

УДК 622.772

А.Л. Самусев

СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

Рассмотрены и проанализированы современные способы интенсификации процесса кучного выщелачивания, позволяющие повысить эффективность перевода металлов в продуктивный раствор.

Ключевые слова: кучное выщелачивание, интенсификация, медно-цинковая руда, электрохимическая обработка, кислород, продуктивный раствор.

Многолетнее освоение месторождений полезных ископаемых привело к значительному истощению балансовых запасов руд и снижению их качества, а также накоплению больших объемов техногенных георесурсов: вскрышных пород, забалансовых руд, хвостов обогащения, рудничных и сточных вод. Так, например, в георесурсах предприятий цветной металлургии России содержится более, тыс. т.: 7600 меди, 9000 цинка, 900 свинца, 500 олова и др. [1, 7], в то время как потребность промышленности в цветных металлах с каждым годом возрастает, что требует вовлечения в переработку бедных и труднообогатимых руд. Одним из способов извлечения металлов из таких руд является кучное выщелачивание. Современная технология кучного выщелачивания металлов получила свое развитие в основном в последние полвека, хотя применение этого метода имеет давнюю историю. Например, на шахтах Венгрии извлекали медь из подотвальных медьсодержащих вод еще в середине XVII века, а испанские горняки делали то же самое, пропуская кислые растворы через крупные кучи окисленных медных руд на берегах Рио Тинго в 1752 году. С конца 50-х годов кучное вы-

щелачивание как кислыми, так и щелочными растворами практикуется в урановой отрасли. На практике выщелачивание измельченной рудной породы применялось давно, но только в прошлом столетии ученые попытались оптимизировать этот процесс.

При кучном выщелачивании дробленая рядовая руда располагается правильными слоями, называемыми «горизонтами», на специально подготовленных площадках, образуя кучи. Вершину этих куч орошают растворами, содержащими кислоты, щелочи, микроорганизмы и т.д. Выщелачивающие растворы закачиваются в рудную породу и просачиваются сквозь нее. После того, как металлы переходят в растворы, последние собираются и подаются насосом в установку, где производится извлечение металлов.

Однако, несмотря на то, что с теоретической точки зрения метод выщелачивания очень прост в осуществлении, при его практическом применении возникает ряд проблем, связанных со следующими факторами: топографические и геоморфологические характеристики местности; химические, минералогические, структурные и физические характеристики породы; гранулометрический состав руды;

способ закладки куч; технология выщелачивания и выделения ценных металлов из продуктивных растворов и др. [2]. По этим причинам извлечение ценных металлов методом кучного выщелачивания редко достигает 70 – 80 %, а процессы и способы его интенсификации весьма перспективны и актуальны.

Интенсификация добычи металла выщелачиванием – это проведение комплекса организационно-технических мероприятий, направленных на достижение наиболее быстрого и полного извлечения металла из руды. Мероприятия по интенсификации выщелачивания направлены на полную или частичную нейтрализацию причин, вызывающих снижение скорости выщелачивания. Опыт применения кучного выщелачивания металлов показывает, что главными причинами снижения скорости выщелачивания являются недостаточное снижение крупности руды при подготовке ее к выщелачиванию, кольматация пор и поверхности кусков руды продуктами ее разложения, каналирование потоков выщелачивающих растворов.

В данной статье дан анализ современных способов интенсификации процессов кучного выщелачивания, применяемых на отечественных и зарубежных горноперерабатывающих предприятиях, позволяющих повысить качество получаемых продуктивных растворов и уменьшить продолжительность выщелачивания.

Известны следующие способы интенсификации процесса выщелачивания [2-7]:

- *механические*, предусматривающие изменение напряженно-деформируемого состояния и дисперсного состава гетерогенной среды на основе нарушения равновесия действующих в массиве сил сцепления;

- *физические способы*, предусматривающие изменение состояния гетерогенной среды, в том числе агрегатного (твердого, жидкого, газообразного);

- *химические*, связанные с изменением состава веществ, составляющих гетерогенную среду, но без изменения ее состояния;

- *биологические*, основанные на каталитической роли микроорганизмов при растворении минералов и породы;

- *комбинированные способы*, при которых имеет место совместное действие физических, химических и механических факторов интенсификации выщелачивания металлов.

Одним из первичных способов интенсификации процессов выщелачивания является грамотное ведение взрывных работ. Комплексом буровзрывных работ можно изменять площадь, с которой происходит диффузия металлов при выщелачивании на завершающем этапе эксплуатации месторождения. Излишнее измельчение руды чрезмерно увеличивает площадь компонентов горной массы и снижает фильтрационную способность выщелачиваемого массива. Горная порода должна быть разделена на составляющие ее кристаллы минералов так, чтобы обеспечить эффективный доступ к ним технологических растворов. Взрывом следует раскрывать сростки для того, чтобы затем осуществить процесс выщелачивания металла, пользуясь возникшими микротрещинами [3].

Анализ исследований авторов [2,4] позволяет заключить, что: электрические поля и ультразвук интенсифицируют процесс растворения рудных минералов; наибольший эффект достигается для тех типов руд, которые достаточно хорошо выщелачиваются и при обычном перемешивании; ин-

тенсифицирующее действие электрических полей и ультразвука проявляется при крупности руды до 0,5-0,25 мм; электрические поля и ультразвук можно применять для интенсификации процесса растворения минералов при чановом выщелачивании.

Однако, использование рассмотренных физических полей не позволяет нейтрализовать действие указанных выше причин снижения скорости выщелачивания. Дополнительное дробление выщелачиваемой руды, декольматацию поверхности кусков и пор, ликвидацию образовавшихся каналов движения растворов может обеспечить воздействие на выщелачиваемую среду импульсов высокого давления, возбуждаемых в среде с определенной периодичностью. Представляют интерес три способа возбуждения импульсов высокого давления: взрывной, электрический разряд в жидкости, гидравлический импульсатор [4].

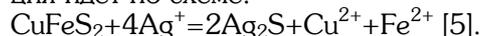
Взрывной способ может быть использован при снижении технологических показателей выщелачивания для оптимизации гранулометрического состава руды и устранения других причин снижения интенсивности выщелачивания. Однако для использования этого способа требуются длительные перерывы в технологическом процессе выщелачивания для подготовки и проведения взрывов.

Электрогидравлический эффект может использоваться для интенсификации процесса выщелачивания без перерывов в его осуществлении. При размещении электроразрядников по определенной сетке в выщелачиваемом блоке, он весь может быть охвачен воздействием возбуждаемых импульсов. Однако высокий расход электроэнергии вряд ли позволит использовать этот способ постоянно. Гидроимпульсаторы могут использоваться непрерывно при закачке вы-

щелачивающих растворов в блок. Их воздействие будет более ощутимым, если гидроимпульсаторы размещать не на устье закачных скважин, а в их забое. Постоянное воздействие гидроимпульсаторов препятствует кольматации и каналированию растворов, что влияет на кинетику выщелачивания – скорость диффузии и массопередачу на границе твердой и жидкой фаз [4].

Для интенсификации процесса кучного выщелачивания химическим методом в выщелачивающие растворы (серная, азотная, соляная кислоты и т.д.) добавляют различные катализаторы, роль которых заключается в изменении скорости или возбуждении химических реакций.

Авторами [5] установлено каталитическое действие Ag при выщелачивании халькопирита раствором сульфата железа (III), позволившее сократить время выщелачивания с 2 ч до 7 минут, и увеличить извлечение меди в раствор. Неблагоприятная кинетика реакции между халькопиритом и окислителем – железом (III) обусловлена торможением в стадии переноса электронов через слой элементарной серы. При добавлении растворимой соли серебра скорость процесса значительно увеличивается, а его реакция идет по схеме:



Известны примеры каталитического ускорения процессов выщелачивания, основанных на протекании окислительно-восстановительных реакций. Так, показано, что при кислотном выщелачивании урана в присутствии окислителей катализирующее влияние оказывает ионы железа [5].

Для выщелачивания свинца и цинка наиболее приемлемыми являются растворы, содержащие серную кислоту и хлорид натрия. Так, при исследовании выщелачивания полиметал-

лических сульфидных руд Архонского рудника Садонского свинцово-цинкового комбината было выявлено увеличение скорости извлечения свинца в 1,42, а цинка – в 1,3 раза при введении в раствор гипохлорита натрия (10 г/л NaOCl) по сравнению с серноокислотно-хлоридным раствором [6].

Комплексный анализ кинетических закономерностей поведения MoS_2 , FeS_2 , ZnS и других сульфидов при окислительном растворении в присутствии HNO_3 и NaOCl позволил определить условия их эффективного и селективного выщелачивания. При перколяционном выщелачивании молибдена из руды, измельченной до размера частиц 0 -10 мм, щелочным раствором NaOCl ($C_{\text{NaOCl}} = 0,1$ моль-дм⁻³) в течении 23 суток достигнуто извлечение 95,8 % [5].

Начиная с 80-х годов XX века при переработке упорных золото-серебросодержащих руд используется система хлоридного выщелачивания, при которой более 95 % золота и серебра извлекалось в условиях использования гипохлорита натрия как основного растворителя [7]. Основное преимущество кислотного гипохлоритного процесса – высокая скорость растворения золота, с другой стороны, высокая степень взаимодействия активного хлора с большим числом составляющих компонентов руды ведет к повышению его расхода и загрязнению полученных продуктивных растворов.

Широкое использование в качестве окислителя при выщелачивании сульфидов получил кислород. В зависимости от температуры и pH среды реакция может протекать с образованием элементарной серы или ионов SO_4^{2-} . Поверхность S, с которой идет диффузия, может быть увеличена за счет измельчения рудной массы, од-

нако чрезмерное измельчение может значительно ухудшить процесс выщелачивания из-за снижения фильтрационной способности. Свободная поверхность рудных минералов быстро окисляется, затем окислительные реакции перемешаются внутри зерна и замедляются.

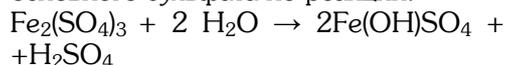
Рядом исследователей было показано, что сульфиды меди и цинка (сфалерит) активно окисляются трехвалентным железом

$$\text{ZnS} + 2\text{Fe}^{3+} = \text{Zn}^{2+} + \text{S}^0 + 2\text{Fe}^{2+}$$

Проведенные лабораторные испытания по окислению сульфидных минералов в присутствии иона Fe^{3+} (10 г/л) выявили значительное влияние температуры на эффективность окисления медно-цинкового сырья [5].

Источником сульфата железа (III) являются пирит и железосодержащие медные минералы, при окислении которых в кислой среде кислородом воздуха вначале образуется сульфат железа (II), а затем сульфат железа (III), но эти реакции в указанной среде протекают чрезвычайно медленно.

Двухвалентное железо с большей скоростью может окисляться кислородом воздуха при значениях pH выше 3, но при этом происходит гидролиз трехвалентного железа с образованием основного сульфата по реакции:



Эта реакция заложена в основу гидрометаллургического производства цветных металлов и методов очистки растворов от железа [8].

Учитывая неблагоприятные условия окисления сульфата железа (II) и возможность осаждения трехвалентного железа в виде основного сульфата в условиях подземного и кучного выщелачивания, в ряде случаев для интенсификации растворения сульфидов добавляют серноокислую окись железа к циркулирующим растворам.

Таким образом, сульфидные медные минералы при отсутствии кислорода практически нерастворимы в разбавленной серной кислоте. Они превращаются в растворимые соединения лишь после предварительного окисления кислородом воздуха, сульфатом железа (III) или в результате воздействия бактерий. В промышленном масштабе производства меди методом выщелачивания серная кислота может служить растворителем, в основном, для окисленных минералов меди. Для перевода в раствор сульфидных соединений требуются растворители с большой окислительной способностью.

Кислород в жидкой фазе (помимо серной кислоты) является активной составляющей, в значительной степени определяющей эффективность процесса выщелачивания металлов из сульфидных полиметаллических руд.

Одним из способов насыщения жидкой фазы кислородом является электрохимическая обработка, в результате которой образуются тонкодисперсные пузырьки кислорода. В УРАН ИПКОН РАН была разработана технология электрохимической обработки воды в бездиафрагменном электролизере, с использованием электродов из титана с иридиево-рутениевым (ОИРТА) и оксидно-рутениевым (ОРТА) покрытием. Эта технология позволила повысить содержание кислорода до 30 мг/л, что в 3,6 раза больше в сравнении с содержанием кислорода в исходной подотвальной воде. Обработка велась при плотности тока на электродах 20-100 А/м², в течении 1-3 минут.

Обработанная данным методом подотвальная вода использовалась для выщелачивания пробы сульфидной медно-цинковой руды Молодежного месторождения Учалинского ГОКа. В результате экспериментов

был найден оптимальный режим электрохимической обработки подотвальной воды, что позволило повысить содержание меди в жидкой фазе пульпы со 127 до 1700 мг/л, т.е. более чем в 13 раз [9].

В течение последних лет бактериально-химическое выщелачивание сульфидов металлов получило широкое развитие. Извлечение ценных компонентов из минералов с помощью микроорганизмов служит на сегодняшний день признанным биотехнологическим способом переработки сульфидных руд. Эта технология является экономически выгодной и экологически безопасной. Биоготехнология подразумевает использование хемолитотрофных микроорганизмов, источником энергии для которых служат неорганические соединения (в том числе, сульфидные минералы). Роль микроорганизмов в процессах биовыщелачивания заключается в окислении Fe^{2+} до Fe^{3+} (мощного окислителя сульфидов металлов), окислении элементарной серы и восстановлении соединений серы, образовании серной кислоты, поддержании кислой реакции среды. Затраты на данную технологию ниже, чем на обычные пирометаллургические и гидрометаллургические операции. Обрабатывающие установки могут быть построены в непосредственной близости к рудным залежам, что сократит транспортные расходы [10]. Однако бактериально-химическое выщелачивание имеет следующие существенные недостатки: длительная продолжительность процесса; сильная зависимость процесса от температуры и физико-химических свойств растворов.

Анализируя рассмотренные способы интенсификации процесса кучного выщелачивания, можно сделать следующие выводы:

- для интенсификации процесса кучного выщелачивания применяются различные виды воздействий на руду (физические, механические, химические, биологические), большинство из которых направлены на ускорение перевода ценных компонентов из руды в продуктивный раствор и повышение его качества (содержание и извлечение металлов);

- физические и механические методы интенсификации в основном применяют при снижении фильтрационных свойств породы, поэтому важную роль играет выбор крупности руды, способ закладки и орошения кучи;

- для увеличения скорости растворения металлов в раствор вводят различные катализаторы (ионы Fe^{3+} , Ag,

$NaOCl$, O_2 и т.д.), что позволяет уменьшить продолжительность кучного выщелачивания;

- процесс кучного выщелачивания является малозатратным, поэтому методы интенсификации должны отличаться простотой и дешевизной. К таким методам можно отнести электрохимическую обработку подотвальной воды, которая позволяет значительно повысить эффективность выщелачивания;

- обработка подотвальной воды электрохимическим методом позволяет повысить концентрацию в ней кислорода, что в значительной степени повышает извлечение металлов из сульфидных минералов в продуктивный раствор.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трубешкой К.Н., Чантурия В.А., Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В. Комплексное освоение месторождений и глубокая переработка минерального сырья. – М. Наука 2010, с.270.
2. Халезов Б.Д. Исследования и разработка технологии кучного выщелачивания медных и медно-цинковых руд. Автореферат. Диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Екатеринбург 2008.
3. Белин В.А., Логачев А.В., Исмаилов Т.Т. Управление параметрами взрыва при подготовки руд к выщелачиванию. Горный информационно-аналитический бюллетень № 11/2008.
4. Жалгасулы Н., Битимбаев М.Ж., Черный Г.М., Тумаков В.А. Физико-химические способы интенсификации выщелачивания цветных металлов. Горный информационно-аналитический бюллетень № 3/2005.
5. Черняк А.С. Химическое обогащение руд. М.: Недра, 1987.
6. Мирешкий А.В., Кондратьев Ю.И. Выщелачивание полиметаллических руд серноокислотно-хлоридными растворами. Журнал «Известия вузов. Цветная металлургия» Содержание №4, 2006.
7. Фазлуллин М.И. "Кучное выщелачивание благородных металлов", М., АГН, 2001, 96-103 с
8. Набойченко С.С. Смирнов В.И. Гидрометаллургия меди. Москва, изд. "Металлургия", 1974.
9. Чантурия В.А., Миненко В.Г., Двойченкова Г.П., Каплин А.И. Электрохимическая технология водоподготовки в процессах флотации и выщелачивания Cu-Zn колчеданных руд. ИП-КОН РАН, 2008.
10. Каравайко Г.И., Дж. Росси Биотехнология металлов. Практическое руководство./ Под ред. Г.И. – М., 1989. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Самусев Андрей Леонидович – аспирант, Московский государственный горный университет, Moscow State Mining University, Russia, ud@msmu.ru
Научный руководитель – Чантурия Елена Леонидовна, доктор технических наук, профессор.