
ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОСВОЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ В РФ И ЗА РУБЕЖОМ

Г. И. Авдонин

Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им.
Н.М.Федоровского» (ФГБУ «ВИМС»)

Применение КВ в промышленных масштабах началось в середине XX века после разработок, проведенных бывшим Горным бюро США: для добычи Au и Ag — с 1969 г. (первый рудник — Cortez в штате Невада, США), для добычи меди — с 1968 г. (месторождение окисленных руд Bluebird), а для добычи U метод КВ с применением растворов серной кислоты или карбонатных растворов широко практиковался еще с 1950-х гг. Крупномасштабное применение КВ в горнодобывающей промышленности, наблюдаемое сегодня, берет начало с 1980 г. (запуск в работу трех крупных предприятий КВ меди в Чили и практически одновременный ввод в эксплуатацию нескольких предприятий по добыче золота методом КВ в западной части США).

В данной статье приведен обзор состояния дел в основных горнорудных предприятиях, использующих ФХГ для добычи твердых полезных ископаемых. Обзор составлен по материалам интернет-ресурсов.

С тех пор технологии КВ продолжают интенсивно совершенствоваться, находя применение для выщелачивания новых металлов и видов сырья (серебряные руды, медные сульфидные руды, селитра, золотосодержащие

пиритные руды; имеются экспериментальные объекты по извлечению цинка, марганца, металлов платиновой группы, кобальта и никеля методом КВ)

По состоянию на 2015 г. коммерчески успешными и широко применяемыми направлениями в КВ являются получение урана, золота и меди. Новыми направлениями являются КВ цинка, марганца, никеля, кобальта, а также КВ меди из первичных сульфидных (халькопиритовых) руд, находящиеся на стадии опытных работ или используемые в промышленности в единичных случаях (например, КВ никеля из латеритных руд на объекте Murrin Murrin (Австралия) и бактериальное КВ никеля на предприятии Talvivaara (Финляндия)).

Работа промышленных штабелей КВ

Формирование штабелей должно осуществляться с упором на обеспечение высокой проницаемости материала и достижение высоких показателей извлечения целевых металлов. Это говорит о том, что залогом прибыльности предприятий КВ является достижение качественной агломерации рудного материала, использование оптимального гранулометрического состава материала, подготовки поверхности

орошения и поверхности основания штабелей, использование оптимальных связующих добавок в ходе агломерации руды, а также оптимальной конфигурации систем орошения руды и дренажа продуктивных растворов.

Высота стандартных штабелей КВ составляет 4 — 10 м, а в тех случаях, когда важен фактор термоизоляции — до 18 м. Площадь единичных штабелей КВ достаточно велика, она составляет до 0,5 км² и больше. Важным элементом конструкции штабеля является основание, которое должно быть гладким, не иметь локальных неровностей и иметь уклон ~ 1° — это важно для обеспечения качественного дренажа ПР в сборный коллектор. Если уклон основания превышает 3°, необходимо при планировании основания сформировать опорную обваловку для недопущения возможного оползания материала. Часто штабеля КВ формируются методом заполнения оврагов и долин, при этом уклон поверхности по бокам штабеля может достигать 20°. Средний размер частиц руды (P_{80}) может изменяться в широких пределах. В большинстве случаев он составляет 10—40 мм. Отсыпка неагломерированной руды с $P_{80} < 6$ мм не производится по причине весьма низкой проницаемости такого материала. В случае необходимости аэрации руды подача воздуха обычно производится по трубопроводам снизу штабеля с интенсивностью 0,02—0,08 м³/(т·час). Аэрация преимущественно производится для КВ меди из вторичных сульфидных руд. Интенсивность подачи ВР на орошение в большинстве случаев составляет 4—20 л/(м²·час).

Агломерация заключается в иммобилизации частиц мелких фракций руды за счет их прилипания друг к другу или к поверхности более крупных частиц. При этом доля мелких гранулометри-

ческих фракций в материале штабеля резко сокращается, явления гранулометрической сегрегации частиц материала в ходе формирования штабеля исчезают, а гидравлическая проницаемость штабеля соответственно существенно возрастает. Обычно агломерация руд используется для материалов, содержание самой тонкой гранулометрической фракции (–0,074 мм) в которых превышает 10—15 % от массы руды.

Использование готовых вертикальных дренажей, также известных как фитильные дренажи, давно практикуется в строительной индустрии и является дешевым методом борьбы с проблемами, вызываемыми почвенной влагой. Фитильные дренажи также используются для улучшения свойств мягких и влажных почв для предотвращения уплотнения и осадки (в обычных условиях естественный процесс осадки таких почв может длиться десятилетиями). Применение фитильных дренажей в КВ создает устойчивые вертикальные каналы тока, позволяющие растворам обойти барьеры для проницаемости. В случае подозрений к качеству руды фитильные дренажи можно устанавливать в тело штабеля уже в процессе его отсыпки.

Фитильные дренажи представляют собой тонкие полосы (4,7 мм х 10,2 см) геокомпозитного дренажного материала, состоящего из двух компонентов — внутренней части, являющейся каналом для протока растворов, и внешней части — оболочки из геотекстильной фильтрующей ткани, пропускающей воду и не пропускающей тонкую фракцию руды и посторонние частицы. Установка фитильных дренажей производится вибрационным либо статическим методом.

Основными механизмами растворения минералов при типичном процессе КВ являются:

– растворение в растворах кислот, контролируемое величиной pH (оксидные руды меди и кислоторастворимые минералы урана);

– окислительное растворение в растворах кислот (сульфидные руды меди и урана) или щелочей (карбонатные руды урана);

– растворение в результате комплексообразования в щелочных растворах (цианирование руд золота и серебра).

В последнее время проводятся исследования в области применения аммиачно-тиосульфатного КВ золота как альтернативы цианидному процессу, но комплекс $[\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2]^{3-}$ обладает значительно меньшим сродством к активированным углям, чем комплекс $[\text{Au}(\text{CN})]^{2-}$, присутствующий в ПР цианидного КВ

Тиосульфатный процесс заслуживает испытаний в режиме КВ для выщелачивания золота из сульфидных руд.

Недостатками тиосульфатного выщелачивания являются высокий удельный расход реагента, а также то обстоятельство, что при отсутствии аммиака в растворе тиосульфат-анион начинает диспропорционировать с образованием пленок элементарной серы, пассивирующих реакционную поверхность золота. Недостаточно проработаны также вопросы об извлечении золота из тиосульфатных растворов [1, p.90].

Компанией Barrick Gold в 2015 г. после исследований, продолжавшихся свыше 15 лет, запущено в работу промышленное подразделение тиосульфатного выщелачивания золота на предприятии Goldstrike (США), пока являющееся крупнейшим объектом данного типа в мире и перерабатывающим руды с массовой производительностью 600 т/час [102, pp.2 – 34]; выход на производительность по руде

13 400 т/сут осуществлен в 3-м квартале 2016 г.

Бактериальное КВ. Все микроорганизмы, оказывающее окислительное воздействие на Fe^{2+} и/или сульфидную серу при КВ, практически идентичны микроорганизмам, используемым для проведения чанового (агитационного) бактериального выщелачивания. Наиболее важными видами микроорганизмов в условиях КВ при низких температурах (до 40 °С), совместно воздействующими на исходные рудные минералы, являются железо- и сероокисляющие.

Основными направлениями текущих исследований в области биовыщелачивания являются дальнейшее уточнение роли микроорганизмов в выщелачивании, изучение различных аспектов взаимодействия на поверхности контакта микроорганизмов и минералов, характер закрепления микроорганизмов на поверхности минералов, влияние интенсивности орошения штабеля на микрофлору в штабелях КВ. Проводятся исследования по поиску, идентификации и культивированию микроорганизмов, способных работать при высоких температурах в условиях высокого общего солевого содержания, в морской воде и подземных рассолах, а также в условиях наличия повышенных концентраций сульфатов, катионов алюминия, меди, железа и других элементов-примесей, оказывающих токсическое воздействие на жизнедеятельность микроорганизмов. Основным выводом — необходимость искусственного заселения штабелей КВ популяциями требуемых микроорганизмов.

Новым направлением проведения исследований в области бактериального выщелачивания является биоразложение нерудных минералов с целью раскрытия частиц рудных минералов (например, самородного золота), нахо-

дящихся внутри кварца, силикатов, гидроксидов железа и прочих невыщелачиваемых нерудных минералов. Явления бактериального выветривания силикатных (биотит, кварц, полевые шпаты) и гидроксидных минералов в природе известны, но они протекают на протяжении достаточно длительных периодов времени.

Аммиачное КВ медных руд (процесс AmmLeach). При переработке окисленных медно-кобальтовых руд обычно применяется серноокислотное агитационное выщелачивание с добавлением восстановителя (чаще всего сульфита натрия Na_2SO_3). Недостатком традиционного процесса является перевод в раствор, помимо меди и кобальта, также и больших количеств элементов-примесей, таких как Fe, Mn, Si, Ca, Al и Mg. Это приводит к необходимости использования достаточно затратных осадительных процессов для перевода примесей в осадок, что сопровождается потерями меди и кобальта с кеками осаждения гидроксидов (до половины от количества выщелоченного Co), а также образованием большого количества твердых отходов, требующих дополнительных мероприятий по их утилизации.

Аммиачное выщелачивание проводится в умеренно щелочной среде с селективным выщелачиванием меди и других металлов (Zn, Ni, Co), образующих устойчивые катионные комплексы с аммиаком. Такие металлы, как Fe и Mn, в раствор при этом не переходят: растворимость кальция при этом минимальна, и проблема образования осадков ярозита и гипса теряет актуальность.

По мнению компании Alexander Mining, основными потенциальными объектами для получения металлов методом аммиачного КВ являются:

- месторождения карбонатных и окисленных руд меди, содержащие также серебро;

- месторождения окисдных руд цинка;

- латеритные руды кобальта и никеля;

- месторождения полиметаллических руд цветных и редких металлов, в том числе содержащих уран;

- медь, серебро и золото в порфировых рудах после серноокислотного выщелачивания.

Процесс Cuprochlor — процесс выщелачивания медных руд с добавками хлорид-анионов (добавляемые реагенты — хлорид кальция CaCl_2 или поваренная соль NaCl), разработанный компаниями Antofagasta Minerals Plc и Lakefield Research Ltd в ходе работ в Чили (предприятие Minera Michilla, где он практикуется в настоящее время). Процесс может быть использован для выщелачивания меди из различных окисленных, смешанных и сульфидных руд, в том числе тех, где медь содержится в форме вторичных сульфидных минералов — халькозина, ковеллина и борнита. Исходная руда после мелкого дробления направляется на агломерацию с добавкой серной кислоты и хлорида кальция. Последний реагирует с серной кислотой с образованием гипса и хлорид-анионов в кислой среде, стабилизирующих ион Cu^{2+} , который, в свою очередь, является катализатором при образовании ионов Fe^{3+} , действие которых приводит к окислению сульфидов и выделению меди в раствор. Полученный ПР направляется на выделение меди методом экстракции с электролизным окончанием.

Использование экологически щадящего реагента — раствора аминокислотной кислоты (глицина ($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$)) в щелочной среде.

Среди основных преимуществ использования глицина для выщелачивания металлов можно отметить следующие:

- нетоксичность, нелетучесть, термическая устойчивость, дешевизна, отсутствие проблем при хранении;

- глицин может быть использован в различных вариантах процессов выщелачивания (кучное, перколяционное, агитационное);

- возможность применения в широком диапазоне концентраций, нечувствительность процесса к колебаниям уровня pH;

- безопасность для окружающей среды;

- возможность селективного выщелачивания металлов, для гидрометаллургического извлечения которых обычно используются серная кислота и прочие коррозионные и токсичные реагенты: Au, Ag, Cu, Zn, Pb, Pd, Cd, Ni, Co;

- при добавлении глицина в цианидные растворы резко увеличивается скорость выщелачивания Au;

- перевод в раствор Fe, Mn, Mg при выщелачивании глицином незначителен, что способствует снижению содержания элементов — примесей в продуктивных растворах выщелачивания;

- отсутствие взаимодействия с кислотоёмкими нерудными минералами, а также (при выщелачивании сульфидных руд) с минералами несulfидной природы;

- при использовании глицина для выщелачивания Cu из сульфидных руд получаемый глицинат меди является хорошим окислителем для дальнейшего вскрытия сульфидов;

- легкость сорбционного извлечения Au, Ag из ПР глицинового выщелачивания на активированный уголь;

- низкая коррозионная активность технологических растворов, возможность использования дешевых материалов.

Ключевым фактором, обеспечившим перевод КВ меди, урана, золота

и серебра из стадии экспериментальных разработок в сферу промышленного использования, явилось выявление и внедрение высокоэффективных экстрагентов и селективных сорбентов (ионообменных смол и активированных углей), обеспечивающих быстрое и качественное извлечение вышеуказанных металлов из ПР. Что касается КВ цинка, кобальта, марганца и никеля, то для них не выявлено экстрагентов или сорбентов со сходной степенью эффективности: для извлечения этих металлов из ПР сернокислотного выщелачивания необходима предварительная нейтрализация ПР, т.е. безвозвратная утилизация серной кислоты с необходимостью расхода значительных ее количеств на доукрепление оборотных растворов перед их возвратом в процесс КВ.

Методы ионного обмена и жидкостной экстракции успешно используются для извлечения урана из ПР КВ и ПВ. Сорбция урана на ионообменные смолы идеально подходит для извлечения U из ПР с низкими концентрациями металла. При этом ионообменную сорбцию можно использовать и как самостоятельную стадию производства, и в сочетании с отделением экстракции для извлечения урана из десорбатов отделения сорбции.

В связи с тем, что экстрагенты типа LIX высокоселективны по меди при ее извлечении из сернокислотных ПР КВ, использование сорбции на предприятиях КВ меди практически не осуществляется.

В числе основных новых направлений развития технологии ФХГ, развиваемых в мире, выступают следующие:

- ПВ с использованием датчиков реального времени. Датчики в реальном времени предоставляют оператору объекта текущую информацию о производительности системы, что позволяет опе-

ративно вносить изменения в процесс для поддержания оптимальной работы системы. Такие датчики, в состав которых входят надежные твердотельные электрохимические элементы, размещаются в требуемых точках обрабатываемого рудного тела и могут быть настроены на передачу показаний через любые временные интервалы. Передача данных в режиме реального времени из скважин экологического мониторинга способна повысить доверие населения в будущем к технологии ПВ;

– ПВ с использованием явления электромиграции (электрокинетическое выщелачивание) основано на использовании электрического поля для перемещения ионов (электромиграции) через среды с низкой проницаемостью. Данная разновидность метода может оказаться перспективной для использования в месторождениях, характеризующихся наличием засоленных грунтовых вод (такие месторождения широко распространены в Австралии);

– ПВ в колебательном режиме (подповерхностное смешивание). Процесс основан на чередовании импульсов закачки и откачки растворов для гене-

рирования колебательного потока в рудном пласте. Это может существенно увеличить скорость обработки и коэффициенты отдачи рудных тел [3].

Бактериальное ПВ урана предложено в [1] как весьма эффективный способ довыщелачивания металла из крыльев ролловых фронтов месторождений, обрабатываемых методом ПВ, а также как метод обработки месторождений урана, характеризующихся наличием руд песчаникового типа, упорных к обычному серноокислотному выщелачиванию.

Разработка технологии био-ПВ глубоководных руд осуществляется в рамках проекта Евросоюза Horizon 2020 «BIOMOre», целью которого является разработка способов вовлечения в эксплуатацию медистых сланцев — медьсодержащих карбонатных пород осадочного происхождения, широко распространенных в центральной и северо-западной Европе. В рамках данного проекта выполняются также исследования по моделированию процесса ПВ и анализу потенциальных экологических проблем при его реализации в промышленности. **ГИАБ**

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Авдонин Геннадий Иванович — отдел «Геотехнологической оценки месторождений (кучное и подземное выщелачивание металлов)», ведущий сотрудник отдела, gosh1956@mail.ru, Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н. М. Федоровского» (ФГБУ «ВИМС»).

