этот высокосортный промпродукт может поставляться для использования в различных отраслях промышленности или же смешиваться с конечным кондиционным концентратом.

### ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОЦЕССА GT

Ниже представлены два примера применения данной концепции и приведена общая информация о преимуществах, которые могут быть реализованы путем интеграции процесса Альбион в технологическую схему ОФ для переработки низкосортного промпродукта.

#### Пример 1 - Медь, северо-запад шт. Квинсленд

Пример 1 описывает опыт реконструкции и расширения действующего горно-обогатительного комбината на месторождении в северной части шт. Квинсленд. Ожидается кратковременное увеличение сложности перерабатываемой руды из-за необходимости отработки руды преимущественно из переходных зон/коры выветривания с непостоянным горизонтом окисления, вызывающим перемешивание коренных и переходных руд. Изменчивость зоны контакта между переходными и коренными рудами такова, что они не могут быть разделены и должны обогащаться совместно. Количество руды таково, что металлы должны быть извлечены как из переходных, так и из коренных руд, чтобы обеспечить общую рентабельность проекта.

Основной медьсодержащие минералы представлены самородной медью, халькопиритом и халькозином с небольшой долей хризоколлы и малахита. Сульфидные жильные минералы, главным образом, представлены пиритом и незначительными количествами пирротина, галенита и сфалерита.

Поступающая на обогащение руда содержит, как правило, 1-2% меди и имеет различную минералогию. Некоторые типы руды, составляющей питание фабрики, позволяют получить концентрат, содержащий более 25% меди, однако концентрат, получаемый из переходных руд, содержит не более 5% меди. Однако переходные концентраты содержат преимущественно растворимые минералы и могут быть выделены в поток промпродукта для отдельной гидрометаллургической переработки. Принципиальная технологическая схема показана на Рисунок 8.

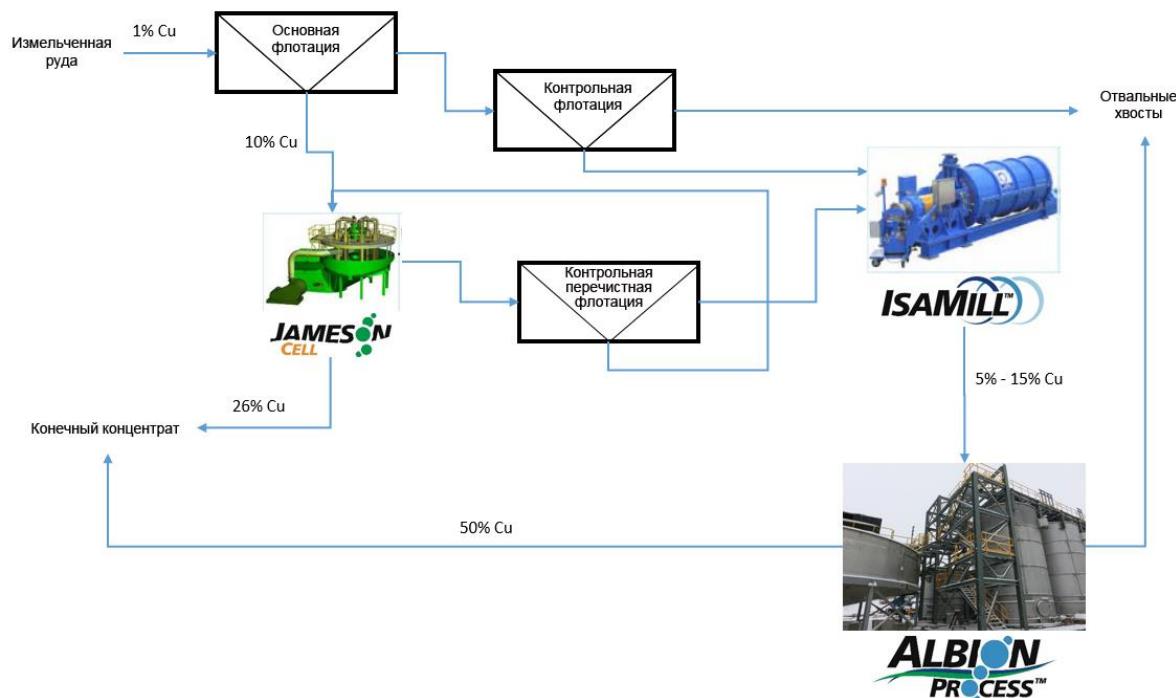


Рисунок 8 - Технологическая схема обогащения меди

Согласно принципиальной схеме на рис. 8, высвобожденные сульфидные минералы меди поступают в конечный концентрат перечистной флотации с получением товарного концентрата, содержащего не менее 26% меди. Материал, не поддающийся доводке и содержащий как сульфидные, так и несульфидные жильные минералы, извлекают в виде промежуточного концентрата (5% Cu), состоящего из концентрата контрольной флотации и хвостов перечистной флотации, и подают в процесс Альбион™. Даже при низком сорте концентрата гидрометаллургический процесс остается рентабельным, поскольку конечный промежуточный продукт содержит примерно 50% меди, что позволяет добиться максимального общего содержания и извлечения в цикле.

Технологическая схема, сочетающая традиционные и гидрометаллургические методы обогащения, увеличивает извлечение меди на 4-30% (в зависимости от перерабатываемой руды) при желаемом содержании. Это позволяет получить доступ к дополнительным 6 млн. тонн высокосортной коренной руды. Как таковой, проект обогащения переходных руд из перекрывающих зон имеет внутреннюю норму прибыли около 25%.

#### Пример 2 - Цинк, северо-запад шт. Квинсленд

В данном примере технологическая схема ГТ была применена для переработки хвостов обогащения цинка из отвалов. Было установлено, что хвосты имеют значительное содержание цинка, однако по результатам повторной флотации хвостов, учитывая присутствие сульфидных и несульфидных жильных минералов, пришлось принять содержание цинка около 10%, чтобы получить приемлемый показатель извлечения. Был рассмотрен ряд вариантов гидрометаллургического обогащения

низкосортного концентрат, однако они имели неудовлетворительные экономические показатели из-за высокой стоимости установки дорогостоящего оборудования, необходимого для получения конечного металлического цинкового продукта. Концепция GT позволила преодолеть эти экономические и технологические сложности. Принципиальная технологическая схема показана на Рисунок 9.

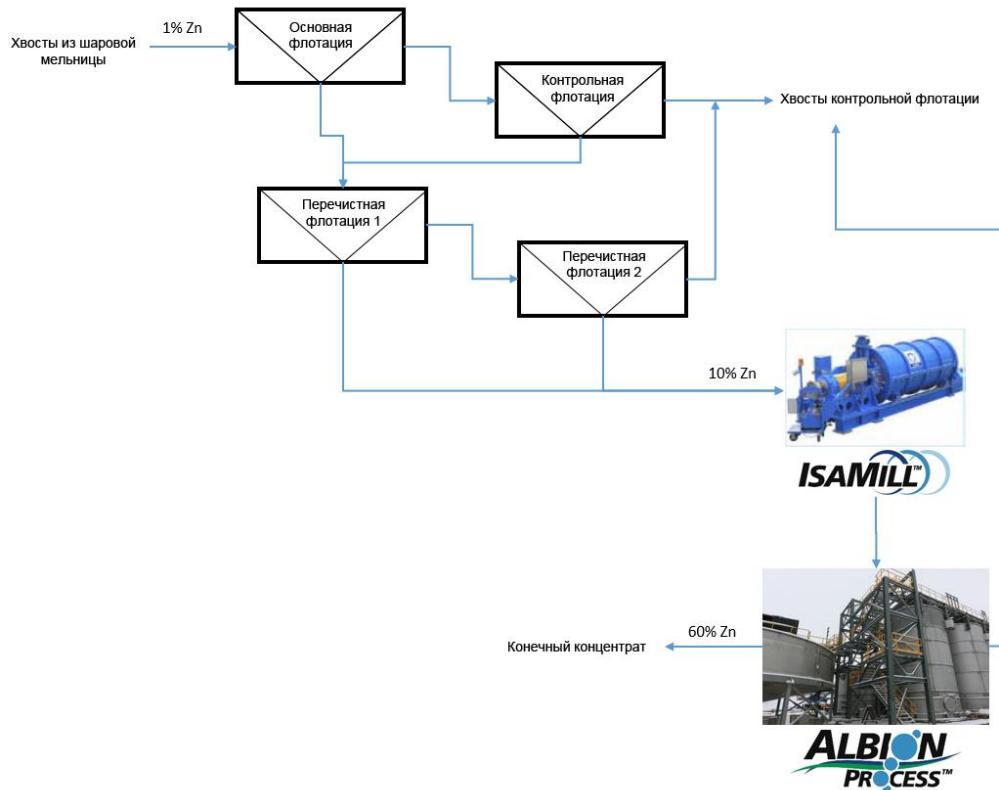


Рисунок 9 - Технологическая схема обогащения цинка

Хвосты могут быть подвергнуты повторной флотации с использованием обычной технологической схемы с получением концентрата, содержащего 10% цинка при извлечении 90%. Полученный концентрат подают в мельницу IsaMill™ для измельчения до класса 80% мельче 20 мкм, а затем в процесс Альбион™ для окислительного выщелачивания с извлечением цинка. Окислительное выщелачивание обеспечивает показатели извлечения цинка до 99,5%. Компания Glencore спроектировала и построила две (в Испании и Германии) установки Альбион™ для извлечения цинка из коллективного концентрата.

После получения раствора, вместо производства металла, применяется процесс осаждения GT, основанный на добавлении извести или известняка, для получения оксида цинка, содержащего от 50 до 60% металла. Стратегическое преимущество заключается в том, что поскольку на большинстве комбинатов, применяющих последовательность обжига, выщелачивания и электровиннинга, узким местом является обжиговая печь, такой цинковый продукт может перерабатываться на обычном рафинировочном заводе, чтобы максимально загрузить цех электролиза или избежать простоев, связанных с остановами обжиговой печи.

Установка была рассчитана на производство 100 тыс. т металлического цинка в год, но при необходимости ее мощность может быть уменьшена. Внутренняя норма прибыли проекта составила 30%.

## ВЫВОДЫ

Компания GT разработала новые технологические схемы, позволяющие перерабатывать сложные руды посредством незначительной модификации традиционных технологических схем с минимальным

вмешательством в технологический процесса и интеграцией гидрометаллургических процессов. Существует множество вариантов технологических схем; выше описаны лишь некоторые из них.

В производственной цепи горно-обогатительной промышленности добавленную стоимость проще всего создавать, преодолевая проблемы, возникающие при переработке сложных руд, на самых ранних стадиях цепи. Эта работа должна начинаться на руднике с качественного контроля, определения металлургических зон и оптимизации сетки взрывных скважин. На этапе переработки минерального сырья меры могут заключаться в классификации, тяжелосредной сепарации, оптимизации крупности измельчения и применении реагентов. На этапе металлургического извлечения может потребоваться смешивание различных потоков питания, установка дополнительного оборудования и утилизация отходов. Конечный продукт реализуется на рынке с учетом качества продукции других производителей. Авторы подчеркивают, что максимальную добавленную стоимость можно создать только путем оптимизации переработки сложных руд на как можно более ранних стадиях производственной цепи. Настоящая работа посвящена комбинированию традиционных методов переработки минерального сырья с технологиями гидрометаллургии при обогащении сложных руд.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

CSIRO – Producing more with less, Resourceful – Bringing CSIRO research to the minerals industry, Issue 7, June 2015

Munro P.D. 2015. Base metal concentrate sales contracts – Change Pavlov and the Dog. MetPlant 2015, Perth, Australia, 7-8<sup>th</sup> September

Combes M. 2011. Xstrata Copper – Antapaccay Project, 18<sup>th</sup> September  
[http://www.glencore.com/assets/media/doc/speeches\\_and\\_presentations/xstrata/2011/xcu-speech-201109184-analystvisitperu.en2.pdf](http://www.glencore.com/assets/media/doc/speeches_and_presentations/xstrata/2011/xcu-speech-201109184-analystvisitperu.en2.pdf)

определения металлургических зон и оптимизации сетки взрывных скважин. На этапе переработки минерального сырья меры могут заключаться в классификации, тяжелосредной сепарации, оптимизации крупности измельчения и применении реагентов. На этапе металлургического извлечения может потребоваться смешивание различных потоков питания, установка дополнительного оборудования и утилизация отходов. Конечный продукт реализуется на рынке с учетом качества продукции других производителей. Авторы подчеркивают, что максимальную добавленную стоимость можно создать только путем оптимизации переработки сложных руд на как можно более ранних стадиях производственной цепи. Настоящая работа посвящена комбинированию традиционных методов переработки минерального сырья с технологиями гидрометаллургии при обогащении сложных руд.