

УДК 622.765

И.В. Пестряк, С. Хандмаа, Ж. Баатархуу

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМБИНИРОВАННОЙ
ФЛОТАЦИОННО-БИОГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ
ПЕРЕРАБОТКИ МЕДНО-МОЛИБДЕНОВЫХ РУД**

Разработаны технические решения для повышения эффективности комбинированной обогатительно-гидрометаллургической технологии. в результате проведенных исследований выбраны рациональные параметры и схема переработки промпродуктов, позволяющие более эффективно извлекать ценные компоненты за счет стадийного извлечения раскрытых первичных сульфидных минералов меди с использованием процесса флотации, а так же поверхностно измененных зерен и закрытых сростков сульфидных минералов меди, вторичных и окисленных минералов меди с применением биогидрометаллургической технологии. Разработанная технология позволяет повысить эффективность переработки медно-молибденовых руд на обогатительной фабрике ГОКа «Эрдэнэт».

Ключевые слова: руда, сульфидоносность промпродукта, флотация, биоокисление, бактериально-кислотное выщелачивание.

Перспективным направлением повышения эффективности обогащения руд сложного минерального состава является разработка и применение комбинированной обогатительно-биогидрометаллургической технологии переработки продуктов схемы обогащения медно-молибденовых руд [1, 2].

В промпродукте объединяются хвосты перечистой и пенный продукт контрольной флотации цикла коллективной медно-молибденовой флотации и концентрируются фракции промежуточной флотуемости. Согласно классической схеме промпродукт направляется в голову процесса. Это ведет к накапливанию фракций промежуточной флотуемости и перегрузке промпродуктового цикла [3]. Результаты минералогического анализа исходной руды, промпродукта и конечных хвостов показывают, что в промпродукте концентрируются вторичные сульфидные и окисленные ми-

нералы меди, а так же сростки медных минералов с пиритом.

Использование комбинированной флотационно-биогидрометаллургической технологии позволяет извлечь из измельченной руды как легкофлотуемые свободные зерна ценных компонентов, так и не извлекаемые флотацией открытые и закрытые сростки ценных минералов с пиритом и минералами вмещающих пород.

Общая массовая доля сульфидов в промпродукте выше в 2,5 раза чем в исходной руде и в 3,4 раза чем в отвальных хвостах. Повышенная сульфидоносность промпродукта является благоприятным фактором для продуктивной деятельности бактерий типа *Тиобациллу*с феррооксиданс *Тиобациллу*с тиооксиданс. Характерно, что в промпродукте происходит снижение в 4 раза массовой доли карбонатных породообразующих минералов, что является благоприятным фактором для

применения технологии кислотного выщелачивания.

Анализ показывает, что при крупности измельчения 62—65 % класса – 74 мкм большая часть (73,14 %) минералов меди находится в свободной форме (табл.1). Однако медные минералы, находящиеся в классе –44 мкм плохо извлекаются флотацией. Микроскопические исследования показали, что другой причиной низкого извлечения минералов меди, особенно вторичных сульфидов, являются образующиеся на них поверхностные пленки. Характерно, что значительная доля минералов меди находится в открытых (26,3 %) и закрытых (2,24 %) сростках, чем обусловлена невозможность получения богатого концентрата и значительные потери с отвальными хвостами. Дальнейшее измельчение промпродукта нецелесообразно из-за переизмельчения руды и перехода ценных компонентов в трудно извлекаемые шламовые фракции. Наличие закрытых сростков предполагает необходимость применения методов выщелачивания, позволяющих в отличие от флотации эффективно извлечь ценные компоненты.

Несмотря на использование бактерий, протекающие химические процессы подчиняются основным термодинамическим законам. Применение методики термодинамического моделирования позволяет определить оптимальные условия для растворения окисленных минералов меди, образующихся вследствие протекающих окислительных процессов [4].

Для установления закономерностей образования и концентрирования ионов тяжелых металлов в фильтрах выщелачивания был проведен термодинамический анализ процессов окисления и растворения минералов меди, карбонатных породобразующих минералов. Результаты расчетов, представленные в виде

уравнений реакций межфазных переходов, соответствующих им соотношений между концентрациями ионно-молекулярных компонентов реакций и диаграмм термодинамически стабильных соединений в координатах $Lg[CO_3] - pH$, представляют собой физико-химическую модель, позволяющую оценить равновесные концентрации ионов металлов в фильтрах выщелачивания.

Результаты термодинамических расчетов (рис. 1) показали, что на поверхности минералов в условиях флотации и выщелачивания протекают существенно отличающиеся химические процессы.

Процессы флотации протекают в условиях образования на поверхности медных минералов окисленных соединений типа гидроокислов и гидрокарбонатов (рис. 1, а), эффективно взаимодействующих с ионогенными собирателями, обеспечивающими гидрофобизацию и флотацию. В условиях выщелачивания на поверхности сульфидных минералов меди протекает окислительная реакция, сопровождающаяся образованием хорошо растворимых минералов меди и железа (при pH около 2,0) не препятствующих доступу окислителя к поверхности минерала.

Анализ реакций растворения окисленных минералов меди в кислой среде и построенных на их основе диаграмм термодинамической стабильности (рис. 1, а) показал, что в кислой среде возможно получение наиболее концентрированных по меди растворов. Ведение процесса выщелачивания в слабокислой среде значительно снижает равновесную концентрацию ионов меди и, следовательно, эффективность выщелачивания. Так достижимая концентрация ионов меди при pH = 5-6 (наблюдается при выщелачивании в растворе

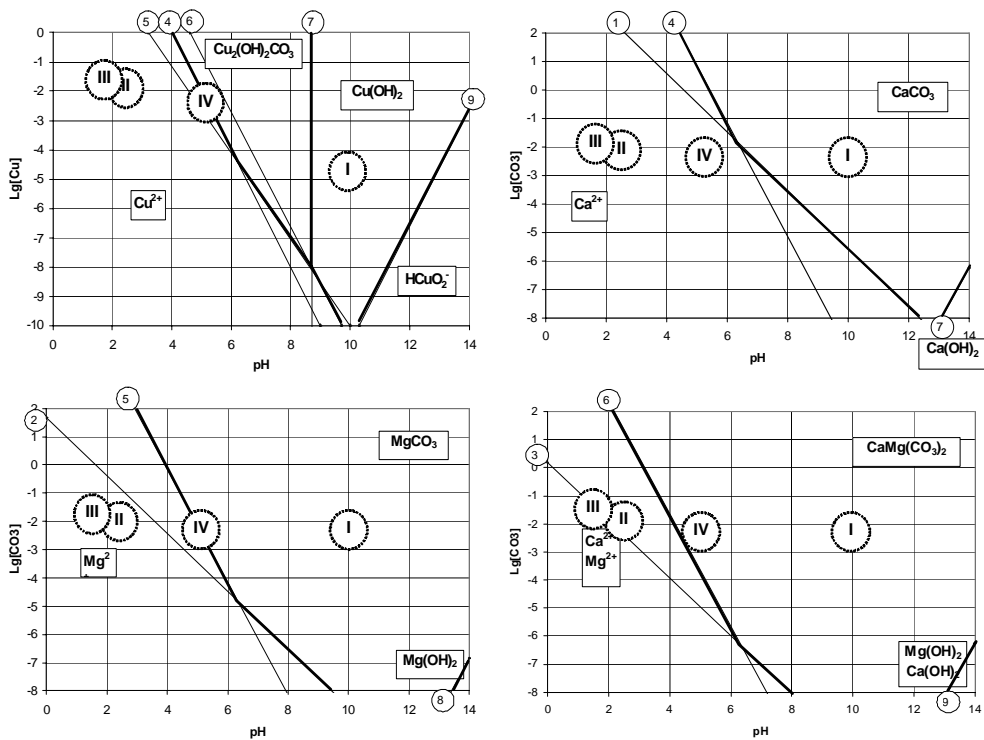


Рис. 1. Диаграммы термодинамической стабильности окисленных соединений меди (а) и породообразующих минералов (б — кальцита, в — магнезита, г — доломита) в условиях флотации и выщелачивания: 1 — область коллективной флотации; 2 — область кислотного выщелачивания; 3 — область бактериального выщелачивания; 4 — область аммонийного выщелачивания

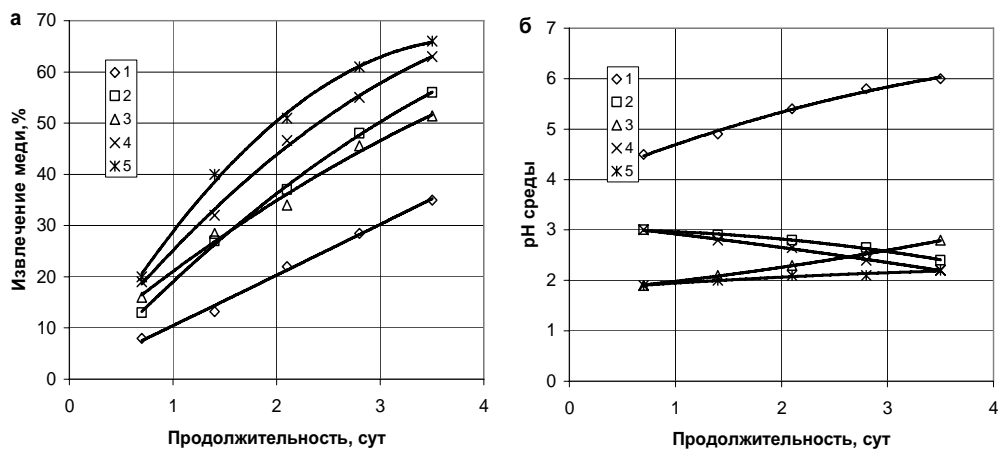


Рис. 2. Зависимости извлечения меди в раствор (а) и изменения pH от времени эксперимента: 1 — аммонийное выщелачивание; 2 — аммонийно-бактериальное выщелачивание; 3 — бактериальное окисление; 4 — сернокислотное выщелачивание; 5 — бактериально-кислотное выщелачивание

Таблица 2

Результаты испытаний режимов выщелачивания хвостов промпродуктового цикла

№	Режим выщелачивания	Соотнош. Т:Ж	Начальное рН р-ра	Конечное рН р-ра	Извлечение меди в раствор, %
При температуре 32—36 ⁰ С					
1	Бактериально-кислотный, с одновременно загрузкой биомассы и кислоты	1:3	2,41	2,2	63,1
		1:2	2,32	2,15	65,2
		1:1	2,23	2,12	65,4
2	Бактериально-кислотный, с предварительной загрузкой биомассы	1:3	2,32	2,92	62,1
		1:2	2,21	2,64	64,1
		1:1	2,02	2,50	65,0
3	Сернокислотный	1:3	2,44	2,95	58,1
		1:2	2,30	2,82	60,2
		1:1	2,18	2,73	61,4
При температуре 20—24 ⁰ С					
1	Бактериально-кислотный, с одновременно загрузкой биомассы и кислоты	1:3	2,36	2,18	54,1
		1:2	2,28	2,14	56,2
		1:1	2,18	2,10	57,4
2	Бактериально-кислотный, с предварительной загрузкой биомассы	1:3	2,28	2,88	51,1
		1:2	2,20	2,61	52,2
		1:1	2,00	2,45	53,4
3	Сернокислотный	1:3	2,41	2,91	50,1
		1:2	2,30	2,80	52,2
		1:1	2,18	2,71	53,4

сульфата аммония) составляет 10^{-4} — 10^{-3} моль /л (6– 60 мг/л). Это может привести к низкой эффективности выщелачивания или необходимости ведения процесса в сильно разбавленных пульпах [5].

К негативному эффекту будет приводить и автоподщелачивание растворов при протекании процессов гидролиза карбонатных ионов. Для оценки вероятности протекания процессов гидролиза были изучены реакции растворения карбонатных породообразующих минералов в условиях кислотного выщелачивания. Анализ диаграмм термодинамической стабильности, представленных на рис. 1 б, в, г показал, что кальцит, магнезит и доломит разлагаются в кислой и сильно кислой среде при рН больше 4—5. Поэтому, избежать реакций гидролиза и подщелачивания в присутствии карбонатных породообразующих минералов невозможно.

Эффективным путем повышения эффективности кислотного выщелачивания является удаление карбонатных минералов или применение технологии кислотного выщелачивания для продуктов, обедненных карбонатными породообразующими минералами.

При сравнительном изучении результатов выщелачивания хвостов промпродуктовой флотации по 5 технологическим режимам было установлено, что по скорости перехода меди в раствор и конечному извлечению меди в раствор исследованные процессы следует расположить в следующей последовательности: 1. Бактериальное + сернокислотное выщелачивание; 2. Прямое кислотное выщелачивание; 3. — выщелачивание с предварительным биоокислением. Применение бактериального выщелачивания сопровождается подкислением растворов, что предотвращает выпадение ионов железа в виде гидроокислов и способствует более быстрому выщелачиванию (рис. 2, б).

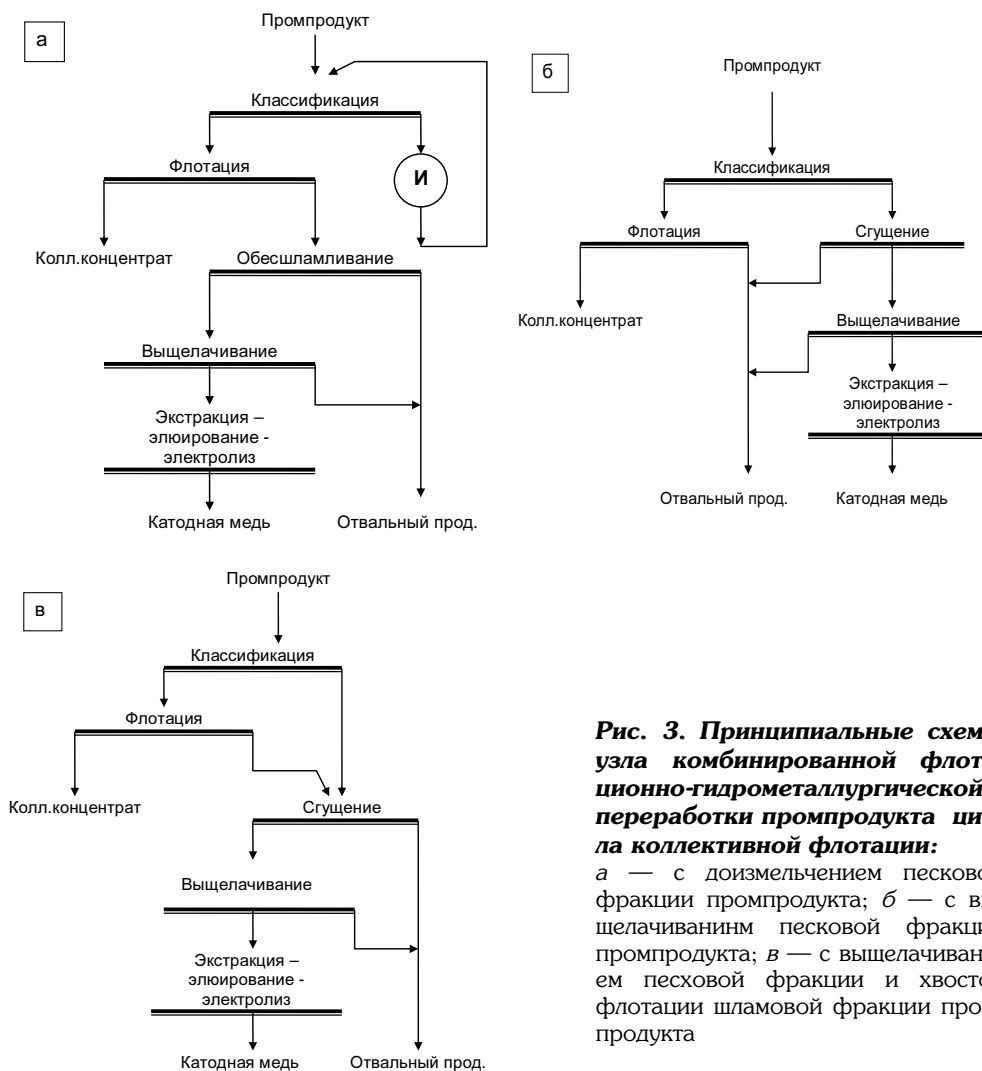


Рис. 3. Принципиальные схемы узла комбинированной флотационно-гидрометаллургической переработки промпродукта цикла коллективной флотации:
 а — с доизмельчением песковой фракции промпродукта; б — с выщелачиванием песковой фракции промпродукта; в — с выщелачиванием песковой фракции и хвостов флотации шламовой фракции промпродукта

Смещение рН в кислую область увеличивает извлечение меди в раствор.

Наилучшие результаты получают при температуре 32—33 °С и соотношении Т:Ж от 1:1 (табл. 2). Характерно, что при бактериально-кислотном выщелачивании лучшие результаты достигаются при относительно более низких температурах, чем при кислотном выщелачивании.

При выборе принципиальной схемы флотационно-био-гидрометаллургической переработки промпродуктов рассматри-

вались три варианта. Первая схема (рис. 3, а) предполагала проведение операции выщелачивания хвостов промпродуктовой флотации, проводимой после необходимого доизмельчения песковой фракции. На флотацию поступал материал крупностью 72 % класса -74 мкм, на выщелачивание — продукт крупностью 67 % кл. -74 мкм. По второй схеме на выщелачивание направлялась песковая фракция операции классификации с содержанием класса -74 мкм 60,5 %.

Таблица 3

Технико-экономические показатели комбинированной флотационно-биогидрометаллургической технологии обогащения медно-молибденовых руд

Характеристика схемы переработки руды,	Извлечение в товарные флотационные концентраты, %		Извлечение при выщелачивании и электролизе, %		Суммарное извлечение, %	
	Cu	Mo	Cu	Mo	Cu	Mo
Флотационная схема (исх.)	84,22	44,50	—	—	84,22	44,50
Комбинир. схема с доизмельч. промпродукта	84,02	44,30	1,20	0,20	85,22	44,50
Комбинир. схема с выщелачив. песковой фракции	83,45	44,15	1,40	0,25	84,85	44,55
Комбинир. схема с выщелачиванием песковой фракции и хвостов флотации	83,60	44,05	1,33	0,22	84,93	44,27

Третья схема (рис. 3, в) предполагала направление на выщелачивание смешанного продукта, включающего хвосты флотации и песковую фракцию операции классификации, с крупностью 62,5 % класса -74 мкм.

Сравнение эффективности представленных вариантов проводилось в полупромышленных условиях с применением технологии бактериально-кислотного выщелачивания. Результаты испытаний показали, что наилучшие результаты достигаются при использовании схемы с доизмельчением песковой фракции промпродукта (табл. 3).

Результаты минералогического анализа минералов меди в отвальных хвостах выщелачивания показали, что при доизмельчении песковой фракции промпродукта в нем на 40—55 % снижается массовая доля поверхностно измененных зерен и закрытых сростков сульфидных минералов меди, вторичных и окисленных минералов меди.

Флотацию целесообразно вести при относительно высоких pH (10,3—10,5). Это больше чем было раньше (9,8—10,3). Это необходимо для того, чтобы пиритные сростки оставались в камерном продукте, а не переходили в концентрат, снижая его качество или теряясь в последующих операциях.

Камерный продукт контрольной промпродуктовой флотации необходимо сгущать до плотности 1:1—1:1,2, что обеспечит минимизацию объемов используемого оборудования и снижение расхода серной кислоты.

Процесс бактериального и кислотного выщелачивания целесообразно совместить и проводить при температуре 25—35⁰С в течение 3—5 суток. Это обеспечит наиболее полное раскрытие медно-пиритных сростков и переход медных минералов в виде ионов в раствор. Начальное pH целесообразно поддерживать в интервале 2,1—2,5, что обеспечит условия для жизнедеятельности бактерий и процесса химического выщелачивания.

Таким образом, в результате проведенных исследований выбраны рациональные параметры и схема переработки промпродуктов, позволяющие более эффективно извлекать ценные компоненты за счет стадийного извлечения раскрытых первичных сульфидных минералов меди с использованием процесса флотации, а так же поверхностно измененных зерен и закрытых сростков сульфидных минералов меди, вторичных и окисленных минералов меди с применением биогидрометаллургической технологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Баатархуу Ж., Туя Ц., Хандмаа С.* Комбинированная технология переработки медно-порфириновых руд // Горный журнал, № 8. — 2004. — С. 69—73.
2. *Хандмаа С.* Исследования по переработки хвостов промпродуктовой флотации обогатительной фабрики совместного предприятия «Эрдэнэт» методом биогидрометаллургического выщелачивания // Горный информационно-аналитический бюллетень, №1. — 2008. — С. 223—234.
3. *Соколов В.И., Морозов В.В.* Повышение эффективности обогащения смешанных медно-молибденовых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2004. — №7. — С. 305—307.
4. *Гаррелс Ч., Крайст Г.* Растворы, минералы, равновесия. — М.: Мир, 1967. — 407 с.
5. *Пестряк И.В., Баатархуу Ж., Хандмаа С.* Переработка промпродуктов обогащения медно-молибденовых руд на основе комбинирования флотационной и биогидрометаллургической технологии // Материалы международной научно-практической конференции «Плаксинские чтения». — Казань, 2010. — С. 19—22. **ГЛАС**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Пестряк И.В. – декан факультета УЦДП,
Хандмаа С. – инженер-исследователь, аспирант,
Московский государственный горный университет,
Moscow State Mining University, Russia, ud@msmu.ru
Баатархуу Ж. – главный обогатитель, «Предприятие «ЭРДЭНЭТ»».



ПАМЯТНИКИ ГОРНЯКАМ

ПАМЯТНИК В ГАННЭДЕ (АВСТРАЛИЯ)

В небольшом австралийском городке Gunnedah (Ганнеда), расположенном в угольном бассейне, который так и называется - Gunnedah Coal Basin, построен мемориал. Он посвящен 20-ти шахтерам, погибшим в этом районе. Статуя в 1,25 натуральной величины изображает шахтера, меняющего крепь. Сломанная крепь у ног шахтера является символом «сломанной» жизни.

Памятник расположен во дворике напротив Ратуши. Этот мемориал стал местной достопримечательностью. Ночью он подсвечивается.

