

Первая промышленная установка Процесс Альбион™ для получения меди

Пол Войт^{1*}, Дэвид Литтлфорд², Гленн Стипер¹, Майк Хорн¹

1. *Glencore Technology, Австралия*

2. *Sable Zinc Kabwe Limited, Замбия*

АННОТАЦИЯ

«Sable Zinc Kabwe Limited» (далее "**Sable**") - обогатительная фабрика по переработке руд цветных металлов, расположенная в двух километрах к югу от города Кабве в Центральной провинции Замбии. Данный регион имеет богатую историю горной добычи и переработки полезных ископаемых, с 1900-ых до середины 1990-ых годов являлся основным производителем свинца и цинка. В 2006 году на обогатительной площадке Sable был построен медный завод по переработке покупных медных и кобальтовых руд и концентратов. Текущая технологическая схема построена на цикле выщелачивания цельной руды, жидкостной экстракции и производстве 8 000 т/г катодной меди высокого качества марки А ЛБМ. В настоящее время завод находится на консервации, поэтому Glencore Plc (далее "**Glencore**") воспользовались этой возможностью, чтобы перевести его на технологию Процесс Альбион™. Процесс Альбион™ с целью переработки местных концентратов неподходящих или экономически не выгодных для плавки. Установка Процесс Альбион™ состоит из мельницы IsaMill™ M100, работающей в кислотных средах таким образом, что рафинат из последующих этапов процесса используется для разжижения концентрата, поставляемого на площадку, тем самым максимально увеличивая содержание меди в растворе и снижая расход воды. Тонкоизмельченный концентрат затем подается в действующие реакторы из нержавеющей стали, адаптированные под технологию Процесс Альбион™ путем установки системы ультразвуковых эжекторных трубок HyperSparge™ для подачи кислорода. После этого продукт выщелачивания отправляется на действующее оборудование для разделения на твердую/жидкую фазы и в циклы извлечения меди и кобальта.

Установка была спроектирована на основании испытаний, проведенных на условном концентрате, тем не менее, гибкий подход к проектированию позволяет перерабатывать широкий диапазон концентратов. Это выводит установку Процесс Альбион™ на производственной площадке Sable на позицию регионального центра по переработке сырья, которое не выгодно перерабатывать традиционными способами.

ВВЕДЕНИЕ

Производственная площадка Sable Zinc Kabwe Limited (далее "Sable") находится в 2 км к югу от города Кабве и в 140 км к северу от Лусаки в Центральной провинции, Замбия. В 1902 году здесь были обнаружены богатые месторождения цинка и свинца, до середины 1994 года в самом городе и его окрестностях действовали многочисленные рудники и обогатительные фабрики. В 2000 году хвостохранилища рудника Кабве были проданы компании Sable, новой учрежденной компании, в рамках сделки на покупку других земельных участков и объектов. До 2004 года Sable производила катодный цинк, перерабатывая хвосты промывки на установке жидкостной экстракции/электровиннинга. В 2004 году компанию Sable приобрела Южно-Африканская горно-добывающая компания Metorex Limited (далее "Metorex"), а в 2006 году была построена установка жидкостной экстракции/электровиннинга меди/кобальта для производства катодной меди из малахитовой руды, поставляемой из Демократической Республики Конго. В 2011 году компания Jinchuan Group International Resources Co Limited приобрели компанию Metorex, а Sable в свою очередь была продана дочерней компании Glencore Plc (далее "Glencore").

В ноябре 2014 года Glencore поставили Sable на консервацию из-за падения цен на металлы, сопряженное с ограничениями на денежные потоки, вызванные удержанием возврата налогов на добавленную стоимость согласно Правилу 18(1)(b) налогового департамента Замбии.

В 2015 году Glencore провели оценку применимости технологии Процесс Альбион™ для переработки бедных концентратов, которые невозможно перерабатывать на плавильных заводах из-за ряда ограничений, включая имеющуюся усредненную шихту, подаваемую на медеплавильную установку, низкое содержание меди, низкое количество топлива вследствие использования несulfидных материалов, высокое содержание кобальта и примесей, таких как диоксид кремния или оксид алюминия. Испытания проводили по ряду проб, чтобы оценить гибкость процесса и, что самое важное, сделать оценку по извлечению меди и кобальта.

После успешного завершения этого испытания было принято решение перевести действующую медно-кобальтовую установку Sable на технологию Процесс Альбион™, с помощью которой можно перерабатывать медно-кобальтовые концентраты, содержащие упорные минералы, такие как халькопирит (CuFeS_2) и карролит (CuCoS_4). При данном переходе планируется использовать имеющуюся инфраструктуру, включая чаны для выщелачивания из нержавеющей стали, цикл извлечения кобальта и установку жидкостной экстракции/электровиннинга меди. Номинальная производительность установки 16 000 тонн катодной меди марки А в год. Кобальт будет извлекаться через процесс осаждения карбоната.

Технология Процесс Альбион™ — это процесс атмосферного выщелачивания для окисления упорных концентратов золотых руд и руд цветных металлов в системе двух и трехвалентного железа для последующего извлечения конечных продуктов. Данная технология поставляется на мировой рынок компанией Glencore Technology ("GT"). Процесс состоит из двух стадий. Первая стадия - ультратонкое измельчение на мельнице IsaMill™, где концентрат измельчается до такой крупности, чтобы на этапе окисления продукты реакции не пассивировали поверхность минерала и не препятствовали выщелачиванию. Вторая стадия - окисление ультратонкого концентрата посредством ультразвуковой подачи кислорода с помощью системы HyperSparge™, разработанной GT. Этот процесс протекает автотермически при атмосферном давлении и в слабокислых средах.

В случае цветных металлов, например, меди, растворенные металлы затем извлекаются из раствора с помощью жидкостной экстракции/электровиннинга. В случае упорного золота окисленная пульпа подвергается цианированию или схожему процессу для извлечения золота и серебра.

Технология Процесс Альбион™ реализована в промышленных масштабах на пяти цинковых и золотоизвлекательных производствах, о которых имеются подробные отчеты (Hourn & Turner, 2010; Hourn & Turner, 2012; Hourn et al., 2014; Voigt et al., 2015; Senshenko et al., 2016). Установка Процесс Альбион™ на площадке Sable станет первой промышленной установкой для выщелачивания меди и кобальта.

В настоящей работе описывается программа проведения испытаний и проектирование технологического процесса, выполненные для модификации производственной площадки Sable, включая мельницу IsaMill™, которая впервые будет работать на рафинате. Далее в данной работе описывается установка Процесс Альбион™ для Sable, и дается примерный график реализации проекта.

ПРОГРАММА РАЗРАБОТКИ

В рамках разработки процесса Процесс Альбион™ была выполнена оценка как технических, так и экономических аспектов, для принятия решения о необходимости перехода на следующий этап разработки. Программу разработки, которая кратко описана в Таблице 1, Glencore Technology выполняет в соответствии Методическими Рекомендациями №18R-97 Международной Ассоциации Развития Стоимостного Инжиниринга ("AACEI") (Christensen and Dysert, 2005).

Таблица 1 Этапы разработки проекта по методу AACEI

Класс исследования	Цель	Нижний предел точности (%)	Верхний предел точности (%)	Выполнение проекта (%)	Испытания
Класс 5	Решение о продолжении или прекращении	-50 до -20	+30 до +100	0 - 2	Стендовые испытания x 1
Класс 4	Предварительное технико-экономическое обоснование	-30 до -15	+20 до +50	1 - 15	Стендовые испытания x 5
Класс 3	ТЭО	-20 до -10	+10 до +30	10 - 40	Стендовые испытания x 10
Класс 2	Подготовка к тендеру	-15 до -5	+5 до +20	30 - 70	Пилотные испытания / демонстрация
Класс 1	Исполнение	-10 до -3	+3 до +15	50 - 100	-

Каждый последующий класс сметы представляет собой более детальное техническое исследование и соответствующий уровень испытаний для обоснования технического исследования. В случае пилотных и демонстрационных установок для рабочего проектирования и реализации проекта они не требуются, так как GT могут получить всю проектную информацию из стендовых испытаний, в то же время обеспечивая гарантии по основным показателям. Обычно пилотные и демонстрационные работы проводят для

исполнения требований по программе управления рисками компаний или инвесторов проекта.

На уровне класса 5 GT может дать адекватную оценку пригодности технологии Процесс Альбион™ на основании примерных данных о минералогическом и элементарном составе шихты и нашего опыта, необходимости в проведении испытаний нет. С помощью базы данных по капитальным затратам и эксплуатационной информации в рамках проекта, можно быстро просчитать капитальные и эксплуатационных затраты проекта. Затем проводится оценка класса 4, сопровождаемая предварительной программой испытаний, выполняемых на аккредитованной лабораторной установке Процесс Альбион™. Класс 4 дает оценку о целесообразности продолжения проекта, и на этом же этапе подтверждается основная проектная информация, например, предварительный размер установки, степень окисления и извлечения металла.

Так как на установке Процесс Альбион™ для Sable будут перерабатывать ряд концентратов, было получено четыре представительных образца концентратов из данного региона для проведения испытаний по технологии Процесс Альбион™ в лаборатории HRLTesting, расположенной в Альбион, Квинсленд.

Исследования

От сторонних поставщиков было получено четыре образца концентрата (A – D), которые отражают типовое качество концентрата, доступного на местном рынке. Анализ всех образцов концентрата представлен в Таблице 2.

Таблица 2 Анализ покупных концентратов

Компонент	A (%)	B (%)	C (%)	D (%)
Cu	27,7	39,3	28,5	34,5
Fe	7,5	5,7	4,9	8,4
Co	0,04	0,03	3,2	3,7
Всего S	5,6	8,5	12,4	18,7
S в сульфиде	5,6	7,5	11,8	18,7
Карбонаты	6,4	8,4	7,5	12,1
Малахит	23,7	31,1	12,1	10,2
Дигенит	8,2	9,8	11,8	-
Халькопирит	9,3	15,2	16,2	14,2
Брошантит	7,9	15,1	8,8	-
Карролит	-	-	8,5	9,8
Пирит	-	-	-	4,5
Джарлеит	-	-	-	13,1
Борнит	-	-	-	17,8
Несульфидные жильные минералы	50,9	28,8	42,6	30,4

Использование концентратов, выбранных для проведения исследований, на плавильных заводах влекло за собой значительные штрафы из-за относительно низкого содержания топлива и высокого содержания нерастворимых веществ. В нескольких образцах

концентратов также было выявлено высокое содержание кобальта, который невозможно извлечь в процессе плавки. Ранее уже проводились испытания на низкосортных материалах, и было обнаружено, что они хорошо подходят для переработки в условиях технологии Процесс Альбион™ (Voigt et al., 2016). Основной упор в данном испытании был сделан на подтверждение показателей и экономической целесообразности переработки тех концентратов, которые не подходят для традиционной схемы переработки, и определение пригодности образцов для переработки на установке Процесс Альбион™.

Результаты по экстракции меди и кобальта приведены в Таблице 3. Показания по извлечению даны по стадии выщелачивания Процесс Альбион™, а не по общему извлечению.

Таблица 3 Результаты испытаний

Компонент	A	B	C	D
Извлечение Cu в технологии Альбион (%)*	98,9	99,2	99,5	99,3
Извлечение Co в технологии Альбион (%)*	94,7	96,6	95,9	94,7
Окисление сульфидов (%)	83	74	93	77
Длительность выщелачивания (ч)	12	12	36	36
Продолжительность испытания (ч)	48	48	48	48

По всем образцам концентратов извлечение меди было либо равным, либо превышало уровень, которого можно было добиться на плавильном заводе, даже с учетом всего цикла технологического процесса завода. Это ожидаемый результат, так как на установке Процесс Альбион™ извлечение меди достигает более 99% для тех образцов проб, где вся медь представлена первичными сульфидами, а не смесью первичных и вторичных сульфидов.

Важно отметить, что образцы проб не содержали пирит, что необходимо для стимуляции разложения халькопирита при других процессах атмосферного выщелачивания.

Другим отличительным признаком данных испытаний стало извлечение кобальта. Для фабрик, на которых невозможно экономически выгодно разделить медь и кобальт, или тех фабрик, где кобальт производится в виде попутного продукта с высоким содержанием меди, технология Процесс Альбион™ дает возможность извлечения обоих минералов. Ожидается, что важность этой технологической особенности будет только расти, так как спрос на кобальт увеличивается, что ведет к повышению цен на него.

Время выдерживания при выщелачивании было обусловлено в первую очередь скоростью извлечения кобальта, так как кинетика выщелачивания минералов карролита немного ниже, чем у халькопирита. Для проб C и D максимальное извлечение меди было достигнуто в течение 24 часов. Пробы A и B содержали меньше упорных материалов и незначительное количество кобальта.

Техническое обоснование

Также на основании результатов испытаний было подготовлено техническое обоснование. В отличие от технического обоснования для установки, строящейся с нуля, основой данного обоснования стала модернизация действующего объекта Sable с предоставлением рекомендаций по установке необходимого нового оборудования.

Важные выводы по результатам испытаний были учтены в проекте:

- Степень окисления сульфидов – для определения мощности кислородной установки и подготовки массового и энергетического баланса
- Время выдерживания при выщелачивании – для обеспечения достаточных мощностей для выщелачивания различного сырья и достижения целевого уровня извлечения меди и кобальта
- Крупность измельчения и размер IsaMill™ – в будущем на установке возможно будет перерабатываться концентрат неизвестной крупности, поэтому мельница IsaMill™ должна быть достаточно гибкой, чтобы соответствовать возможным вариациям
- Водный баланс – IsaMill™ спроектирована для измельчения рафината с целью управления водным балансом в цикле и содержанием меди
- Кислоторастворимая медь – было обнаружено, что в некоторых испытанных образцах содержалось до 50% водорастворимой меди, это необходимо учесть при выборе профиля выщелачивания и материалов изготовления мельницы IsaMill
- Разнообразие шихты – на установке будет перерабатываться концентрат различного качества, что может повлиять на показатели установки, если эти материалы не будут правильно усредняться. Шихту необходимо смешивать, чтобы обеспечить присутствие достаточного количества топлива в концентрате
- Разное содержание сульфидов – на установке будут перерабатываться концентраты с различным содержанием сульфидов и оксидов меди. Для оксидов не требуется ультратонкое измельчение, и поэтому временами можно будет пропускать этап измельчения на мельнице IsaMill™. Оксиды также имеют минимальный энергетический потенциал, что может повлиять на рабочую температуру окислительного выщелачивания.

Технологическая блок-схема Процесс Альбион™ на площадке Sable и циклов извлечения металлов показаны на Рисунке 1.

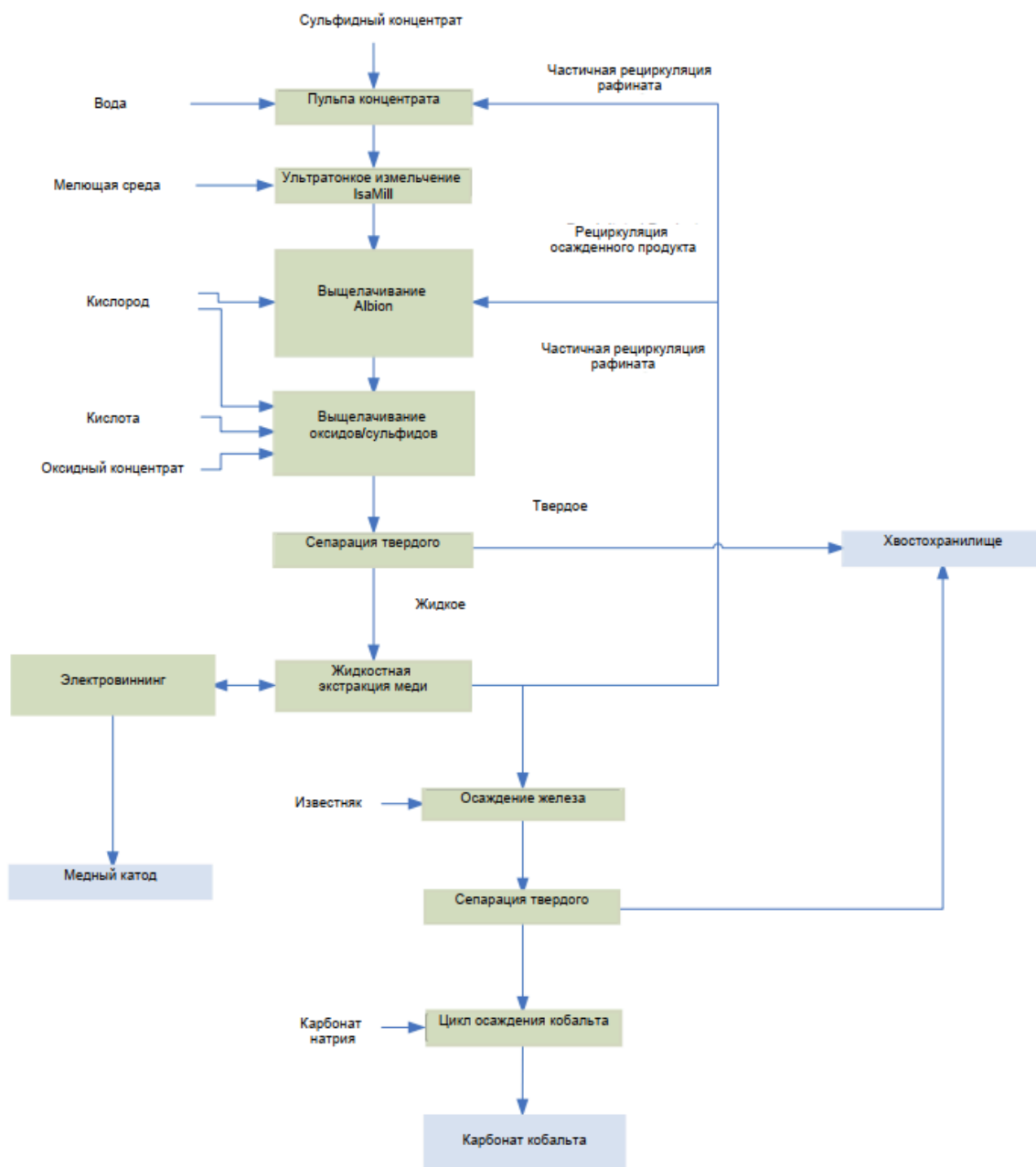


Рисунок 1 Технологическая блок-схема Процесс Альбион™ на площадке Sable

Сначала концентрат распульповывается в рафинате и воде в баке с мешалкой. Питание на этот чан будет подаваться партиями через питатель с конвейером, в зависимости от уровня. Во время распульковки часть меди будет выщелачиваться из концентрата в раствор.

На мельницу IsaMill™ M100 питание будет подаваться непрерывно, здесь концентрат измельчается до крупности P80 класса 12-14 микрон, в зависимости от типа загружаемого материала. Корпус IsaMill™ будет изготовлен из нержавеющей стали марки 316L, материал всех смачиваемых деталей подбирается для использования в кислотных средах.

Из IsaMill™ материал подается непосредственно в первый из пяти реакторов окислительного выщелачивания, выполненных из нержавеющей стали. Реакторы выщелачивания будут оснащены крышкой и вытяжной трубой. Размеры мешалок с двойными лопастями должны быть подобраны таким образом, чтобы обеспечить дисперсию газа и прокачку. Кислород

подается у основания реактора с помощью системы ультразвуковой подачи газа HyperSparge™, разработанной GT. Пульпа самотеком стекает в следующие реакторы по системе желобов, что позволит обходить реакторы при проведении на них техобслуживания.

В зависимости от профиля выщелачивания, оксиды с относительно высокой скоростью выщелачивания добавляются в технологическую цепочку позже в реакторы выщелачивания 3 или 4 через питатель с конвейером. Для управления водным балансом распульповка оксидного материала не производилась. На этом этапе может потребоваться дополнительное добавление кислоты и рафината. Обычно необходимые объемы кислоты в системе покрываются за счет локального производства кислоты в ходе химических реакций и кислоты из рафината.

После того как медь и кобальт переходят в раствор, на этапе сепарации твердого/жидкого получают твердую фазу, которую сбрасывают в хвостохранилище. Насыщенный медный раствор направляется на установку жидкостной экстракции. Большая часть рафината возвращается обратно в процесс. Из рафината отбирают раствор для извлечения кобальта.

Отобранный раствор сначала нейтрализуют с помощью известняка для выведения остаточного железа. После чего раствор, содержащий в основном кобальт, направляют на карбонатное осаждение для извлечения карбоната кобальта.

Насыщенный электролит с жидкостной экстракции направляется на установку электровиннинга для извлечения катодной меди марки А (ЛБМ).

По Рисунку 1 видно, что почти все оборудование, необходимое для Процесс Альбион™, имеется на объекте Sable. Требуется установить три новых реактора для выщелачивания из нержавеющей стали, одну мельницу IsaMill™ M100 и небольшую кислородную установку.

Основные критерии проектирования для данного проекта указаны в Таблице 4.

Таблица 4 Критерии проектирования технологии Процесс Альбион™ для Sable

Критерии	Ед. изм.	Номинальное значение	Минимальное значение	Проектное значение
Общая производительность (сулф. + окс.)	т/год	25 792	7 738	29 661
Общая производительность	т/ч	3,2	0,96	3,7
Содержание меди	%	25%	15%	35%
% сульфидной шихты	%	50%	50%	50%
Общая медь	т/год	6 448	1 161	10 381
Удельная энергия для тонкого измельчения	кВтч/т	25	18	35
Время пребывания при окислительном выщелачивании - сульфиды	ч	36	24	48
Конечное содержание меди	г/л	35	35	35
Содержание меди в рафинате	г/л	4	4	4

Массовый и энергетический баланс был разработан для оценки разнообразия концентратов на основании результатов испытаний, данных от поставщиков и параметров действующей установки на площадке Sable. Массовый и энергетический баланс использовались для детальной проработки критериев проектирования технологического процесса, которые затем применялись для составления перечня оборудования и электрических нагрузок.

Перечень оборудования затем сравнили с оборудованием, имеющимся на площадке, и составили окончательный перечень необходимого оборудования и разработали схемы технологического процесса.

Смета затрат была подготовлена на основании технического обоснования и внесена в экономическую модель, показывающую, что проект значительно превышал критерии инвестирования по проектам Glencore.

УСТАНОВКА ПРОЦЕСС АЛЬБИОН™ ДЛЯ SABLE

На основе результатов технического обоснования Класа 4 были внесены соответствующие изменения для снижения сметы затрат до Класа 3, включая улучшения по массовому и энергетическому балансу для оценки более широкого диапазона сырья и подтверждения правильности выбранных размеров оборудования.

Перечень основного оборудования установки Процесс Альбион™ для Sable и его размеры приведены в Таблице 5 с пометкой, если оборудование уже имеется на объекте Sable.

Таблица 5 Перечень основного оборудования

Наименование оборудования	Кол-во	Размер	Назначение	Существующее?
Чан-репульпатор концентрата	1	Объем - 10м ³	Распульповка сульфидного концентрата	Да
IsaMill	1	M100	Тонкое измельчение сульфидного концентрата в кислотных средах	Нет
Реакторы окислительного выщелачивания из нержавеющей стали	5	Объем - 100м ³	Выщелачивание концентрата сульфидных и оксидных руд	Да - 2 из 5
Эжекторные трубки HyperSparge™	5	Патрубок - 4мм	Ультразвуковая подача кислорода	Нет
Генератор кислорода	1	10 т/сут	Производство кислорода для процесса выщелачивания	Нет
Сгуститель	1	Диаметр 24м	Сгущение осадка для фильтрации	Да
Горизонтальные ленточные фильтры	2	Филт. площадь - 44м ²	Разделение твердого/жидкого	Да
Хвостовое хозяйство	1	-	Хранение твердой фазы	Да
Установка жидкостной экстракции/электровиннинга меди	2	1500 т/мес каждая	Извлечение меди марки А (согласно ЛБМ)	Да
Установка осаждения кобальта	1	50 т/мес	Извлечение кобальтового концентрата	Да

По Таблице 5 видно, что капиталоемкость модернизации существующего оборудования под технологию Процесс Альбион™ относительно низкая.

На действующем заводе имелось два из пяти необходимых реакторов для окислительного выщелачивания из нержавеющей стали. Имеющиеся реакторы выщелачивания были изготовлены из двухфазного сплава 2304, который подходит для окислительного выщелачивания с присутствием железа, для новых баков использовали тот же материал. Новые реакторы для однообразности изготовили по тем же размерам и спецификациям, что и существующие.

Кроме новых реакторов требовались небольшой генератор кислорода и мельница IsaMill™ M100. Мельницу IsaMill™ M100 модифицировали под режим работы в рафинате. Это дает значительную эксплуатационную гибкость, т.к. становится легче управлять водным балансом, требуется меньше отводов раствора и появляется возможность использовать больше кислоты из рафината.

Расчеты по массовому переносу кислорода предполагают, что имеющиеся мешалки для выщелачивания оксидов не будут оптимальными для обеспечения эффективного массового переноса кислорода. Несмотря на то, что большая часть требуемой энергии будет идти от HyperSparge™, был также включен запас для замены мешалок, если это потребуется позже.

Обобщенный график проекта, включая разработку проекта, показан на Рисунке 2.

	05/15	06/15		08/16	09/16	10/16	11/16	12/16	01/17	02/17	03/17	04/17	05/17	06/17	07/17
Начальные испытания			//												
Проектирование процесса			//												
Модернизация															
Изготовление IsaMill			//												
Транспортировка IsaMill на площадку			//												
Монтаж			//												
Пусковые работы			//												

Рисунок 2 Обобщенный график проекта

График составлен с учетом времени на изготовление мельницы IsaMill™ и транспортировки на площадку. Время изготовления и поставки прочего оборудования укладывается в этот период. Все работы по модернизации имеющегося оборудования будут завершены до поставки мельницы IsaMill™ на площадку.

В свете этого пуско-наладочные работы большей части оборудования будут завершены до прибытия мельницы IsaMill™ на площадку. На основании времени, потраченного на пусковые работы и выход на проектные мощности по всей установке Процесс Альбион™ на проекте GPM Gold в Армении (менее 3 месяцев), установка Sable Процесс Альбион™ должна быть запущена в течение одного месяца (Voigt et al., 2015).

ВЫВОДЫ

В данной работе приведено описание процесса разработки установки Процесс Альбион™ для Sable, используемой для переработки местных концентратов, которые не подходят для традиционных способов переработки. Экономическая целесообразность проекта очень высокая, благодаря использованию и переводу имеющегося оборудования на новую технологию. Ожидается, что после того, как установка будет введена в эксплуатацию, она станет примером того, как можно модернизировать имеющееся оборудование или с небольшими капитальными вложениями установить новое оборудование для переработки упорных медных концентратов и интегрировать его в действующую схему жидкостной экстракции/электровиннинга или работу производственной площадки.

С началом производства в начале 2017 года технология Процесс Альбион™ выходит на новый удивительный этап – применение первых промышленных установок для выщелачивания медных и кобальтовых концентратов. Дальнейшие подробности будут представлены после запуска.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Christensen, P.C. and Dysert, L.R, 2005, Recommended Practice No. 18R-97 Cost Estimate Classification System – As Applied in Engineering, Procurement and Construction for the Process Industries, Association for the Advancement of Cost Engineering International (AACEI). [Методическая рекомендация №18R-97 Система классификации смет затрат, применяемая в проектировании, закупках и строительстве для промышленных производств, Международная ассоциация развития стоимостного инжиниринга (AACEI)]

Hourn M. and Turner D.W., 2010, Albion Process for treatment of refractory ores, ALTA Conference Proceedings, Perth, Australia, June, 2010. [Технология Albion Process для переработки упорных руд]

Hourn M. and Turner D.W., 2012, Commercialisation of the Albion Process, ALTA Conference Proceedings, Perth, Australia, June, 2012. [Промышленное внедрение технологии Albion Process]

Hourn M., Voigt, P. and Turner D.W., 2014, Development of the Albion Process plant to treat refractory concentrates from the GPM Gold Project, Hydroprocess Conference, Vina del Mar, Chile, July, 2014. [Разработка установки Albion Process для переработки упорных концентратов на золотодобывающем проекте GPM Gold]

Senshenko A.Y., Aksenov A.V., Vasiliev A.A. and Seredkin, Y.G., 2016, Technology for processing of refractory gold-containing concentrates based on ultrafine grinding and atmospheric oxidation, IMPC Conference Proceedings (yet to be released), Montreal, Canada, September, 2016. [Технология переработки упорных золотосодержащих концентратов на основе ультратонкого измельчения и атмосферного окисления]

Voigt, P., Hourn, M., Mallah, D. and Turner, W., 2015, Commissioning and ramp up of the Albion Process at the GPM Gold Project, World Gold Conference Proceedings, Johannesburg, South Africa, October 2015. [Пуск в эксплуатацию и вывод на проектную мощность процесса Albion на золотоизвлекательной фабрике GPM Gold]

Voigt, P., Hourn, M. and Mallah, D., 2016, Treatment of low grade materials, MINEX Conference Proceedings, Moscow, Russian Federation, November 2016. [Переработка бедных материалов]