

УДК 336

Т.Т. Исмаилов, А.В. Логачев, Б.С. Лузин, В.И. Голик
МОДЕРНИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ИЗВЛЕЧЕНИЯ
ЗОЛОТА ИЗ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ

Рассмотрены вопросы комбинирования традиционной горной технологии с новыми технологиями. Приведены результаты интенсификации извлечения компонентов при экспериментальном выщелачивании золота в электрическом поле. Уточнен механизм механической активации с одновременным воздействием химических реагентов. Приведена классификация способов интенсификации процессов выщелачивания по признаку энергетического воздействия на минерал.

Ключевые слова: добыча руд, выщелачивание, хвосты обогащения, процесс экстракции, извлечение металлов.

**T.T. Ismailov, A.V. Logachev,
B.S. Luzin, V.I. Golik**
**THE IMPROVEMENT OF THE
TECHNOLOGIES FOR GOLD
EXTRACTION FROM REFINEMENT
TAILINGS**

The issues of combining the traditional mining technology with the new ones are reviewed. The results of the intensification of the component extraction during the experimental leaching of gold in the electric field are given. The mechanism of mechanical activation with the simultaneous chemical treatment is revised. The classification of the intensification methods for leaching based on the energetic impact on the mineral is given.

Key words: ore mining, leaching, refining tailings, extraction process, metal extraction.

Современное горное производство все в большей мере сочетает элементы традиционной горной технологии с новыми технологиями: кучным и электро-сорбционным выщелачиванием, электрохимическим извлечением, гидрометаллургическим переделом растворов и т.п. Сырьем для повторного извлечения золота все чаще становятся

отходы обогащения руд с содержанием от 0,6 г/т.

Практикой выщелачивания золота из хвостов обогащения установлены основные закономерности:

- в ходе выщелачивания скорость уменьшается, а время увеличивается;
- на поверхности частиц руды образуются вторичные минералы;
- в процессе выщелачивания крупность минеральных частиц уменьшается;
- лучшим осадителем золота из хлоридных растворов является едкий натр;
- в штабеле происходит фракционирование горной массы;
- выщелачивание интенсифицируется между участками разной влажности.

Для интенсификации извлечения компонентов при выщелачивании применяют электрические поля. Применение импульсных токов частотой 3-7 Гц, а также 1-30 Гц с наложением импульсного тока на постоянный ток в гидрометаллургии позволяет интенсифицировать процессы, улучшить качество извлекаемых металлов и сократить затраты энергии.

Таблица 1

Показатели выщелачивания хвостов обогащения реагентами

Раствор, дм ³	Содержание в фильтрате в колоннах, мг/дм ³									
	1		2		3		4		5	
	Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag
Серная кислота 30 мг/дм ³										
50	8,9	60,2	9,2	64,0	8,6	62,7	9,0	63,8	8,4	69,0
Соляная кислота										
50	14,8	85,0	14,0	93,0	15,3	83,9	13,0	90,0	16,0	89,9
Активированные стоки										
50	89,0	273	87,4	281	95,1	260	79,5	255	90,3	264,0
100	35,4	178	33,5	199	38,4	173	40,2	179	37,8	189,6

Для интенсификации процесса выщелачивания улучшают возможности контакта рудного материала с рабочим раствором: пневматическое или механическое перемешивание измельченного материала с растворителем и просачивание, фильтрацию растворителя сквозь слой материала в виде куч, отвалов, рудных массивов и т.п.

Интенсифицировать процесс экстракции и увеличить производительность аппаратуры позволяет кислотная обработка материалов в кипящем слое.

Подачу растворов чередуют с паузами, что ускоряет окислительные процессы. Принудительная аэрация при выщелачивании, например, медных руд позволяет увеличить извлечение металла с 65 до 80%.

Для интенсивного выщелачивания одного из металлов и предотвращения извлечения в раствор другого металла используют естественную растворимость минералов. Так, при гидрометаллургии цинка осуществляется основная реакция растворения оксида цинка, при которой примеси кремнезема, свинца и кальция в раствор практически не переходят. Но соединения железа, меди, кадмия, мышьяка, сурьмы и кобальта взаимодействуют с образованием растворимых сульфатов или других соединений.

Экспериментальное выщелачивание золота проводили при темпера-

туре 18-20 °С, давлении 760 мм рт. ст. в 5 колоннах диаметром 1,0 м, высотой 1,2 м. Скорость фильтрации растворов - 1,5-2 дм³/ч. Каждые 10 дм³ раствора, вышедшего из колонны, отстаивались в течение 2-3 часов и опробовались. Через колонну пропускать 50 дм³ раствора. Остаток промывали до pH=7,0, высушивали и определяли содержание извлечение золота по твердому остатку (табл. 1).

Интенсивность извлечения металлов оказалась неодинаковой. В первой порции (10 дм³) извлекается больше серебра, во второй (20 дм³) металлы уравниваются, а уже в шестой золото опережает серебро.

Наиболее активно металлы извлекаются при отношении твердого вещества к жидкому 1:400 по объему. Если за полный цикл выщелачивания при пропускании через колонну 150 дм³ раствора извлечено 62% серебра и 38% золота, то после отстоя и пропускания еще 100 дм³ извлечение достигло 75% серебра и 52% золота.

Обработка высушенного остатка показала уменьшение массы на 15% при уменьшении выхода классов -25 +15 мм на 27%, что говорит о разрушении минералов под влиянием физико-химических процессов. В данном случае при извлечении из хвостов флотации 75% серебра и 52% золота хвосты разрушаются и по свойствам становятся аналогами песка.

Среди способов интенсификации процесса экстракции особое место занимает механо - активация руд. Установлено, что скорость выщелачивания зависит и от побочных реакций, переводящих тот или иной компонент из нерастворимого природного соединения в растворимую форму. Например, выщелачивание золота цианистыми растворами связано с окислением кислородом воздуха, а восстановление марганца и его растворение - с восстановлением водородом.

Различают механическую активацию без применения реагентов и с применением реагентов при измельчении. В первом случае в процессе участвуют только твердое вещество и растворитель, а во втором - еще и реагент, взаимодействующий с твердым веществом, переводя его в растворимое состояние.

Примером безреагентной активации служит обработка серебро - марганцевых руд в морской воде, так как при этом не усиливаются окислительно-восстановительные реакции, и измельчение тех же руды в присутствии металлического железа, когда взаимодействие ионов железа с рудой и водой приводит к восстановлению марганца и его выщелачиванию.

Сухое измельчение сопровождается эффектом активации поверхности микрочастиц более сильным, чем при мокром измельчении. Так, олово не растворяется в отдельно взятых кислотах и только при обработке поверхности касситерита смесью плавиковой и серной кислоты в раствор переводится некоторое количество олова.

Предварительная обработка касситерита механическими воздействиями увеличивает скорость растворения олова до 600 раз. Еще более высокие показатели достигнуты при активации касситерита измельчением в воде в

высоко - энергонапряженной мельнице и выщелачивании концентрированной серной кислотой при температуре кипения. Сухое измельчение обеспечивает еще более сильный эффект. При измельчении без воды в присутствии абразивов, касситерит практически полностью растворяется в 20% серной кислоте. Увеличение продолжительности активации приводит к монотонному возрастанию скорости растворения.

Труднорастворимый лепидолит после механоактивации в течение 10 минут становится доступным для выщелачивания, в результате которого в раствор переходит практически весь алюминий и щелочные металлы.

Механоактивация интенсифицирует не только чисто химическое растворение, но и усиливает эффект бактериального выщелачивания. Так, активация измельчением оловянного концентрата с высоким содержанием мышьяка, который подлежал удалению методом бактериального растворения, в 11-13 раз увеличивает массу мышьяка, переходящего в раствор.

Сульфидные руды перед выщелачиванием с целью восстановления металлов и дополнительного вскрытия полезных минералов подвергают обжигу. При переработке свинцово-цинковых, золоторудных и медно-никелевых руд этот метод высокопроизводителен и экономичен, но сопряжен с необходимостью улавливания отходящих газов, в которых помимо оксида серы, содержатся вредные и токсичные оксиды мышьяка, селена и теллура, которые отделяют от оксида серы и обезвреживают. Обжиг плохо сочетается с предшествующими технологическими процессами: обогащение, преимущественно флотация, дает тонкоизмельченный продукт в виде пульпы, которую перед обжигом следует подвергнуть гущению, сушке.

После обжига продукт вновь надо соединить с водой и вновь измельчать.

Механоактивация взамен обжига освоена при переработке пиритного сырья, при обжиге которого извлекается элементарная сера, используемая для получения серной кислоты. Пиритный концентрат активируют в 20% растворе NaOH. После двухнедельной выдержки при комнатной температуре выделяют около 60% магнетита, а из раствора осаждают 40% серы от содержащейся в исходном продукте.

Скорость окисления сульфидов заметно возрастает при введении в пульпу твердых окислителей, например, 1-5% пирролизита от массы сульфидного концентрата. Соли азотной кислоты также ускоряют окислительное разложение сульфидов.

Наиболее эффективным видом механических воздействий является измельчение. Другие виды механических воздействий - вальцевание, перетирание, перемешивание, создание высокого давления, продавливание сквозь отверстия - нашли применение преимущественно при переработке полимеров.

Для объяснения процессов, происходящих при механических реакциях, используются термические, экзотермические, кинетические, структурные и другие представления, например, повышение температуры свыше 1000 °С в точках контакта мелющих тел. Например, на участках размером 10^{-3} - 10^{-5} см² высокая температура возникает в течение 10^{-4} сек.

Растворимость минералов используется для интенсивного выщелачивания одного из них и предотвращения извлечения в раствор другого. При этом имеющиеся в исходном материале примеси кремнезема, свинца и кальция в раствор практически не переходят. Но соединения железа,

меди, кадмия, мышьяка, сурьмы и кобальта взаимодействуют с образованием растворимых сульфатов или других соединений. Удаётся частично предотвратить выщелачивание этих примесей, так как они взаимодействуют с разбавленной серной кислотой медленнее, чем оксид цинка.

В первой стадии экстракции в раствор переходит часть цинка, но не переходит железо. Нерастворенный остаток подвергают кислому выщелачиванию (до 100 г/л H₂SO₄). Раствор отделяют от нерастворимого остатка в сгустителях с последующим фильтрованием сгущенного продукта. В нем остается около 10% цинка, весь свинец, все золото и серебро, около 50% меди и часть кадмия. В дальнейшем из раствора постепенно выводятся все существующие элементы кроме цинка.

Возможности отделения сопутствующих элементов перед выщелачиванием значительно расширяют магнитные, гравитационные, и иные способы. Например, способ гравитационного обогащения вольфрам-содержащих руд, при котором предварительное обогащение мелкодробленной руды в тяжелых средах позволяет в несколько раз увеличить содержание полезного компонента. Снижение крупности материала сопровождается повышением степени раскрытия и увеличением поверхности контакта полезных минералов с рабочим раствором.

Для выяснения роли активации в извлечении металлов сравнивали параметры выщелачивания соляной кислотой и анолитом электрохимического разложения, которое производится в одном случае орошением, а в другом – подается в рабочий орган деинтегратора, где извлечение металлов в раствор совпадает с разрушением кристаллов, а выщелачивающий

Таблица 2

Извлечение металлов из хвостов обогащения

Серия	Переведено в раствор			
	Золото		Серебро	
	г	%	г	%
Орошение раствором соляной кислоты				
Средняя	119	51	12	18
Орошение анолитом				
Средняя	158	67	28	42
Анолит в дезинтеграторе				
Средняя	176	75	34	51

раствор запрессовывался в образующиеся при деформации частиц трещины (табл. 2).

Комбинированная активация в ки-

слой среде при больших оборотах ротора в течение 60 мин. увеличивает извлечение металлов из хвостов обогащения почти в два раза (табл.3).

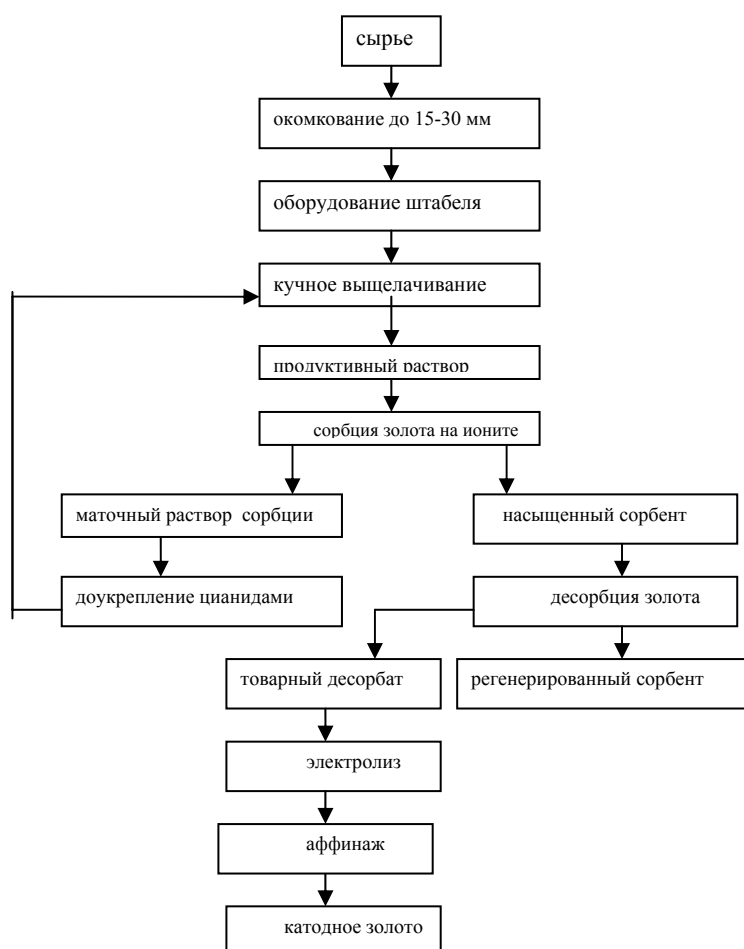
**Технологическая схема кучного выщелачивания золота**

Таблица 3

Выщелачивание золота соляной кислотой, %

Извлечение	Концентрация соляной кислоты, %						
	4,0	6,0	8,0	10,0	12,0	16,0	20,0
Выщелачивание в перколяторе							
ε, %	8,7	17,7	26,2	30,4	36,8	39,0	42,4
Выщелачивание в дезинтеграторе							
ε, %	20,1	31,4	42,3	47,0	53,1	56,6	60,9

Таблица 4

Классификация способов интенсификации выщелачивания золота

Класс, способ	Группа	Принцип реализации	Вариант
Физические	1	Электрокинетика	Наложение электрического поля для возбуждения электроосмотического, электрохимического и поляризационного эффектов.
	2	Электромагнетизм	Наложение высокочастотного электромагнитного поля для активации реакций на границе раздела фаз.
	3	Магнитоимпульс	Магнитоимпульсная обработка зон переуплотнения штабеля.
	4	Магнитоиндукция	Омагничивание рабочего раствора выщелачивания.
	5	Ультразвук	Зондирование штабеля для выявления зон переуплотнения с последующей ликвидацией. Ускорение фильтрационно-диффузионных реакций.
			Обработка раствора выщелачивания ультразвуком в режиме кавитации для повышения ОВП за счет изменения соотношения Fe^{2+}/Fe^{3+} в сторону <1 .
6	Теплоаэрация	Нагнетание в штабель подогретого азота, кислорода, сжатого воздуха.	
Химические	1	Кислотная	Предварительная кислотная обработка сырья для вывода цветных металлов и стабилизации солевого состава продуктивных растворов выщелачивания а.
	2	Реагентная	Изменение реагентного состава раствора выщелачивания.
	3	Активация	Применение катализаторов и поверхностно-активных веществ (ПАВ).
	4	Окисление	Введение в процесс выщелачивания окислителей.
Механические	1	Гидродинамика	Промывка штабеля КВ водонапорными струями.
	2	Динамическая	Перемещение сырья на компенсационные пространства.
	3	Пневмоимпульс	Шевеление сырья в штабеле КВ.
	4	Взрывная	Встряхивание штабеля КВ взрыванием зарядов ВВ.

Комбинированные	1	Физхимия	Комбинированное использование физических и химических способов.
	2	Физмеханика	Комбинированное использование физических и механических способов
	3	Химмеханика	Комбинированное использование химических и механических способов.
	4	Физхиммеханика	Комбинированное использование физических, химических и механических способов интенсификации.

Процесс выщелачивания в штабелях лимитируется подводом цианид-иона (CN) и кислорода (O_2). Соотношение концентрации свободных ионов CN^- к O_2 на уровне 5-6 достигается при $pH = 9-10$, что позволяет за 16-18 часов перевести 40-60% золота в поровое пространство гранул. До 70% золота из хвостов флотации крупностью $-1,5 + 0,074$ мм при прямом цианировании извлекается за 18-24 часа.

Способы интенсификации процессов выщелачивания систематизированы нами по признаку энергетического воздействия на минерал (табл. 4).

Выщелачивание золота из бедных руд и хвостов флотационного обогащения в зависимости от режима процесса при $pH = 9-10$ позволяет перевести в поровое пространство 40-60% золота и является адекватным процессом с определяемой экспериментально характеристикой.

Кучное выщелачивание по сравнению с другими методами более эко-

номично. Удельные затраты сокращаются в этом случае в 2-5 раз (рис.).

Сочетание традиционной горной технологии с новыми технологиями: кучным и электро-сорбционным выщелачиванием, электрохимическим извлечением, гидрометаллургическим переделом растворов и т.п. позволяет использовать ранее считавшееся некондиционным сырье, например, отходы флотационного обогащения руд с содержанием до 0,6 г/т. Это достигается использованием постоянно совершенствующихся технологий интенсификации процессов выщелачивания.

При этом затраты на производство золота могут быть снижены в 3-4 раза, себестоимость - в 1,5-2 раза, что особенно важно в современных экономических условиях. Поэтому технологии интенсификации процессов являются ключом для решения глобальной проблемы металлосодержащих отвалов.

ГЛАВ

Коротко об авторах

Исмаилов Т.Т. – кандидат технических наук, доцент, Московский государственный горный университет, Moscow state mining university, Russia, ud@msmu.ru

Логачев А.В. – кандидат технических наук, доцент, Южно-Российский государственный технический университет, ngtu@novoch.ru

Голик В.И. – доктор технических наук, профессор, Северо-Кавказский горно-металлургический институт, v.i.golik@mail.ru

Лузин Б.С. – доктор экономических наук, Северо-Кавказский горно-металлургический институт, v.i.golik@mail.ru