

## ДЕЛАЕМ ПРАВИЛЬНЫЙ ВЫБОР: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПЕРЕРАБОТКИ УПОРНЫХ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ КОНЦЕНТРАТОВ

### АННОТАЦИЯ

Отталкиваясь от работ, освещенных в предыдущих статьях, в данной статье представлен технико-экономический анализ двух ранее продемонстрированных технологий для переработки мышьяксодержащих упорных золотых концентратов. Авторы производят сравнение смет капитальных и эксплуатационных затрат для автоклавного окисления и процесса Альбион™, используя исходные данные и параметры проекта. В статье используется теперь уже общедоступная информация с установки по процессу Альбион™, которая эксплуатируется на проекте компании ГеоПроМайнинг Голд (ГПМ Голд) в Армении с 2014 года, а также недавние технологические схемы автоклавного окисления.

Ключевые слова: Процесс Альбион, автоклав, автоклавное окисление

### ВВЕДЕНИЕ

Данная статья зародилась еще в 2005 году, когда авторы, в большинстве из компании Aker Solutions, предшественника компании Jacobs, проводили схожее сравнительное исследование по извлечению упорного золота<sup>[3]</sup>. В предыдущем научном исследовании проводилось сравнение существующих хорошо известных процессов извлечения упорного золота с новым перспективным процессом Альбион™. С продолжающимся устойчивым спросом на методы переработки запасов упорного золота, установка процесса Альбион™, проработавшая уже более трех лет на производстве компании ГПМ Голд в Армении, может предоставить информацию по эксплуатационным и капитальным затратам.

В рамках данной статьи мы решили остановиться только на сравнении автоклавного окисления и процесса Альбион™, где в качестве питания процессов используются сульфидные флотационные концентраты. В целях прямого сопоставления двух технологий мы также принимаем, что участки по транспортировке, дроблению, измельчению и флотации материала выше по технологической цепочке, также как и последующее извлечение золота (цикл CIL (уголь в щелоке) и плавление) и системы транспортировки хвостов являются идентичными для обеих технологий.

Мы признаем наличие существенных различий в плане химического состава и водного баланса установок в силу используемых процессов извлечения и их нужд по управлению.

Признается, что существуют и другие соответствующие процессы, которые можно использовать для переработки упорного золота как в виде цельной руды, так и в виде концентратов. Такие процессы включают обжиг (от таких поставщиков, как Outotec [Lurgi] и Technip [Dorr Oliver]) и биологическое окисление (например технология BIOX от Outotec). Для этих процессов требуется тесное сотрудничество со специализированными поставщиками и проведение комплексных испытаний с этими же поставщиками. Существует также возможность производства концентрата для продажи крупным металлургическим комбинатам.

Включение всех этих вариантов в данное исследование потребовало бы высокой степени открытого обмена с рядом конкурирующих сторон, и следовательно было принято решение ограничить данный анализ сравнением технологии автоклавного окисления с процессом Альбион™. Считается, что технология Альбион является достаточно проверенной и развитой для практического применения с упорным золотом. Фабрика компании ГПМ работает уже более трех лет, и по всему миру эксплуатируется шесть установок Альбион в различных местах, с переработкой различных материалов.

Для упрощения и точности сравнения мы взяли за основу сравнительные затраты на проекте в Северной Америке с производством золота, аналогичным проекту ГПМ Голд.

В данной работе для технологической схемы автоклавного окисления принята консервативная эксплуатационная готовность в 85%. Для сравнения готовность установки процесса Альбион™ значительно выше и составляет 90%. Признание различий в эксплуатационной готовности установок для целей данного сравнения имеет основополагающее значение для определения размеров основного оборудования в каждой схеме.

Категорически подтверждается, что для всех проектов с упорным золотом, необходимо на ранних

этапах провести достаточное количество испытаний и исследований высокого качества по минералогии, геометаллургии, флотуемости, гравитационному обогащению, измельчаемости, реологии и цианированию. Это типичные требования до начала критической работы по разработке инженерно-технических вариантов для технологического процесса. Формальный и поэтапный подход к техническому исследованию с задействованием опытных команд и установленных эталонных показателей исследования очень важны для выбора предпочтительного технологического процесса(-ов) для конкретного проекта.

## **ПРИНЯТЫЕ ДОПУЩЕНИЯ**

Данное исследование представляет собой сравнение двух методов окисления упорного золота. В этой связи принята философия, ограничивающая сравнение рамками конкретных участков, значительно отличающихся друг от друга. Таким образом, на входе мы имеем поток флотационного концентрата и на выходе поток окисленной пульпы, который подается на в цикл CIL с последующим извлечением ниже по технологической цепочке и хвостами.

Объемы и состав концентрата в данной статье соответствуют фактическим показателям по материалам на производстве ГПМ Голд, а производительность автоклавного окисления предполагается на основе данного загрузочного материала. На самой фабрике компании ГПМ Голд хвосты контрольной флотации также отправляются в цикл CIL. Данный подход использован для как для схемы автоклавного окисления, так и для схемы процесса Альбион<sup>TM</sup>, изучаемых в данном сравнении. Исходя из полученного опыта эксплуатации на фабрике ГПМ Голд и современных практик, все последующие установки, схожие с фабрикой ГПМ Голд, будут видоизменены с отказом от сгустителя на разгрузке и заменой реакторов выщелачивания процесса Альбион<sup>TM</sup> с девяти реакторов по 240 м<sup>3</sup> на шесть реакторов по 340 м<sup>3</sup>. Данные изменения технологической схемы были учтены в настоящем сравнении.

Прочие принятые допущения включают следующее:

- Для сравнения взята однотипная производственная площадка в Северной Америке со структурой затрат 2018 года. Конкретная площадка ровная с прочным фундаментом и хорошими грунтовыми условиями, расположена на высоте 1200 метров над уровнем моря.
- Все реагенты, необходимые для окислительного процесса включены в перечень затрат, разработанный для данной работы. Сюда входят снабжение, смешивание, хранение и распределение извести, известняка, кислорода и прочего по мере необходимости.

## **МИНЕРАЛОГИЯ**

Основными сульфидными минералами рудного тела, изучаемого в данном сравнении, являются пирит, арсенопирит и пирротин, которые переходят в сульфидный концентрат. Золото встречается как свободное самородное, тонкодисперсное в мышьяковых сульфидах, теллуристое и вторичное самородное, оставшееся после окисления сульфидов и оксидов. Серебро представлено в своей самородной форме в кварце, халькопирите и пирите, а также в виде теллуридов серебра. Основными жильными минералами являются кварц, тальк и хлорит, а также незначительное количество магнезита, доломита и кальцита.

Сульфидный концентрат производится в типовой схеме измельчения и коллективной флотации. Элементный и минералогический состав сульфидного флотационного концентрата, использованного в сравнении технологических схем автоклавного выщелачивания и процесса Альбион<sup>TM</sup>, приведен ниже:

Таблица 1 - Элементный анализ флотационного концентрата

Химический элемент		Единицы измерения	Значение
Мышьяк	As	% вес.	2,66
Железо	Fe	% вес.	18,71
Сера	S	% вес.	17,26
Кремний	Si	% вес.	17,89
Кислород	O	% вес.	30,76
Магний	Mg	% вес.	4,80
Кальций	Ca	% вес.	1,79
Прочие	-	% вес.	6,13
Золото	Au	г/т	47,28
Серебро	Ag	г/т	48,43

Таблица 2 - Преобладающие минералы флотационного концентрата

Минерал	Химическая формула	Единицы измерения	Значение
Пирит	FeS <sub>2</sub>	% вес.	23,9
Арсенопирит	FeAsS	% вес.	5,8
Пирротин	Fe <sub>0,877</sub> S	% вес.	5,18
Халькопирит	CuFeS <sub>2</sub>	% вес.	1,0
Кварц	SiO <sub>2</sub>	% вес.	33,9
Кальцит	CaCO <sub>3</sub>	% вес.	2,23
Доломит	CaMg(CO <sub>3</sub> )	% вес.	2,18
Оксид магния	MgO	% вес.	2,15
Магнезит	MgCO <sub>3</sub>	% вес.	5,82
Тальк	3MgO*4SiO <sub>2</sub> *H <sub>2</sub> O	% вес.	5,92
Прочие		% вес.	11,92

## ОБОСНОВАНИЕ И МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ

Оценки затрат для этого сравнения основаны на следующих документах: критерии проектирования технологического процесса, перечень механического оборудования (технологическое оборудование и оборудование инженерных сетей), комплектация материалов (включая воздуховоды, бункеры и т. д.), технологическая блок-схема, генеральные планы площадки и общие компоновочные чертежи общего плана, исходные данные для проектирования (только спецификации программного обеспечения Aspen Capital Cost Estimator [ACCE]) и повышенные предыдущие ценовые предложения. Пакет программного обеспечения ACCE сгенерировал цены на большинство технологического оборудования и оборудования инженерных сетей, а также на большинство сыпучих материалов. Цены на оставшееся оборудование и сыпучие материалы основаны на внутренних ценах компании Jacobs (в соответствии с ценами на последние проекты) и данных о затратах из опубликованных оценочных источников и других сопроводительных технических документах.

Сметы были подготовлены в соответствии с руководствами и стандартами компании Jacobs по 5-му классу точности оценки капитальных затрат с диапазоном точности + 50% / -50%. Сметы определяют капитальные затраты, связанные с технологическими схемами, описанными ниже.

Сметы представляют собой смоделированные величины, полученные из программного обеспечения Aspen Capital Cost Estimator (ACCE), адаптированного под компанию Jacobs, для всех основных учетных записей прямых затрат. При отсутствии конкретных данных использовались взвешенные данные, основанные на архивных данных компании Jacobs. Такие методы количественного выражения приемлемы для оценки точности 5-го класса.

Был составлен перечень главного механического оборудования с условиями эксплуатации, достаточными для поддержки цены на оборудование. Цены на основное оборудование основывались преимущественно на повышенной стоимости предыдущих ценовых предложениях с аналогичных проектов и ценообразовании в системе ACCE. Для расчета цен ACCE по

предложенным технологическим пакетам использовались данные инженерно-технического проектирования для указанного оборудования.

Приблизительно 73–78% затрат на приобретенное оборудование (РЕС) в смете представляют собой повышенную стоимость из ранее полученные ценовых предложений, а 22–36% представляют цены АССЕ, основанные на предварительных проектных опросных листах, предварительных эксплуатационных условиях, мощностях и спецификациях. Приблизительно 1% затрат на приобретенное оборудование в оценке представляет внутренние или архивные данные по ценам.

АССЕ произвели ведомости заказа материалов для каждого из соответствующих счетов на основе размеров оборудования, мощностей, спецификаций и условий эксплуатации. Затраты на строительство основаны на стоимости за квадратный метр из недавних покупок и внутренних смет. Допуски на разработку проекта (ДРП) и ведомости заказа материалов для каждой соответствующей учетной записи были установлены инженерами по оценке затрат и профильными инженерами на основе опыта компании Jacobs.

С помощью АССЕ специалисты Jacobs подготовили сметы по времени для установки конструкций на площадке, основанные на удельных трудовых затратах, стандартных для Jacobs, которые представляют собой ставки в США на побережье Мексиканского залива при идеальных условиях для проекта нового строительства среднего размера. После этого были проработаны корректировки по производительности для типовой производственной площадки в Северной Америке и применены к ранее рассчитанному времени на установку.

Остальные прямые затраты были разработаны с помощью специализированного программного обеспечения АССЕ для моделирования затрат на оборудование. Косвенные затраты на строительство, инженерно-техническое обеспечение и прочие затраты, а также сводные данные по общей площади и совокупным затратам были разработаны на основе процентных отношений и коэффициентов из предыдущих проектов по определенному объему. После этого проведен сравнительный анализ на основе метрик и эталонных показателей и сбор и оформление комплекта документации по основанию для сметы и комплекта документации на рассмотрение.

В состав эксплуатационных затрат входят: энергопотребление, расход реагентов, эксплуатационный и обслуживающий персонал и материалы. Сметы по энергопотреблению были рассчитаны из перечня оборудования. Нормы расхода реагентов были разработаны на основе критериев проектирования технологического процесса. Затраты на техническое обслуживание основаны на типовых данных с места расположения проекта, рассчитанных из установленного капитала с учетом назначения и условий эксплуатации оборудования. В рамках данного сравнения предполагалось, что потребность в трудовых ресурсах для обоих циклов будет одинаковой. Это предположение основано на наличии квалифицированных трудовых ресурсов в Северной Америке и может не подходить для всех регионов.

Цены на реагенты, инженерные коммуникации и расходные материалы были получены из базы данных компании Jacobs по актуальным ценам в Северной Америке.

## **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ**

В обоих методах перерабатывается флотационный концентрат, состоящий в основном из пирита с незначительным содержанием арсенопирита. Концентрат ГПМ Голд является относительно чистым, без значительного количества ртути, цезия, селена или ванадия. Окисление серы и высвобождение золота производятся либо с использованием процесса Альбион™, либо с использованием технологии автоклавного окисления.

### **Технологическая схема процесса Альбион™**

Технология Процесс Альбион™ основана на схеме, установленной на проекте ГПМ Голд, и включает наработки, полученные при увеличении производительности данной схемы.

В технологической схеме процесса Альбион™, концентрат из нижнего слива сгустителя флотационного концентрата перекачивается в загрузочный зумпф мельницы IsaMill™, где он смешивается с мелющей средой перед загрузкой в мельницу IsaMill™ M3000. Мельница IsaMill™ спроектирована до получения крупности 80% класса 12-14 микрон. Затем пульпа перекачивается в бак-накопитель с перемешивающим аппаратом и буферной емкостью, рассчитанной на восемь часов работы, чтобы обеспечить бесперебойную работу цикла выщелачивания во время проведения технического обслуживания мельницы IsaMill™. Концентрат в виде пульпы затем подается в один из первых трех реакторов выщелачивания процесса Альбион™. Технологическая схема цикла окислительного выщелачивания состоит из шести 340 м³ реакторов выщелачивания процесса

Альбион<sup>TM</sup>, изготовленных из дуплексной нержавеющей стали (LDX2101), соединенными между собой системой желобов, которая позволяет обходить отдельные чаны при проведении на них технического обслуживания. Каждый из реакторов оснащен перемешивающим устройством мощностью 160 кВт с двойным импеллером, кислород подается системой из шести сверхзвуковых кислородных эжекторных трубок HyperSparge. Процесс разработан для автотермической работы при или около 93°C.

Уровень pH в каждом реакторе поддерживается между 5,0 и 5,5 посредством подачи известнякового шлама. Известняковый шлам производится на установке измельчения известняка производительностью 6 т/ч, расположенной непосредственно на производственной площадке. Известняк измельчается до крупности 80% класса 75 микрон в шаровой мельнице в замкнутом цикле с циклонами. Верхний продукт циклонов поступает в распределительную емкость (150 м<sup>3</sup>) с перемешивающим устройством и подается в цикл окислительного выщелачивания по кольцевой магистрали.

Кислород для процесса Альбион<sup>TM</sup> и цикла CIL подается с двух установок вакуумной короткоцикловой адсорбции производительностью 60 т/д, где около 98 т/д идет на установку процесса Альбион<sup>TM</sup>, и оставшийся кислород подается в цикл CIL. Возможность регулирования кислородной установки означает, что производительность по кислороду можно снижать, если требуется меньшая степень окисления.

Осадок выщелачивания содержит около 30% твердого, перед загрузкой в цикл CIL он смешивается с хвостами флотации.

Осадок из процесса Альбион<sup>TM</sup>, перерабатываемый в цикле CIL, характеризуется низким расходом извести и цианида, объясняемым постоянной нейтрализацией железа и кислоты путем добавления щелочного известняка на этапе окисления. Данный процесс также предотвращает формирование элементарной серы. Расход цианида для осадка из процесса Альбион<sup>TM</sup> составляет около 4 кг на тонну осадка.

#### **Технологическая схема автоклавного окисления**

В технологической схеме автоклавного окисления концентрат в виде нижнего продукта сгустителя концентрата флотации подается поршневыми мембранными насосами (в комбинации рабочий-резервный) в один автоклав с пятью отсеками. Автоклав оборудован системой распределения, с подводом снизу, для подачи газообразного кислорода, воды охлаждения и пара (для начального подогрева).

Окисленная пульпа затем разгружается из последнего отсека автоклава в испаритель, где давление снижается за счет регулирующего клапана с керамическим покрытием с последующим диффузором и неподвижным дросселем. Верхний продукт испарителя отводится в скруббер Вентури. Перед подачей в скруббер Вентури отвод из автоклава редуцируется в регулирующем клапане с керамическим покрытием в отводную секцию трубной обвязки автоклавного окисления. Предохранительные клапаны системы отводят материал в другую секцию трубной обвязки и циклонный сепаратор, оборудованный точками подачи воды для очистки системы при поднятии предохранительного клапана. Газ и неконденсируемые фазы выходят через верх циклонных сепараторов, а вода и конденсируемые фазы стекают в насосный зумпф скруббера, откуда затем перекачиваются в сгуститель.

К вспомогательным системам автоклава относятся система воды высокого давления для уплотнения, установка деминерализации воды, установка пускового/резервного котла, система транспортировки гликоля, система подачи охладителя, система промывки уплотнения, а также охлаждение технологического процесса. Кислород для автоклавов подается с установки вакуумной короткоцикловой адсорбции.

Из автоклава прошедшая горячее испарение пульпа вводится в цикл горячего отверждения. Цикл горячего отверждения не только позволяет охладить пульпу для последующего цикла цианирования (CIL), но и способствует преобразованию основного сульфата железа в сернокислое железо путем снижения температуры и предоставления достаточного времени удержания для осаждения железа и мышьяка.

После охлаждения пульпы она перекачивается в цикл противоточной декантации, который состоит из сгустителя и двух контуров противоточных декантаций.

Задачей цикла противоточной декантации является промывка шлама автоклавного окисления путем добавления противотока промывной воды в поток шлама для удаления кислоты и, если применимо, растворимой меди из золотосодержащей твердой фазы. Концентрированный раствор меди может

затем отправляться в цикл осаждения меди для извлечения (если это экономически целесообразно), в то время как промытая твердая фаза перекачивается в контур нейтрализации и затем соединяется с хвостами флотации в цикле CIL для извлечения золота

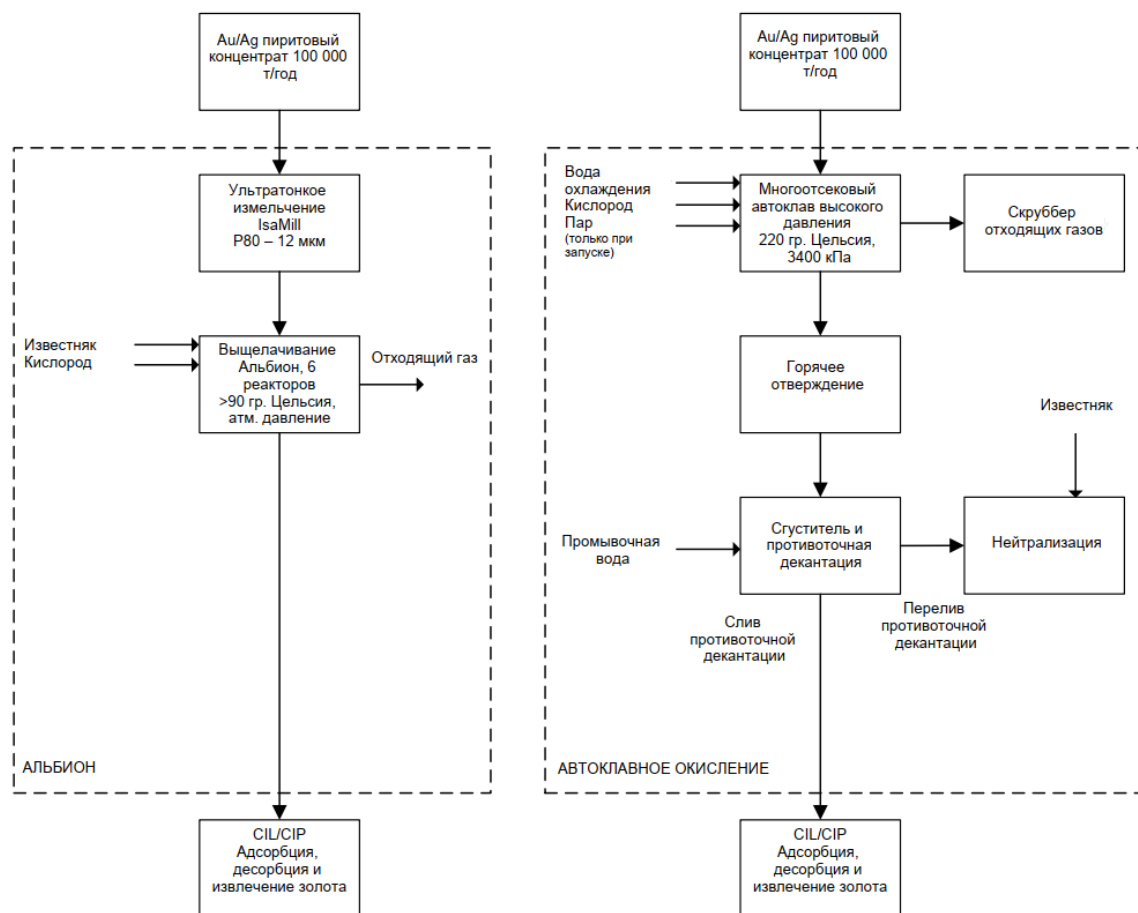
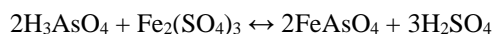
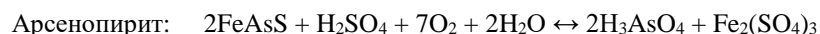
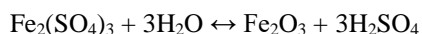
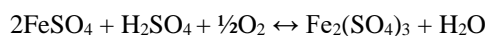
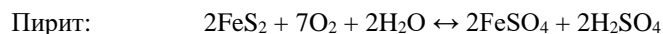


Рисунок 1 – Сравнение технологических схем процесса Альбион™ и автоклавного окисления

## ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ АВТОКЛАВНОГО ОКИСЛЕНИЯ

Технология автоклавного окисления была изначально разработана для переработки концентратов неблагородных металлов, пока не была адаптирована для переработки золотосодержащих пиритовых и арсенопиритовых руд и концентратов. В процессе используется автоклав, работающий обычно при температуре в пределах 190-230°C с избыточным давлением кислорода от 350 до 700 кПа(м) и времени удерживания, варьирующемся от 60 до 90 минут. Окисление сульфидов в автоклавном окислении обычно превышает 98% для большинства руд и концентратов. Плотность загружаемого в автоклав сульфидного концентрата регулируется для предоставления достаточного тепла, вырабатываемого экзотермическими реакциями окисления, для поддержания рабочей температуры в автоклаве. При взаимодействии пирита и арсенопирита с кислородом в автоклаве происходят следующие реакции окисления и гидролиза:



## ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ТЕХНОЛОГИИ АЛЬБИОН

Процесс Альбион™ состоит из запатентованной комбинации тонкого измельчения и атмосферного выщелачивания. На первом этапе используется технология ультратонкого измельчения IsaMill™ для получения достаточно тонкого помола с ограниченным узким гранулометрическим составом. На втором этапе производится окисление сульфидов, получаемое при вводе кислорода в реакторы

выщелачивания при сверхзвуковой скорости, при этом реакторы работают в практически нейтральной среде (рН 5,5). Химические реакции, на которых основан процесс Альбион™, требуют добавление кислорода для окисления пирита и арсенопирита, в то время как известняк добавляется для постоянной нейтрализации кислоты, получаемой в результате реакций окисления.

Пирит:  $4\text{FeS}_2 + 11\text{O}_2 + 18\text{H}_2\text{O} + 8\text{CaCO}_3 \leftrightarrow 4\text{FeO} \cdot \text{OH} + 8\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + 8\text{CO}_2$

Арсенопирит:  $2\text{FeAsS} + 7\text{O}_2 + 4\text{H}_2\text{O} + 2\text{CaCO}_3 \leftrightarrow 2\text{FeAsO}_4 + 2\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{CO}_2$

Экзотермичные химические характеристики приводят к автогенным реакциям, работающим при 93°C без необходимости дополнительного нагревания или охлаждения. Для пирита, концентрат измельчается до крупности 80% класса 10-12 микрон (в случае установки ГПМ Голд до 12-14 микрон), и окисление варьируется в зависимости от степени окисления, необходимой для разных материалов питания. В случае ГПМ Голд, проектная степень окисления сульфидной серы составляет 76% для достижения более 93% извлечения золота, хотя по отчетам установка работала при 60% окисления сульфидной серы и достигала 95% извлечение золота<sup>[7]</sup>. Для достижения степени окисления сульфидной серы как на проекте ГПМ Голд требуется время выдерживания в 30 часов.

## СРАВНЕНИЕ СМЕТ КАПИТАЛЬНЫХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАТРАТ

Сметы капитальных и эксплуатационных затрат, подготовленные для технологических схем процесса Альбион и автоклавного окисления, основаны на критериях проектирования процесса, перечня оборудования и другой сопутствующей документации.

Таблица 3 - Сравнение смет капитальных и эксплуатационных затрат

	Технологическая схема процесса Альбион	Технологическая схема автоклавного окисления
Производительность	100 000 т/год	100 000 т/год
Извлечение золота выщелачиванием	>93%	>94%
<b>Капитальные затраты, долларов США</b>	<b>66 200 000</b>	<b>95 900 000</b>
Прямые затраты	30 200 000	44 500 000
Косвенные затраты	9 700 000	13 500 000
Генподряд на проектирование, материально-техническое обеспечение и управление строительством	8 700 000	12 700 000
Непредвиденные расходы	15 300 000	22 100 000
Запчасти для капитального ремонта и первое наполнение	2 300 000	3 100 000
<b>Годовые эксплуатационные затраты, долларов США</b>	<b>6 000 000</b>	<b>10 000 000</b>
Реагенты	2 400 000	5 100 000
Энергия	2 300 000	2 500 000
Техническое обслуживание	1 200 000	2 300 000
Трудовые затраты *	-	-

\*В целях данного анализа принято, что требования по трудовым затратам одинаковые.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Существует четыре коммерчески проверенных метода предварительной обработки упорных золотосодержащих руд: обжиг, автоклавное окисление, биологическое окисление и сверхтонкое измельчение, одним из применений которого является процесс Альбион™. В рамках данного прямого сравнения процессу Альбион™ противопоставляется только автоклавное окисление, поскольку в настоящий момент данная технология чаще всего применяется для упорных руд в силу природоохранных разрешений. В одних странах процесс получения разрешений на строительство обжигового цикла сложный, в других странах мышьяксодержащие материалы разрешается перерабатывать только автоклавным окислением. Автоклавное окисление руд и концентратов с большим содержанием мышьяка используется более 30 лет, его можно смело называть проверенной технологией.

Преимуществом автоклавного окисления является более высокая степень окисления (почти полное

разложение сульфидов), что позволяет высвободить заключенное в минералах золото, и тем самым увеличить извлечение золота из любых упорных руд или концентратов. Автоклавное окисление может использоваться с различными загрузочными материалами от бедных цельных сульфидных руд до флотационных концентратов с высоким содержанием ценных компонентов. В дополнение к этому в зависимости от уровней содержания кислоты и соотношения железа и мышьяка почти все формы мышьяка формируют стабильные комплексы мышьяковистого железа, которые в настоящий момент считаются безопасными для окружающей среды. Руды и концентраты со значительным содержанием меди могут перерабатываться для извлечения как золота, так и меди. Значительная часть меди в руде представлена в растворимой форме, и ее можно извлечь путем осаждения ионов  $Cu^{++}$  в последующих процессах по технологической цепочке. В целях данной оценки производится сравнение только высококачественного, относительно чистого концентрата, поскольку процесс Альбион™ не подходит для переработки цельной руды по причине высоких затрат на измельчение руды.

Недостатком автоклавного окисления являются высокие капитальные затраты на специализированное оборудование и требования по более «технически» квалифицированному рабочему персоналу. Автоклавное окисление также может не подойти для руд и концентратов с большим содержанием серебра. Серебро часто вступает в реакции с формированием ярозита серебра, который не подвергается выщелачиванию цианидом. Следовательно, извлечение серебра может быть меньше, чем при других методах переработки. При отсутствии хорошего контроля, также возможно формирование основного сульфата железа и ярозита железа (вместо гематита), что затрудняет последующие процессы переработки и создает возможность утечки некоторого количества кислоты и металла в окружающую среду из пруда-хвостохранилища. Основные сульфаты железа вызывают проблемы в процессе цианирования в основном из-за того, что в определенных условиях композит разрушается, выпуская кислоту.

Как показано в сравнении затрат выше, процесс Альбион™ имеет меньшую капиталоемкость и более низкие эксплуатационные затраты в сравнении с традиционной технологией автоклавного окисления. В результате простой технологической схемы процесса Альбион™ используется меньше рабочих узлов, упрощается компоновка установки, используются умеренные рабочие температуры и условия атмосферного выщелачивания. В дополнение к преимуществам по затратам процесса Альбион, химические процессы, связанные с технологией, также предоставляют ряд преимуществ. Преимуществами химических процессов процесса Альбион™ являются фиксирование примесей в инертном осадке с помощью известняка без производства диоксида серы, фиксирование мышьяка в форме арсената железа и постоянная нейтрализация железа и кислоты в процессе.

Менее ощутимые преимущества процесса Альбион™ связаны с относительно простой в эксплуатации установкой, включая требования по менее квалифицированному рабочему персоналу для эксплуатации и обслуживания установки. В дополнение к этим преимуществам быстрый вывод установки на проектную мощность позволяет избежать затратных задержек, которые потенциально могут испортить экономическое обоснование.

Во время начальной разработки проекта все руды и концентраты должны пройти программу тщательных испытаний. В данном конкретном примере процесс Альбион™ является более предпочтительной технологией со стороны капитальных и эксплуатационных затрат. Однако, при автоклавном окислении извлечение золота выше, чем в процессе Альбион™. Конкретно в данном примере были получены высокие уровни извлечения золота выщелачиванием (93%) при сравнительно низком уровне окисления (76%) относительно автоклавного окисления. Следует отметить, что данные показатели специфичны для руды и концентрата, используемых на фабрике ГПМ Голд, поэтому для полной оценки методов переработки для других руд и концентратов требуется проведение тщательных металлургических испытаний.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ**

Выбор метода переработки упорных золотосодержащих руд подбирается на индивидуальной основе, на начальном этапе рекомендуется рассмотреть все четыре технологии: биологическое окисление (BIOX), обжиг, автоклавное окисление и процесс Альбион™. В данной работе проведен сравнительный анализ по капитальным и эксплуатационным затратам только для последних двух технологий. Металлургические показатели автоклавного окисления основаны на предположениях. Очень важно, чтобы процесс выбора подходящей технологии сопровождался проведением металлургических испытаний, поскольку все упорные руды отличаются друг от друга.

Проектная реализация процесса Альбион™ выполняется за более короткий период, технология менее технически сложная, обеспечивает более высокую степень готовности и более надежные металлургические показатели. Более высокие показатели по извлечению в автоклавном окислении



должны сопоставляться с остальными проектными параметрами для определения оптимальной рентабельности проекта.

Количественно выражаемая рентабельность и качественные преимущества в части эксплуатации и технического обслуживания для процесса Альбион™ делают его конкурентоспособной альтернативой для переработки упорных золотых концентратов и позволяют рассматривать его включение в технологическую схему при разработке проектов для упорных золотых руд.

## **ПРИЗНАТЕЛЬНОСТЬ**

Принято считать, что по автоклавному окислению золота и практическому применению проверенной автоклавной технологии имеется большой объем знаний и богатый опыт, накопленные и хорошо задокументированные. Всем причастным к этим знаниям авторам и соавторам выражается признательность и благодарность.

В открытый доступ поступает все больше детальной информации по процессу Альбион™, которую можно использовать для промышленных исследований, за все приложенные в этом направлении усилия выражается признательность компаниям ГПМ Голд, Glencore Technology и Core Resources.

Эта работа стала возможна только благодаря активной поддержке и щедрому предоставлению информации от Glencore Technology и маркетолога и организатора испытаний по процессу Альбион™, компании Core Resources. В частности, существенный вклад внесли Пол Войт, Даниэль Малла, Майк Хорн и Питер Ронер.

Рабочие группы компании Jacobs в Денвере и Брисбене активно сотрудничали при подготовке данной работы. Хотелось бы отметить работу по составлению смет командой специалистов из Денвера, а также опыт компании Jacobs и выразить признательность за доступ к базе данных, в частности, для получения информации по автоклавному окислению. Следует подчеркнуть, что теоретическая технологическая схема автоклавного окисления, использованная в данном сравнительном анализе, требует допущений и заключений, которые не обязательно применимы к конкретному реализованному проекту.

Авторы выражают признательность компании Jacobs за разрешение и оказанную поддержку для данной работы.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- [1] А. Аксенов, А. Сенченко, Ю. Середкин, А. Васильев (2016) Технология переработки упорных золотосодержащих концентратов на основе ультратонкого измельчения и атмосферного окисления. Работа представлена на конференции IMPC 2016, Квебек, Канада, 11-15 сентября 2017.
- [2] Aylmore M, Jaffer A. (2012) Evaluating Process Options for Treating Some Refractory Ores. Paper presented at the proceeding of ALTA 2012, Perth, Australia, 27 May – 1 June 2015. [Оценка технологических вариантов переработки некоторых упорных руд]
- [3] Bartsch P, Hourn M, Ngoviky K, Rohner P. (2005) Benefits of Using the Albion Process for a North Queensland project, and a Case Study of Capital and Operations Cost Benefits Versus Bacterial Oxidation and Pressure Oxidation. Paper presented at the Randol Gold Conference, Perth, Australia, 21-24 August 2005. [Преимущества применения процесса Альбион на проекте в Северном Квинсленде и практический анализ преимуществ в разрезе капитальных и эксплуатационных затрат в сравнении с бактериальным и автоклавным окислением]
- [4] Dunn G, Ibrado A, Parkison G, Mora N, Teo YY. (2014) Pressure Oxidation of Refractory Gold Ores: The Metates Gold Project Experience. Paper presented at the proceedings of ALTA 2014, Perth, Australia, 24- 31 May 2014. [Автоклавное окисление упорных золотых руд: опыт проекта Metates Gold]
- [5] Hourn M, Kloiber-Deane O, Voigt P, Walker D. (2018) Long Term Performance of the GPM Albion Process™ Plant. Paper presented at the CIM Convention, Vancouver, Canada, 6-9 May 2018. [Долгосрочные показатели установки Процесса Альбион™ компании ГеоПроМайнинг]
- [6] Hourn M, Mallah D, Turner D, Voigt P. (2015) Commissioning and Ramp-up of the Albion Process at the GPM Gold Project. Paper presented at the proceedings of ALTA 2015, Perth, Australia, 23-30 May 2015. [Пуск в эксплуатацию и вывод на проектную мощность процесса]

Альбион на золотоизвлекательной фабрике ГПИМ Голд]

- [7] Hourn M, Turner D. (2012) Commercialisation of the Albion Process. Paper presented at the proceedings of ALTA 2012, Perth, Australia, 27 May – 1 June 2015.[Промышленное внедрение процесса Альбион]