

# Массовый перенос кислорода в технологии Процесс Альбион™: от лаборатории до промышленной установки

Пол Войт, Майк Хорн и Даниэль Малла  
*Glencore Technology, Австралия*

## АННОТАЦИЯ

Успешный запуск и вывод на проектную мощность установки Процесс Альбион™ на золотодобывающем проекте ГПМ связан с успешным масштабированием процесса по результатам эксплуатации опытных установок в периодическом и непрерывном режиме (Voigt, 2016). Критичные показатели по кинетике реакции и времени пребывания, крупности измельчения и плотности пульпы были определены в лабораторных условиях и успешно применены в промышленном масштабе. Ограничения испытаний в малом масштабе заключаются в невозможности точного измерения некоторых показателей, при этом параметры масштабирования находятся в прямой зависимости от габаритов оборудования, которые невозможно протестировать на лабораторном оборудовании. Скорость массового переноса кислорода является одним из таких параметров, так как она определяется взаимодействием множества факторов, включая температуру пульпы, химические свойства раствора и пульпы, вязкость пульпы, тип, размер и мощность мешалки, время пребывания пузырьков кислорода, чистоту кислорода, форму чана и метод подачи кислорода. Производство кислорода является существенной статьей эксплуатационных затрат технологии Процесс Альбион™. Для экономичной работы установки Процесс Альбион™ при атмосферном давлении ключевым аспектом является возможность эффективного переноса кислорода с максимальной утилизацией кислорода, подаваемого в процесс. Для обеспечения этого условия Glencore Technology разработали сверхзвуковые эжекторные трубки HyperSparge™. В данной работе выполняется сравнение трубки HyperSparge™ с другими технологиями подачи кислорода для количественного представления преимуществ подачи кислорода через сверхзвуковые газоструйные устройства при масштабировании системы массового переноса кислорода. В настоящей работе рассматриваются данные проекта ГПМ, чтобы показать, что очень высокий коэффициент утилизации кислорода может быть достигнут при хорошо проработанной системе массового переноса кислорода.

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из сложных задач при проектировании химического реактора является масштабирование процессов от лабораторного до промышленного уровня. В частности, сложность заключается в том, что невозможно с точностью выполнить моделирование процессов при лабораторных экспериментах ввиду физических габаритов и сложной конфигурации полноразмерной системы. Одним из примеров является проектирование систем массового переноса кислорода в процессе атмосферного окислительного выщелачивания, таком, как Процесс Альбион™. Некоторые проблемы с малоразмерным оборудованием связаны с тем, что удельная подводимая энергия мешалки искусственно завышена, время пребывания пузырьков в резервуаре искусственно занижено, парциальное давление кислорода в основании резервуара искусственно занижено, а способ подачи кислорода в процесс может отличаться от промышленной установки. Некоторые проблемы обусловлены сложностью системы, связанной с динамическим характером процесса, включая наличие твердых веществ, обратных потоков и микроэлементов, также присутствуют отклонения от реального процесса в технологической установке, такие как прерывание подачи питания или колебания в качестве питания.

Для подобных процессов особенно важно понимание основ, чтобы ключевые данные, собранные при проведении экспериментальных работ в лабораторных условиях, можно было применить в рамках отработанного проекта для обеспечения эффективности и приемлемости промышленного процесса.

Для максимального повышения эффективности массового переноса кислорода, эксплуатационной готовности, простоты и безопасности Glencore Technology (GT) разработали сверхзвуковую газовую трубку HyperSparge™. Изначально разработанная для подачи кислорода на установку Процесс Альбион™, технология HyperSparge™ нашла применение и в других процессах с использованием воздуха, кислорода, двуокиси серы и газовых смесей. По всему миру установлено более 400 систем HyperSparge™ в таких процессах как потоковая подготовка пульпы, ферментирование, водоочистка, процессы CIP/CIP и окислительное выщелачивание.

В настоящей работе технология HyperSparge™ сравнивается с другими технологиями подачи газа, такими как кольцевые распределители и сужающиеся сопла. Определены ключевые данные, необходимые для масштабирования от лабораторных условий до промышленной установки. Изучены данные, полученные на золотодобывающем предприятии ГПМ в Армении, где система массового переноса кислорода была успешно спроектирована; представлены замечания по эксплуатационным преимуществам системы HyperSparge™ в отличие от других систем, таких как распределители из спеченного материала.

## МАССОВЫЙ ПЕРЕНОС КИСЛОРОДА

Технология Процесс Альбион™ представляет собой процесс атмосферного окислительного выщелачивания, который был разработан GT в 1994 году. Процесс подробно описывается в литературных источниках (Hourn & Turner, 2010; Hourn & Turner, 2012; Hourn et al., 2014; Voigt et al., 2015; Senshenko et al., 2016). Окисление пирита является одной из ключевых реакций в химическом режиме Процесс Альбион™, как показано в уравнении 1.



Первым этапом в механизме окисления является растворение кислорода в жидкой фазе после переноса электронов частично за счет воздействия пары двухвалентных и трехвалентных ионов железа и воздействия растворенного кислорода, который вступает в реакцию с пиритом. Следовательно, скорость переноса кислорода является критичной для эффективности процесса, ее можно упростить для реактора, как показано в уравнении 2 (Middleton & Smith, 2004)

$$\text{Скорость переноса } O_2 = k_L a \cdot V \cdot (C_{\text{нас.}} - C) \quad [2]$$

где  $k_L$  - коэффициент массопереноса через пленки жидкости ( $\text{м.с}^{-1}$ ),  $a$  - удельная площадь поверхности газа ( $\text{м}^{-1}$ ),  $V$  - объем реактора ( $\text{м}^3$ ),  $C_{\text{нас.}}$  - растворимость кислорода в состоянии насыщения ( $\text{г.м}^{-3}$ ),  $C$  - уровень кислорода в устойчивом состоянии ( $\text{г.м}^{-3}$ ). Значения  $k_L$  и  $a$  обычно комбинируются для предоставления коэффициента массового переноса кислорода, того параметра, который необходимо максимально повысить.

На практике  $k_L a$  необходимо максимизировать посредством определения соотношения подводимой мощности через распределитель и мешалку, с последующим выбором оборудования, которое соответствует требованиям скорости переноса кислорода в системе. Middleton (1992) упростил уравнение, применив соотношения коэффициента  $k_L a$  к подводимой энергии, как показано в уравнении 3.

$$k_L a = K \cdot (U_s)^a \cdot (P_g/V)^b \quad [3]$$

Где  $K$  - постоянная коалесценции,  $U_s$  - поверхностная скорость газового потока ( $\text{м.с}^{-1}$ ),  $P_g$  - поглощаемая мощность (Вт). Также применяется поправка на температуру, так как повышение температуры приводит к уменьшению вязкости пульпы и поверхностного натяжения, что повышает площадь межфазной поверхности массового переноса. Коэффициенты  $a$  и  $b$  являются эмпирическими постоянными, которые применимы только к определенной системе и определяются по результатам испытаний.

Существует множество теоретических связей между  $k_L a$  и подводимой энергией, которые описывались в литературе, большинство работ основано на данных биохимических реакторов, то есть расширение процесса окислительного выщелачивания может представлять сложности при ограниченной применимости, так как существенно отличаются интенсивность перемешивания, химический режим системы, рабочая температура и методы ввода кислорода (Van't Reit, 1979; Vasconcelos et al., 1998; Oguz et al., 1987; Moo-Young & Blanch, 1981). Большая часть взаимосвязей также получена на очень небольших размерах лабораторных резервуаров, 10 литров или менее.

Наилучшим методом обеспечения успешного промышленного масштабирования является определение эмпирических постоянных  $a$  и  $b$  в уравнении 3 для взятой системы посредством проведения опытов, которые отражают фактические условия системы. После определения данных параметров для конкретной системы можно использовать уравнение 3 в совокупности с прочими проектными уравнениями и опытом для расчета геометрических характеристик емкости и необходимого подвода мощности для мешалки и газовой трубки для получения требуемого  $k_L a$ . GT разработали экспериментальную процедуру для определения эмпирических постоянных  $a$  и  $b$  для взятой системы, которая обеспечит успешное масштабирование при минимальных погрешностях. Пример использования данного метода для сравнения экспериментального и расчетного показателя  $k_L a$  для системы выщелачивания меди показан на рисунке 1.

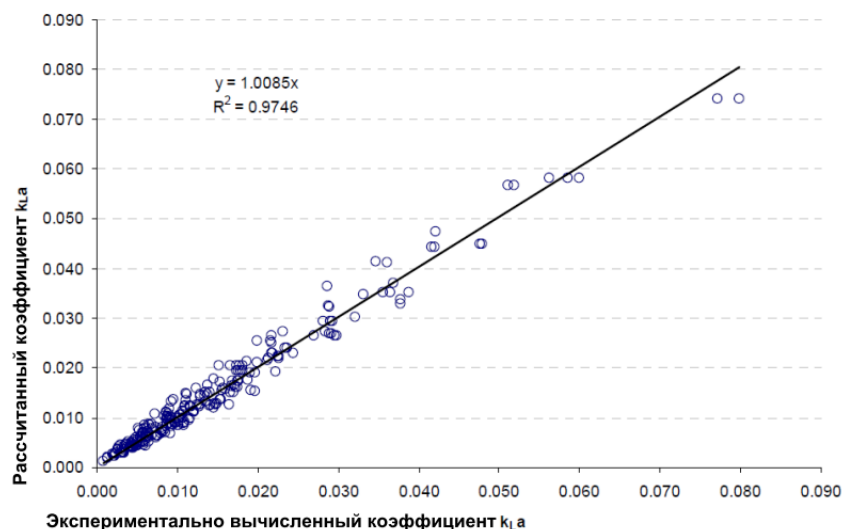


Рисунок 1 Экспериментальный и расчетный  $k_{La}$  системы с использованием экспериментальной методики GT

## ПОДАЧА КИСЛОРОДА

### Значимость метода подачи кислорода

Метод подачи кислорода имеет существенное влияние на эффективность массового переноса кислорода. В уравнении 2 коэффициент переноса на пленке жидкости ( $k_L$ ) пропорционален коэффициенту диффузии кислорода и обратно пропорционален толщине пленки жидкости. Последствием выбора подачи кислорода через эжектор является тот факт, что подача газа под высоким давлением повышает сдвиговое усилие и разрушает толщину пленки жидкости, что приводит к повышению  $k_L$ . В уравнении 3, площадь поверхности ( $a$ ) пропорциональна мощности, поглощаемой системой относительно объема системы и поверхностной скорости газового потока. Площадь поверхности обратно пропорциональна размеру пузырьков. Выбор метода подачи кислорода направлен на максимальное повышение сдвигового усилия и уменьшение размера пузырьков, а также на выбор мешалки, которая обеспечивает достаточный дополнительный подвод мощности.

### Варианты подачи кислорода

На рынке представлено множество систем подачи кислорода. Сужающиеся сопла и кольцевые распределители (по сути, открытые трубки) являются наиболее распространенными с точки зрения промышленной эксплуатации. Распределители из спеченного материала используются во флотационных машинах и системах, где протекают химические реакции, они хорошо подходят для лабораторных условий, но сталкиваются со множеством проблем в промышленной установке, в частности, в процессах с протеканием химических реакций, ввиду быстрого накопления продуктов реакции и постоянной необходимости очищения.

GT выполнили несколько опытов, направленных на сравнение производительности открытой трубки-распределителя, суживающего сопла и новой разработки, сверхзвуковой эжекторной трубки, разработанной GT, HyperSparge™.

Открытые трубки-распределители и кольцевые распределители не приносят достаточное

количество энергии в реактор выщелачивания, вся энергия, необходимая для массового переноса кислорода, обеспечивается лопастями мешалки. При применении подобных распределителей газ сжимается до уровня выше гидростатического напора в резервуаре пульпы, и перепады давления на наконечнике в точке нагнетания остаются низкими, в результате достигается низкая скорость газа.

Сужающие сопла, такие как CPT Slamjet и Minnovex, разработаны для аэрации во флотационной колонне, они также нашли применение в системах окисления пульпы. Сопла суживаются до узкого отверстия, газ сжимается до нескольких атмосфер выше гидростатического напора в резервуаре пульпы. Перепад давления на наконечнике в точке нагнетания составляет 3-5 атмосфер, что приводит к повышенной скорости газа в точке нагнетания. В результате больше энергии вводится в газ из системы распределения, таким образом, потребность в энергии с лопастей мешалки меньше.

Испытания, проведенные GT, показали, что для целей массового переноса кислорода, подвод энергии в систему через газовые системы намного эффективнее, чем через лопасти мешалки, при условии, что большая часть энергии, высвобождаемой от перепада давления газа в распределителе, преобразуется в кинетическую энергию, а не отводится в виде тепла. В связи с этим, GT разработали сверхзвуковую газовую трубку, HyperSpargе™, для дополнительного повышения эффективности системы подачи газа. В системе HyperSpargе™ используется сужающее сопло с расширением для максимальной рекуперации энергии от перепада давления газа за счет ускорения газа до сверхзвуковых скоростей.

### Эффективность метода подачи кислорода

Энергия подается в систему подачи газа путем сжатия газа до попадания в распределитель для сохранения энергии в газовом потоке. Теоретическое потребление энергии для сжатия газа определено в уравнении 4.

$$W = (n/(n-1))mRT[(P_2/P_1)^{(n-1)/n} - 1] \quad [4]$$

где  $n$  - изотермический КПД,  $W$  - работа (Дж),  $P_1$  - давление на выходе (Н.м<sup>-2</sup>),  $P_2$  - давление на входе (Н.м<sup>-2</sup>),  $T$  - температура (К),  $R$  - постоянная идеального газа (8.314472 Дж.К<sup>-1</sup>.моль<sup>-1</sup>),  $m$  - моль

Энергия давления извлекается в виде работы в систему, в идеальных условиях, эффективность данного преобразования максимальная. Высокоскоростная подача газа максимально повышает турбулентность в точке нагнетания, что уменьшает межфазный слой пленки жидкости вокруг газового пузырька, таким образом повышается показатель  $k_L$ . Более высокая кинетическая энергия газа переходит в площадь межфазной поверхности, что также способствует массовому переносу.

В традиционных трубчатых или кольцевых распределителях диаметр сопла относительно большой, что обуславливает низкую скорость газового потока, который остается постоянным на всем протяжении сопла. В данной конфигурации высокий расход газа может привести к увеличению размера пузырьков и, следовательно, уменьшению площади межфазной поверхности (а). В целом, размер пузырьков, образованных при использовании традиционной конструкции распределителя, будет приближен к размеру отверстия.

Для образования мелких пузырьков на наконечник распределителя необходимо установить специальное сопло. Сопла обычно можно разделить на *сужающие* (сужение от широкого диаметра к узкому по направлению потока) или *расширяющие* (расширение от небольшого диаметра к широкому по направлению потока).

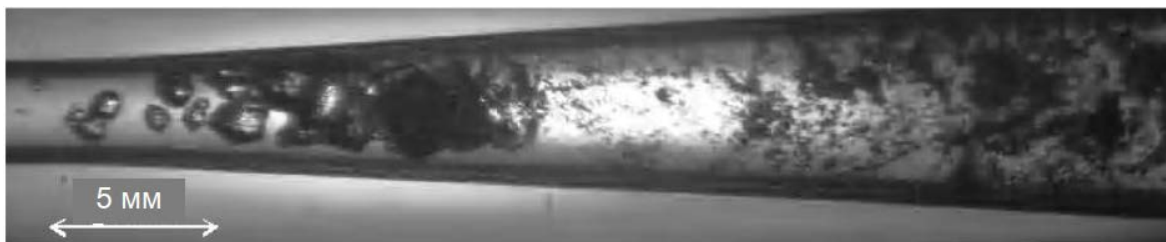


Суживающие сопла ускоряют дозвуковые потоки газа, при этом динамическое давление уменьшается от отверстия сопла к самой узкой точке по мере ускорения газа. После того как отношение давления газа на горловине сопла к давлению загрузки достигнет критического значения, поток достигнет звуковой скорости. В результате в горловине сопла образуется ударная волна. Затем сопло заглушается, и скорость газового потока приходит в соответствие числу Маха 1. В горловине сопла газовый поток невозможно ускорить выше числа Маха 1.

Дальнейшее повышение давления загрузки на сопле не приведет к повышению скорости газа в горловине сопла, поэтому любая дополнительная энергия давления накапливается в газе в форме тепла.

Расширяющие сопла замедляют скорость дозвуковых потоков газа, газ расширяется в сопле и замедляется. Однако, когда газ входит в расширяющийся участок при скорости, соответствующей числу Маха 1, расширяющееся сопло увеличивает скорость газа, так как энергия тепла преобразуется в скорость. Комбинированные суживающие сопла с расширением, наподобие используемых в HyperSpargе™, могут ускорять газы, замедленные в суживающемся участке на сверхзвуковой скорости. Подобные сопла создают силу тяги посредством преобразования аккумулированного тепла, накопленного в газе в горловине сопла, в скорость при прохождении расширяющегося участка сопла.

При ускорении газа до сверхзвуковой скорости в расширяющейся части сопла локальное давление падает и не восстанавливается до давления окружающей среды, пока газ не пройдет через ударную волну, как показано на рисунке 2.



**Рисунок 2** Сталкивающиеся пузырьки, пересекающие ударную волну сверхзвукового сопла (Kawamura et al., 2004)

Низкое давление, получаемое в расширяющейся части сопла, приводит к распаду пузырьков газа в мелкодисперсное облако, что приводит к резкому увеличению площади поверхности газа. Это показано на рисунке выше, где газовые пузырьки выходят из горловины сопла и их размер примерно соответствует размеру диаметра горловины, затем они распадаются на мелкодисперсный туман микропузырьков в зоне низкого давления расширяющегося участка сопла. Данный распад вызывается прохождением газа через ударную волну, которая образуется в результате заглушения в горловине сопла. Ударная волна может простирается от горловины сопла до конца сопла и далее, в зависимости от давления, прилагаемого к соплу.

Суживающееся сопло с расширением выполняет две важные функции. Конструкция сопла задает скорость на выходе при установленных давлении и температуре. Также из-за заглушения потока в горловине сопла, конструкция сопла задает массовый расход через сопло. Следовательно, конструкция сопла определяет значение тяги в системе подачи газа. За счет изменения формы сопла и условий потока выше и ниже по течению, можно регулировать как объем газа, который проходит через сопло, так и тягу, создаваемую соплом. Суживающееся сопло с расширением показано ниже.



Рисунок 3 Разрез суживающегося сопла с расширением (NASA, 2015 г.)

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для сравнения типов сопел был проведен ряд экспериментов с оценкой переменных по тяге и коэффициенту массового переноса кислорода ( $k_{La}$ ). Опыты проводились в резервуаре емкостью 1750 л, заключенном в кожух и оснащенный четырьмя перегородками и крышкой для минимизации потерь на испарение. В качестве технологического раствора использовался медный раствор выщелачивания при pH 1, с содержанием 15 г/л<sup>-1</sup> меди. Использовались газообразный кислород и азот высокой степени чистоты. Для проведения опытов применялись следующие сопла:

- открытая трубка-распределитель диаметром 10 мм
- суживающийся высоконапорный распределитель, диаметр на выходе 4 мм
- суживающееся сопло с расширением HyperSparge™, число Маха 3 (MV), диаметр горловины 1 мм, диаметр на выходе 5 мм
- суживающееся сопло с расширением HyperSparge™, число Маха 1 (MT), диаметр горловины 1 мм, диаметр на выходе 1,7 мм

## Тяга

Тяга представляет собой мерило эффективности преобразования энергии давления в поступающем газовом потоке в кинетическую энергию. Чем выше измеренное усилие, тем более эффективно сопло для преобразования энергии давления в массовый перенос без потерь на теплоотдачу. Сопла были установлены перпендикулярно и отцентрованы по поверхности весов. Газовый шлейф подавался на поверхность весов, переданная масса регистрировалась. Для получения одинакового показателя подвода энергии в распыляемом газе (то есть, фиксированный расход и давление подачи) на каждом сопле наблюдались разные показатели тяги. Данные отображены на Рисунке 4.

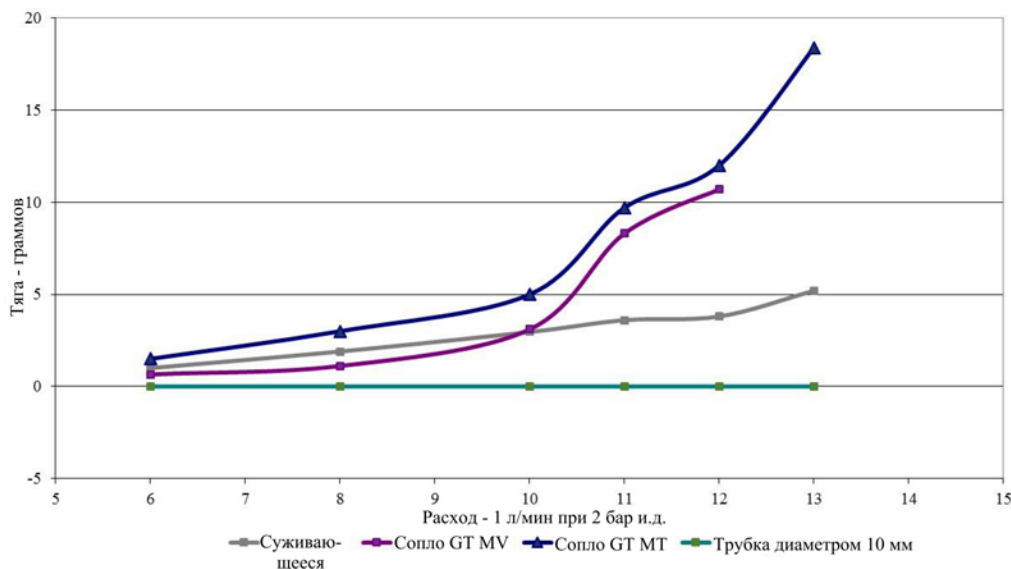


Рисунок 4 Тяга, измеренная при 200 кПа

Вышеприведенные результаты показывают, что при низком расходе кислорода, все рассматриваемые сопла имели аналогичные показатели тяги; менее 3 граммов (г) было измерено по весам. Однако, при более высоком расходе на соплах наблюдаются иные параметры. При любом показателе расхода газа открытая трубка-распределитель не создает тягу, поэтому усилие на весы не прикладывалось. На суживающемся сопле наблюдается практически линейное поведение, тяга повышается с повышением расхода, вплоть до максимального значения 5 г при 13 л/мин газового потока.

Оба сверхзвуковых сопла HyperSparge™ от GT создавали намного большую тягу, чем открытая трубка или суживающееся сопло. В целом сопла, направленные на получение максимальной тяги, продемонстрировали лучшие показатели по сравнению с высокоскоростными соплами при разных значениях расхода, с получением значения тяги 18 г при расходе газа 13 л/мин.

Это сопоставимо с максимальной теоретической тягой в 21 г, рассчитанной для сопла с расходом 13 л/мин. Это означает, что 85% энергии давления в данном газовом потоке было преобразовано в кинетическую энергию для сопла HyperSparge™ с профилем MT. Для обоих сверхзвуковых сопел также наблюдается увеличение крутизны кривой тяги при расходе газа выше 11 л/мин, рядом с точкой, где сопла заглохали, что свидетельствует о высокой тяге, так как газ ускоряется на выходе из суживающегося сопла с расширением, приближаясь к сверхзвуковой скорости.

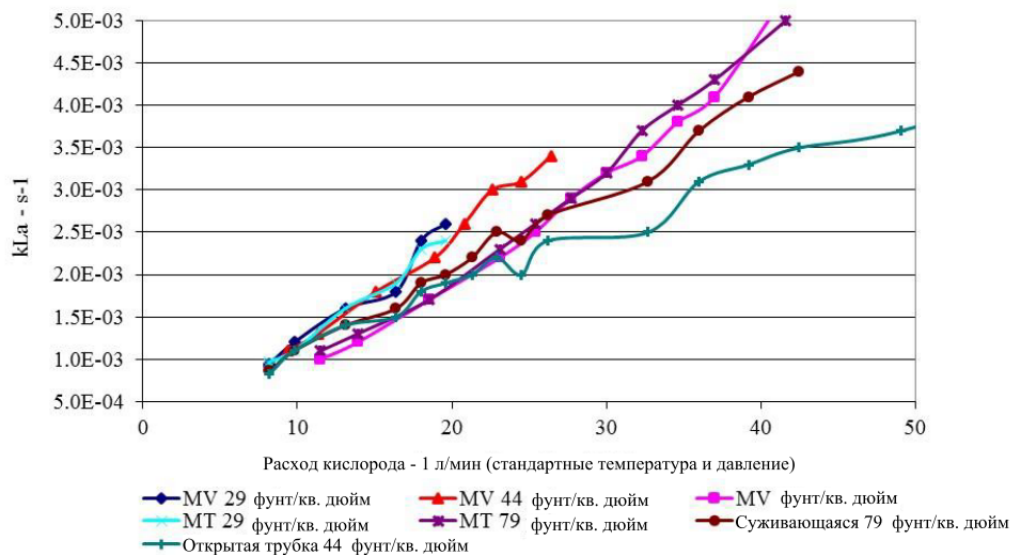
### Коэффициент массового переноса кислорода ( $k_{la}$ )

Для температур выше 50°C коэффициент массового переноса кислорода определяли с использованием метода динамического газовыделения (Taguchi and Humphrey, 1966). При температуре выше 50°C использовался метод связанного сульфита (Puskeiler, 2005). Эксперименты проводились в присутствии твердой фазы в реакторе и без нее. Результаты показаны на Рисунке 5.

При использовании сопел MV и MT производства GT получены стабильно высокие показатели  $k_{la}$  на всем диапазоне газового расхода относительно открытой трубки и



суживающегося сопла. По мере приближения расхода газа к заглушенному расходу в соплах HyperSparge™ MV и MT от GT разница в показателях  $kLa$  становилась более очевидной, достигая 300% от показателя традиционной открытой трубки и 50% по сравнению с суживающимся соплом.



**Рисунок 5** Показатели  $kLa$  при разных значениях давления нагнетания

Показатели сопел HyperSparge™ MV и MT от GT были схожими, так как оба сопла имеют суживающуюся конструкцию с расширением. На одном из двух сопел HyperSparge™, MT, получены самые высокие значения по  $kLa$ , утилизации газа и тяги, как правило на 25% выше показателей сопла MV при заданном расходе газового потока. Разница обусловлена более высокой тягой, полученной на сопле MT за счет скорости.

## МАСШТАБИРОВАНИЕ ДО ПРОМЫШЛЕННОЙ УСТАНОВКИ

За счет применения научного подхода GT установили, что сверхзвуковая технология подачи газа обладает существенными техническими преимуществами при подаче газа в пульпу, где требуется кислород. Следующим этапом стала разработка суживающегося сопла с расширением в виде продукта, пригодного к использованию в промышленном масштабе.

### HyperSparge™

HyperSparge™ была разработана GT в виде комплексного технологического решения для подачи газа. Основой устройства является суживающееся сопло с расширением, выполненное из специальной износостойчивой керамики, которое ускоряет газ до сверхзвуковой скорости для подачи в раствор или пульпу. Конструкция сопла обеспечивает минимизацию потерь энергии. Схематическое изображение HyperSparge™ и увеличенное изображение сопла показаны на рисунке 6.

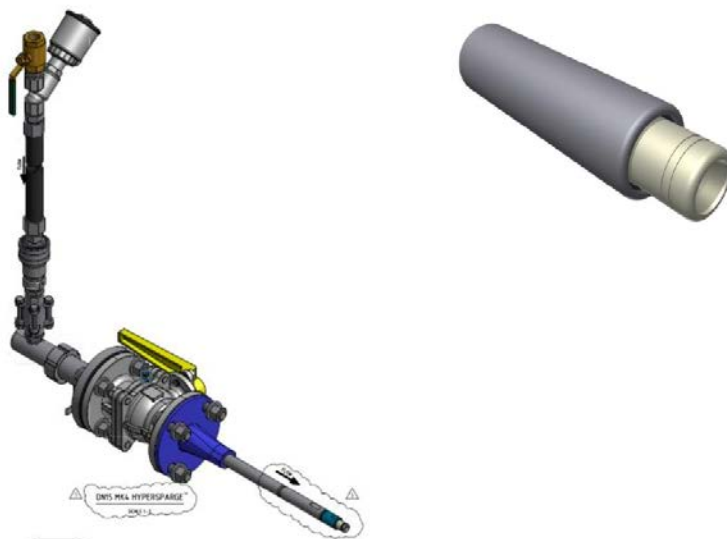


Рисунок 6 Сверхзвуковая система подачи газа HyperSparge™ и сопло

Кроме преимуществ в виде повышенного массового переноса кислорода, HyperSparge™ обеспечивает безопасность и простоту использования. HyperSparge™ работает при диапазоне давлений, которые можно менять для регулирования расхода. Сопла легко менять за счет использования резьбового держателя сопла, что позволяет использовать разные диаметры сопел и диапазоны расходов. Еще одним преимуществом является возможность установки/снятия распределителя из заполненного пульпой резервуара без проливов и без использования дополнительных специальных устройств. Кроме того, при диаметре горловины в 7 мм распределитель не закупоривается и самоочищается за счет прохождения газового потока. За счет этого обеспечивается меньше простоев и прерывания технологического процесса.

## Проектирование системы массового переноса кислорода

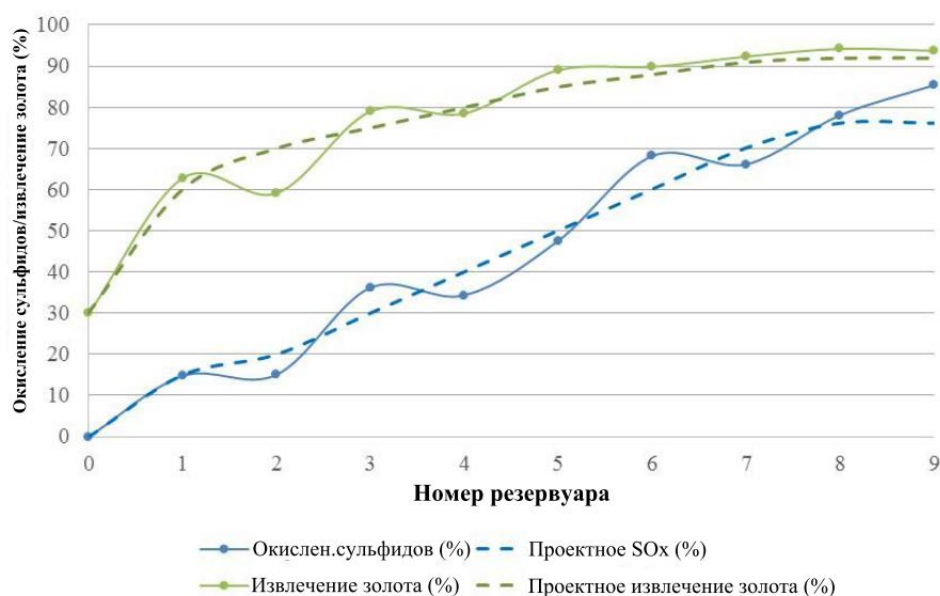
При разработке установки Процесс Альбион™ для золотодобывающего предприятия ГПМ, ключевые опыты по массовому переносу кислорода были проведены для определения коэффициента  $k_{La}$  в условиях, максимально приближенных к практическим в плане температуры и свойств пульпы. Затем полученные данные были использованы GT для точного определения типоразмера газовых трубок, мешалок и выбора идеальных габаритов резервуаров. Критерии проектирования для проекта ГПМ представлены в Таблице 1.

Таблица 1 Критерии проектирования установки Процесс Альбион™ для ГПМ

Параметры	Единицы изм.	Номинальные	Проектные
Производительность	т/ч	13,1	14,5
Концентрация $S^{2-}$	%	17,6	20,0
Степень окисления $S^{2-}$	%	76	76
Утилизация кислорода	%	90	80
Требуемый коэффициент $k_{La}$	м.с <sup>-1</sup>	0,12	0,14
Извлечение золота в процессе CIL	%	92	90

Экономические параметры промышленного процесса зависят от эффективности переноса кислорода в систему для повышения коэффициента переноса (обеспечивая проектное время пребывания) и максимального повышения эффективности переноса (утилизация подаваемого кислорода).

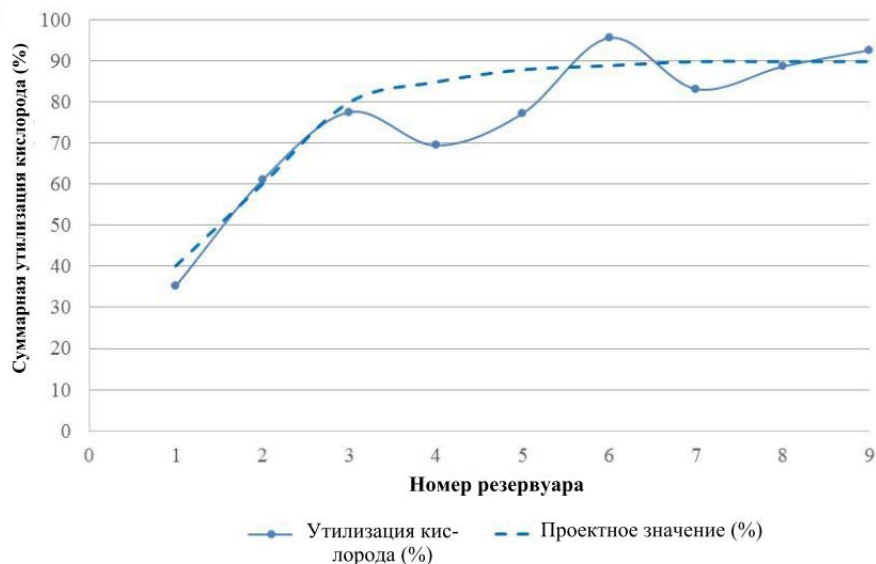
Было проведено исследование по сбору производственных данных и оценке коэффициента и эффективности переноса. Так как исследование проводилось на промышленном производстве, не было возможности вывести установку из технологического процесса для дублирования лабораторных опытов. Вместо этого степень окисления и потребление кислорода на действующей установке сравнивались с проектными значениями. В качестве условий работы были приняты значения производительности в 14,0 тонн/час по концентрату и концентрация сульфидов в 17,0%. Данные по степени окисления и извлечению золота показаны на рисунке 7.



**Рисунок 7** Изучение окисления сульфидов на установке Процесс Альбион™ золотодобывающего предприятия ГПМ.

На рисунке 7 показано, что при проектной производительности достигается необходимая степень окисления сульфидов с соответствующим показателем по извлечению золота.

Показатель утилизации кислорода определен путем сравнения подачи кислорода в процесс в течение исследования и смоделированных значений. Результаты показаны на Рисунке 8.



**Рисунок 8** Изучение утилизации кислорода на установке Процесс Альбион™ золотодобывающего предприятия ГПМ.

На рисунке 8 показано, что суммарная утилизация кислорода составляет 93%, что превышает проектное значение в 90%. Данное наблюдение соответствует показателям других установок Процесс Альбион™ с несколькими реакторами, где кислород, растворенный в первых реакторах схемы выщелачивания, утилизируется далее в процессе.

На рисунках 7 и 8 показано, что система массового переноса кислорода была разработана правильно и успешно.

## ВЫВОДЫ

Подача кислорода через суживающиеся сопла с расширением обеспечивает высокие показатели тяги и массового переноса кислорода по сравнению с остальными методами подачи газа. Более эффективным способом подачи энергии в систему является подача газа, нежели механическое перемешивание. Технология HyperSparge™ является разработкой с использованием суживающихся сопел с расширением, которая предлагает дополнительные преимущества в сравнении с другими технологиями распределения, что способствует созданию безопасной рабочей среды, с максимизацией времени работы и оптимизацией подачи энергии через мешалки. GT успешно выполнили масштабирование системы массового переноса кислорода установки Процесс Альбион™ на предприятии ГПМ, где показатели по массовому переносу кислорода и утилизации кислорода превышают проектные.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Hourn, M., & Turner, D.W. (2010). Albion Process for treatment of refractory ores, Proceedings of ALTA Conference 2010, Perth, Australia. [Технология Albion Process для переработки упорных руд]
- Hourn, M., & Turner, D.W. (2012). Commercialisation of the Albion Process, Proceedings of ALTA Conference 2012, Perth, Australia. [Промышленное внедрение технологии Albion Process]
- Hourn, M., Voigt, P., & Turner, D.W. (2014). Development of the Albion Process plant to treat

refractory concentrates from the GPM Gold Project, Proceedings of Hydroprocess Conference, Vina del Mar, Chile. [Разработка установки Albion Process для переработки упорных концентратов на золотодобывающем проекте GPM Gold]

Kawamura, T., Fujiwara A., Takahashi, T., Kato, H., Matsumoto, Y. & Kodama, Y. (2004). The effect of the bubble size, dispersion and skin friction reduction. Proceedings of On smart control of turbulence, Tokyo, Japan. [Влияние размера пузырьков, дисперсии и уменьшения поверхности трения]

Middleton, J.C. (1992). Gas-liquid dispersion and mixing. In N. Harnby, M.F. Edwards, A.W. Nienow (Ed.), *Mixing in the Process Industries* (pp. 322–363). [Дисперсия и смешивание газа и жидкости]

Middleton, J.C. & Smith, J.M. (1992). Gas-liquid mixing in turbulent systems. In E.L. Paul, V. Atiemo-Obeng, S.M. Wiley (Ed.), *Handbook of industrial mixing: Science and practice* (pp. 585–638). [Смешивание газа и жидкости в турбулентных системах]

Moo-Young, M. & Blanch, H.W. (1987). Design of biochemical reactors: Mass transfer criteria for simple and complex systems, *Adv. Biochem. Eng.*, 19, 1–69. [Проектирование биохимических реакторов: Критерии массового переноса для простых и сложных систем]

NASA (2015). Nozzle design – converging/diverging (CD) nozzle, <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/nozzled.html>, retrieved January 2017. [Конструкция сопла – суживающееся сопло с расширением]

Oguz, H., Brehm, A. & Deckwer, W.D. (1987). Gas/liquid mass transfer in sparged agitated slurries, *Chemical Engineering Science*, 42, 1815–1822. [Газожидкостный массовый перенос в перемешиваемой пульпе]

Puskeiler, R. & Weuster-Botz, D. (2005). Combined sulfite method for the measurement of the oxygen transfer coefficient  $k_{La}$  in bioreactors, *Journal of Biotechnology*, 120(4), 430–438. [Комбинированный сульфитный метод для измерения коэффициента переноса кислорода  $k_{La}$  в биологических реакторах].

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

Taguchi, H. & Humphrey, A.E. (1966). Dynamic measurement of volumetric O<sub>2</sub> transfer coefficient in fermentation systems, *Journal of Fermentation Technology*, 44, 881–889. [Динамическое измерение объемного коэффициента переноса O<sub>2</sub> в системах ферментации]

Van't Riet, K. (1979). Review of measuring methods and nonviscous gas-liquid mass transfer in stirred vessels, *Ind Eng Chem Process Des Dev*, 18, 357–364. [Анализ методов измерения и массового переноса невязкой газожидкостной массы в резервуарах с мешалкой]

Vasconcelos, J.M.T., Alves, S.S., Nienow, A.W. & Bujalski, W. (1998). Scale-up of mixed gassed multi-turbine agitate vessels, *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 76, 398–403. [Масштабирование многотурбинных резервуаров с мешалкой для смешанных газов]

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

золотоизвлекающей фабрике GPM Gold]

Voigt, P., Hourn, M. & Mallah, D. (2016). Treatment of low grade materials, Proceedings of MINEX Conference, Moscow, Russian Federation. [Переработка низкосортных материалов]