

УДК 622.7

**МЕХАНИЧЕСКИЙ ВЫНОС И ИСТИННАЯ ФЛОТАЦИЯ
ПРИРОДНОЙ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СУЛЬФИДНОЙ РУДЫ**

А. Абиди¹, К. Эламари², А. Бакауи³, А. Якуби³

¹Горный институт Марракеша, Марокко,

²Лаборатория георесурсов, URAC 42, Факультет науки и техники,

Гелиз, просп. Абделькарим Эльхаттаби, 549, г. Марракеш 40000, Марокко,

³Факультет естественных наук Семлаля, Университет им. Кади Айяда, Марокко,

E-mail: k.elamari@uca.ma

Исследована в лабораторных условиях роль процессов механического выноса и истинной флотации в общем флотационном извлечении. Тесты проводились на природной полиметаллической сульфидной руде горного предприятия Гемасса (Марокко). Также оценивалось воздействие на соотношение механического выноса и истинной флотации двух различных коллекторов — амилового ксантогената калия (АКК) и натриевого диизобутилового дитиофосфината (Аэрофин 3418А). Данные общего и истинного извлечения использованы при построении кинетической модели и подсчете модифицированных флотационных параметров для оценки флотационной селективности разделения халькопирита, галенита, сфалерита, пустой породы и пирротина. Метод Росса оказался наиболее приемлемым для оценки механического выноса комплексной сульфидной руды с высоким содержанием пирротина, тогда как метод Траара завышает роль механического выноса.

Пенная флотация, истинная флотация, амиловый ксантогенат калия, Аэрофин 3418А, сульфиды комплексной руды

В процессе пенной флотации вынос твердых частиц на поверхность обусловлен двумя явлениями: так называемой истинной флотацией и механическим выносом [1]. При истинной флотации извлечение происходит в результате прилипания твердых частиц к пузырькам газа, а при механическом выносе частица минерала находится в капле воды между пузырьками. Твердые частицы могут быть гидрофобными от природы или искусственно наделенными гидрофобностью с помощью соответствующих химических реагентов, главным образом коллекторов. Образовавшийся таким образом агрегат “твердые частицы – пузырек газа” характеризуется более низкой плотностью (< 1) и перемещается из фазы пульпы в фазу пены.

Вероятность P перемещения твердой частицы из фазы пульпы в концентрат путем истинной флотации зависит от трех последовательных этапов, также определяемых термином вероятность: вероятность столкновения (P_c), вероятность присоединения (P_n), вероятность разъединения (P_p) [2, 3]:

$$P = P_c P_n (1 - P_p).$$

Вероятность столкновения P_c возможна для крупных твердых частиц в присутствии маленьких пузырьков в хорошо аэрированной среде, вероятность присоединения P_n возрастает при увеличении гидрофобности частицы, уменьшении размера твердой частицы, увеличении размера пузырьков, уменьшении аэрации среды и увеличении поверхностной скорости газа.

Пузырьки газа и прикрепленные к ним твердые частицы могут разъединиться под воздействием приложенной внешней силы. Выявлено шесть механизмов, с помощью которых воздействующая сила может вызвать распад агрегата частицы и пузырька газа [4].

Для определения энергии разделения решают уравнение равновесия сил, действующих на твердую частицу, прикрепленную к пузырьку газа, в зависимости от размеров, плотности, гидрофобности частиц и поверхностного натяжения фазовой границы жидкость–газ. Расчет энергии для сферических частиц приведен в [5]. Для несферических частиц, не полностью свободных частиц или частиц с поверхностными дефектами (шероховатостью, неоднородностью, примесями) энергия разделения может быть ниже.

Механический вынос твердых частиц (пустой породы) из фазы пульпы в фазу пены происходит вследствие прикрепления этих частиц к воде в потоке пузырьков [6]. Такой механический вынос, составляющий суть проблемы ухудшения качества концентрата, мало зависит от характеристик поверхности частиц (гидрофобных и гидрофильных) и поэтому не является избирательным. Он пропорционален количеству воды, поступающей в концентрат. Модели механического выноса пустой породы в виде соотношений выхода пустой породы и воды описаны в [1, 7–11].

Сложность извлечения путем механического выноса определяется параметрами конструкции флотационной камеры, режимом флотации, характеристиками пены и особенно размером, плотностью и формой частиц: частицы меньшего размера и меньшей плотности больше подвержены механическому выносу, чем крупные частицы большей плотности. Выход с механическим выносом повышается при увеличении скорости подачи воздуха, газового потока и устойчивости пены [12]. Как правило, используют три способа описания процесса механического выноса: гидравлический вынос высокодисперсных частиц жидкостной конвекцией — считается наиболее значимым; механический вынос между смежными пузырьками (долгое выдерживание для крупных в высокогазонасыщенной среде); образование пленок шламов — менее значимый способ [13, 14].

Осаждение частиц из фазы пены в пульпу путем механического выноса зависит от размера частиц в фазе пены [15]. Осаждение протекает избирательно, в зависимости от размера и плотности частиц [2]. Более крупные и плотные частицы оседают быстрее, чем мелкие и менее плотные. Повторное присоединение может произойти к менее загруженным пузырькам или пузырькам, перемещающим менее гидрофобные частицы. Повторному присоединению может способствовать продолжительность пребывания в пенной фазе, т. е. высота пены [2].

Цель данной работы заключается в оценке роли истинной флотации и механического выноса в общем извлечении различных минералов, входящих в состав полиметаллической сульфидной руды на примере руды, добываемой горным предприятием Гемасса (Марокко), и в оценке воздействия выноса на качество конечного концентрата. В качестве коллекторов использованы амилловый ксантогенат калия (АКК) и натриевый диизобутиловый дитиофосфинат (Аэрофин 3418А), а также проанализировано их влияние на извлечение и селективность обоих процессов.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Флотационные тесты проводили на образце полиметаллической сульфидной руды, предоставленной горным предприятием Гемасса, расположенным в 30 км к юго-западу от г. Марракеш (Марокко). Образец состоял из ценных минералов в виде сфалерита (Sp), галенита (Gl) и

халькопирита (Ср), а также сопутствующих малоценных минералов в виде пирротина (Ро), кремния, карбонатов и хлоридов. Исследуемый образец извлечен из месторождения осадочного вулканического типа. Приблизительный минералогический состав образца включает, %: Sp 6.43, Gl 2.22, Ср 0.95, Ро 41.57 и Gg 48.82.

Размер сита по галениту составляет 160 мкм, по сфалериту и халькопириту — около 63 мкм. Следует обратить внимание, что руды сложного минералогического состава проходят сквозь ячейку мельче 10 мкм. Плотность руды 3.4 г/см³.

Сначала руду дробят до размера менее 2 мм, а затем делят на пробы массой около 500 г. Образцы хранят без упаковки, так как упаковка может в той или иной степени вызвать окисление минеральной поверхности. Мокрое измельчение в стальной шаровой дробилке проводили в питьевой воде г. Марракеш с коэффициентом разбавления 0.5. Для получения $d_{80} = 63$ мкм выполняли тесты продолжительностью 12 мин. Флотационные тесты осуществляли в однокамерной флотационной машине с рабочим объемом 1.5 л. Исходная концентрация твердого (по массе) составляла 27 %. Естественный показатель рН без добавления регулятора равен приблизительно 7. Скорость вращения 700 об/мин.

Ниже приведена классификация руды по размерам перед проведением флотационных тестов:

Размер, мкм	Мас. %
+ 80	11.1
– 80, + 75	4.3
– 75, + 63	2.7
– 63, + 40	13.8
< 40	68.1
	100

Во время выполнения флотационных тестов постоянный уровень пульпы поддерживали за счет компенсации объема воды при пенообразовании. В качестве пенообразователя во всех тестах использовали метилизобутилкарбинол (МИБК) с удельным расходом 40 г/т, а в качестве коллекторов — АКК с удельным расходом 74 г/т и Аэрофин 3418А с удельным расходом 90 г/т. Концентраты были извлечены на 1, 2, 3, 6, 10 и 15-й минутах флотации.

Все концентраты и остатки взвешивали до сушки и после нее. Затем в лаборатории Центра Реминекс (Reminex Center) путем атомной адсорбционной спектроскопии провели химический анализ концентратов с целью выявления содержания Cu, Pb, Zn и Fe. Для приближенного вычисления минералогического состава различных продуктов флотационных тестов (Ср — CuFeS₂, Gl — PbS, Sp — ZnS, Ро — Fe₉S₁₀ и Gg — пустая порода) использовали программное обеспечение “Минералия” (“Mineralia”), разработанное Каспео (Caspeo). Количество пустой породы рассчитывали следующим образом:

$$Gg = 100 - Cp - Gl - Sp - Po.$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Извлечение различных минералов (халькопирит — Ср, галенит — Gl, сфалерит — Sp, пирротин — Ро и пустая порода — Gg) в зависимости от выноса водой, полученное на основе результатов опыта, проведенного без коллектора (бесколлекторная флотация), можно аппроксимировать линейной моделью (рис. 1 и табл. 1):

$$R(t) = \beta W(t).$$

Значения β , приводимые разными авторами, зависят от выноса водой и наличия твердых частиц. Этим же определяется и название — степень выноса или коэффициент выноса. Вторым вариантом встречается чаще. Значения β для пустой породы в табл. 1 немного ниже тех, которые приводятся другими авторами [14]. Это может быть связано со слабой аэрацией рабочей среды в камере (700 об/мин) и с крупностью частиц. Низкий показатель пирротина, вероятно, связан с его высокой плотностью. Для других минералов показатели β зависят, как нам кажется, от соотношения молекул, богатых гидрофобной элементной серой, полисульфидов и гидрофильных молекул, оксидов и гидроксидов, а также сульфоксидных молекул, покрывающих поверхность твердой частицы. Они в значительной мере связаны со способностью халькопирита и галенита к флотации даже при отсутствии коллектора, особенно при пониженном уровне pH (в нашем случае pH = 7).

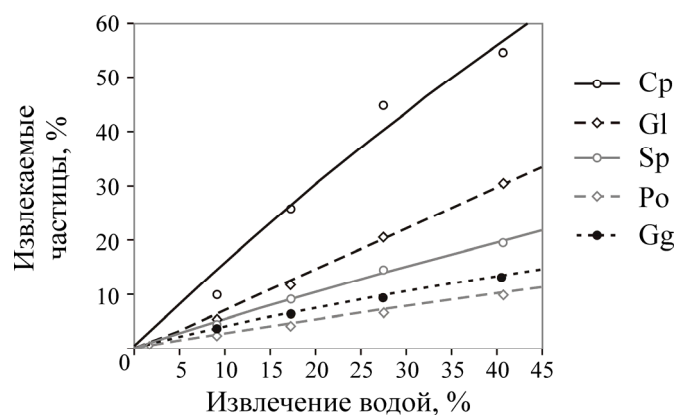


Рис. 1. Извлечение Ср, Gl, Sp, Po и Gg при бесколлекторной флотации

ТАБЛИЦА 1. Коэффициенты выноса и корреляционные коэффициенты, полученные при помощи линейной модели с использованием MATLAB

Коэффициент	Ср	Gl	Sp	Po	Gg
β	1.44	0.74	0.50	0.26	0.35
R^2	0.9788	0.9948	0.9969	0.9981	0.9932

Показатели извлечения, зафиксированные во время этого теста, нельзя полностью считать результатом механического выноса, как это принято в методах Росса [6] и Траара [7]. Действительно, метод Траара основан на сравнении показателей извлечения различных минералов, зависящих от выноса водой в двух флотационных тестах, проведенных в равных условиях: один с коллектором, другой без него. Показатели извлечения, полученные в первом тесте, связывают с механическим выносом, а разницу извлечений в первом и втором тестах — с истинной флотацией. Применение этого метода предполагает, что результат механического выноса одинаков для обоих тестов, и никакие минералы не могут присоединиться к пузырькам при отсутствии коллектора. Это не соответствует действительности для некоторых сульфидных минералов или жильных минералов, обладающих естественной гидрофобностью. Кроме того, сложно поддерживать одинаковые условия в обоих опытах; так, устойчивость пенной фазы необязательно будет одинаковой при наличии и при отсутствии коллектора. Очевидно, что дифференциальная классификация твердых частиц и воды, извлекаемых при механическом выносе, зависит от характеристик пенной фазы. Соотношение совокупного извлечения твердых частиц и времени флотации может быть использовано в качестве индикатора характеристик пенной фазы [12].

На рис. 2 показано, что уровень извлечения твердых частиц при флотации без коллектора или с коллектором Аэрофин 3418А выше, чем в случае использования АКК. Этот эффект сопровождается увеличением общего выноса всех минералов (табл. 2). Можно предположить, что пенная фаза более устойчива при отсутствии коллектора. Уменьшение стабильности при наличии коллектора менее четко выражено в случае использования Аэрофина 3418А и довольно значительно проявляется при использовании АКК. Природа коллектора и, вероятно, его концентрация оказывают влияние на стабильность пенной фазы.

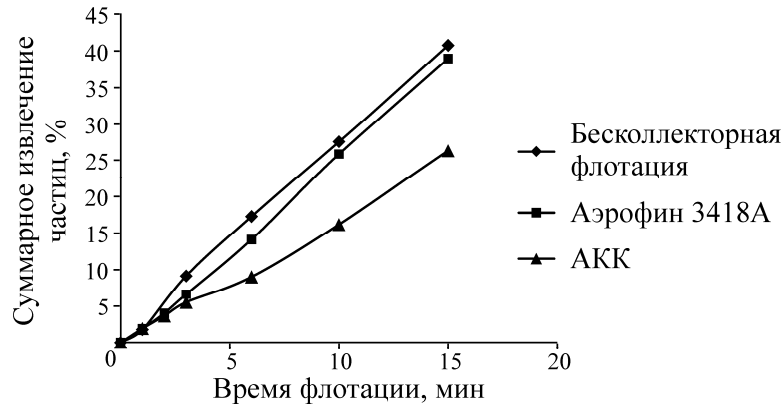


Рис. 2. Зависимость суммарного извлечения частиц от времени флотации при бесколлекторной флотации и при наличии коллекторов Аэрофин 3418А и АКК

ТАБЛИЦА 2. Суммарное извлечение после 15 мин флотации

Извлечение	Ср	Gl	Sp	Po	Gg
Без коллектора	54.66	30.48	19.60	10.14	13.39
Аэрофин 3418А	48.55	35.32	37.73	22.31	14.16
АКК	40.99	26.11	24.43	16.82	11.17

Для того чтобы должным образом оценить роль механического выноса и истинной флотации для различных минералов в руде, будем использовать метод Росса [6]. Данный метод основан на предположении, что концентрация минеральных частиц, извлеченных механическим выносом, в пенной фазе, а затем и в концентрате идентична концентрации тех же самых минеральных частиц в сырье [16]:

$$m_E(t) = m_w(t)C(t),$$

где $m_E(t)$ — масса частиц минерала i (г), извлеченных механическим выносом за время t ; $m_w(t)$ — масса воды (г), извлеченной в концентрат за время t ; $C(t)$ — концентрация частиц минерала i на 1 г воды в суспензии за время t .

Метод Росса определяет долю как механического выноса, так и истинной флотации за один флотационный тест. Материальный баланс

$$R_i(t) = F_i(t) + E_i(t),$$

где $R_i(t)$ — общее извлечение минерала i за время t ; $F_i(t)$ — извлечение минерала i истинной флотацией за время t ; $E_i(t)$ — извлечение минерала i механическим выносом за время t .

Этот метод, использованный при проведении двух тестов в присутствии соответствующих коллекторов Аэрофин 3418А и АКК, позволил оценить процентное соотношение механического выноса и истинной флотации в общем извлечении (табл. 3).

ТАБЛИЦА 3. Соотношение истинной флотации и механического выноса в общем извлечении, %

Показатель	Cp	Gl	Sp	Po	Gg
Истинная флотация:					
Аэрофин 3418А	99.83	99.09	95.73	79.21	45.03
АКК	99.72	99.49	93.14	77.80	51.79
Механический вынос:					
Аэрофин 3418А	0.17	0.91	4.27	20.79	54.97
АКК	0.28	0.51	6.86	22.20	48.21

Для моделирования процесса общего извлечения и извлечения путем истинной флотации минеральных частиц I каждого компонента (Cp, Gl, Sp, Po, Gg) можно использовать кинетическое уравнение первого порядка

$$R_i(t) = R_{\infty}(1 - e^{-k_i t}),$$

где $R_i(t)$ — извлечение минерала i (%), за время t , мин; R_{∞} — максимальное извлечение минерала i (%); k_i — константа скорости, мин⁻¹.

Параметры R_{∞} и k_i получены из модели, соответствующей кривой экспериментальной временной зависимости извлечения минералов при флотации. Для преодоления трудности сравнения значений k_i и R_{∞} , необходимых для определения переменных, влияющих на процесс флотации, мы ввели модифицированную константу скорости $K \text{ mod}$, которая учитывает и максимальное извлечение и константу скорости. Используя эту константу, можно вычислить показатель селективности флотации SI для двух различных минералов i и j [12, 17]:

$$K \text{ mod}_i = k_i R_{i\infty},$$

и

$$SI_{i/j} = \frac{K \text{ mod}_i}{K \text{ mod}_j}.$$

Результаты моделирования с помощью программного обеспечения MATLAB и полученные параметры представлены в табл. 4.

ТАБЛИЦА 4. Результаты моделирования с помощью программы MATLAB

Параметры	Общая флотация					Истинная флотация				
	Cp	Gl	Sp	Po	Gg	Cp	Gl	Sp	Po	Gg
Флотация с коллектором Аэрофин 3418А										
R_{∞}	46.85	35.10	38.13	22.61	17.62	46.77	34.79	36.50	17.19	7.93
k_i	0.4853	0.2949	0.2658	0.2383	0.1041	0.4868	0.2983	0.2842	0.324	0.2112
R^2	0.9926	0.9983	0.9959	0.9981	0.9929	0.9928	0.9985	0.9955	0.9969	0.986
$K \text{ mod}_i$	22.7363	10.3510	10.1350	5.3880	1.8342	22.7676	10.3779	10.3733	5.5696	1.6757
$SI(i/Gg)$	12.40	5.64	5.53	2.94	1.00	13.59	6.19	6.19	3.32	1.00
$SI(i/Po)$	4.22	1.92	1.88	1.00		4.09	1.86	1.86	1.00	
Флотация с коллектором АКК										
R_{∞}	39.30	25.63	25.50	17.03	13.85	39.19	25.37	23.75	13.25	7.17
k_i	0.4228	0.2863	0.1905	0.2312	0.1016	0.4251	0.2901	0.2113	0.299	0.1736
R^2	0.9894	0.9938	0.9967	0.9967	0.9878	0.9899	0.9943	0.9979	0.9972	0.9902
$K \text{ mod}_i$	16.6160	7.3379	4.8578	3.9373	1.4072	16.6597	7.3598	5.0184	3.9618	1.2452
$SI(i/Gg)$	11.81	5.21	3.45	2.80	1.00	13.38	5.91	4.03	3.18	1.00
$SI(i/Po)$	4.22	1.86	1.23	1.00		4.21	1.86	1.27	1.00	

Следует обратить внимание на то, что механический вынос $E(t)$ нельзя моделировать при помощи того же уравнения, что для $R(t)$ и $F(t)$, с допустимой степенью корреляции. В нашем случае использовалась линейная модель для пустой породы (Gg) и пирротина (Po) и экспоненциальная модель для халькопирита (Cp), галенита (Gl) и сфалерита (Sp) (рис. 3).

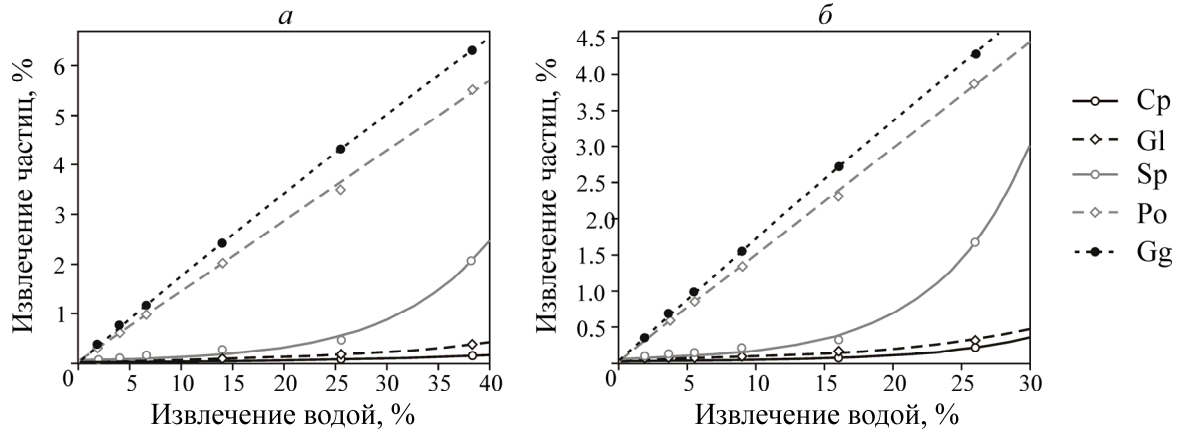


Рис. 3. Извлечение Gg, Po, Sp, Gl и Cp при флотации с коллектором Аэрофин 3418А (а) и с коллектором АКК (б)

Доля механического выноса в общем извлечении не одинакова для всех минералов (см. табл. 3). Фактически на его долю приходится крайне малый объем извлечения ценных минералов: менее 1 % в общем извлечении для халькопирита и галенита и от 4 до 7 % для сфалерита. При этом путем механического выноса извлекается 21 – 22 % пирротина.

Доля механического выноса пустой породы составляет около 55 % при использовании Аэрофина 3418А и 48 % при АКК. В целом извлечение механическим выносом зависит от размера, плотности и формы твердых частиц, конструктивных параметров флотационной камеры, технологических условий флотации и характеристик пены [13]. Более низкие показатели (14–27 %), обусловленные высотой пены, получены в [16]. Разница вызвана различием рабочих условий. В [16] проводили тесты в лабораторной флотационной колонне при постоянной скорости потока, в присутствии кремния и тонкоизмельченного оксида алюминия (40–160 нм). Наши показатели имеют тот же порядок значений, что и результаты, полученные при тестировании природной руды, состоящей из халькопирита, пирита и кремния [18].

Объем извлечения пустой породы истинной флотацией тоже велик. По-видимому, причиной является присутствие некоторых естественно гидрофобных жильных минералов (например, талька) или тех, что благоприятны для адсорбции коллекторов.

Тем не менее следует обратить внимание на то, что в случае с пустой породой наибольшее влияние на показатели процессов механического выноса и истинной флотации оказывает природа коллектора и, возможно, его концентрация. Эта разница может быть связана, по крайней мере частично, с устойчивостью пены (см. рис. 2).

В результате механического выноса можно наблюдать понижение показателя селективности общего извлечения $R(t)$ для обоих коллекторов, для всех минералов (Cp, Gl, Sp, Po) и пустой породы (рис. 4). Понижение показателя вполне естественно, так как механический вынос является процессом неселективным. При этом незначительное понижение может также объясняться слабой аэрированностью среды (700 об/мин).

Селективность по отношению к Cp, Gl, Sp, Po (рис. 5) ниже, чем к Gg; Po также является сульфидом, но характеризуется более медленной флотуемостью, чем три других минерала

(Cp, Gl, и Sp). Влияние механического выноса на общую селективность относительно Po практически несущественно из-за слабого перемешивания среды и плотности Po по сравнению с тремя другими минералами.

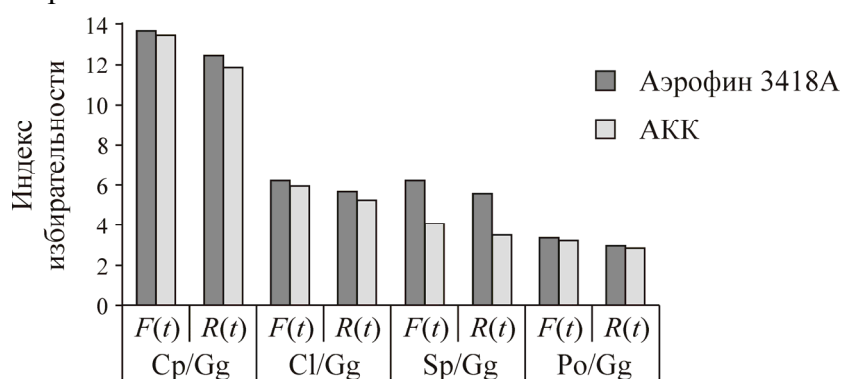


Рис. 4. Индексы избирательности Cp/Gg, Gl/Gg, Sp/Gg и Po/Gg для коллекторов АКК и Аэрофин 3418А при истинной флотации $F(t)$ и общей флотации $R(t)$

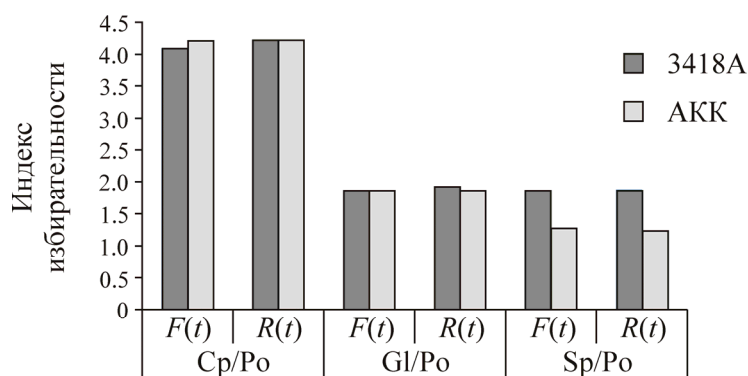


Рис. 5. Индексы избирательности Cp/Po, Gl/Po, Sp/Po для коллекторов АКК и Аэрофин 3418А при истинной флотации $F(t)$ и общей флотации $R(t)$

Поведение сфалерита по отношению к пустой породе и пирротину значительно различается в присутствии двух разных коллекторов. Селективность флотации значительно выше при Аэрофине 3418А, когда сфалерит ведет себя практически как галенит. В случае с АКК наблюдается низкая флотационная способность деактивированного сфалерита с ксантогенатами. Аэрофин 3418А также способствует лучшему извлечению минералов, чем АКК. Он может быть альтернативой АКК, применяемого в настоящее время на цинковой обогатительной фабрике Гемасса.

ВЫВОДЫ

Исследован вклад процессов механического выноса и истинной флотации в общий флотационный выход полиметаллических сульфидных руд. Установлено, что метод Траара для оценки соотношения двух процессов неприемлем, потому что завышает долю механического выноса. Для выявления доли каждого из двух процессов выбран метод Росса. Общее извлечение и извлечение истинной флотацией можно смоделировать при помощи кинетического уравнения первого порядка, чего нельзя сделать при извлечении механическим выносом. Определены флотационные параметры и вычислены индексы избирательности. Аэрофин 3418А продуцирует более устойчивую пену, чем АКК, и способствует лучшему извлечению всех минералов, включая пустую породу.

Доля механического выноса в извлечении ценных минералов очень мала (менее 1 %). Извлечение пустой породы при использовании Аэрофина 3418А больше, чем при использовании АКК. Однако это не влияет на показатель селективности. Аэрофин 3418А обеспечивает более качественное извлечение сфалерита с высокой селективностью по отношению к пустой породе и пирротину.

Авторы выражают благодарность менеджерам, техническим специалистам и агентам горного предприятия Гемасса (CMG) и исследовательскому центру Reminex за помощь и поддержку в проведении экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Savassi O. N., Alexander D. J., Franzidis J. P., and Manlapig E. V.** An empirical model for entrainment in industrial flotation plants, *Minerals Engineering*, 1998, No. 11(3).
2. **Seaman D. R., Manlapig E. V., and Franzidis J. P.** Selective transport of attached particles across the pulp-froth interface, *Minerals Engineering*, 2006, No. 19.
3. **Qi Min, Yuan-Yuan Duan, Xiao-Feng Peng, Arun S. Mujumdar, Chien Hsu, and Duu-Jong Lee.** Froth flotation of mineral particles: mechanism, *Drying Technology*, 2008, No. 26.
4. **Klassen V. and Mokrousov V.** An introduction to the theory of flotation, Butterworths, London, 1963.
5. **Schulze H.** Physico-chemical elementary processes in flotation, Elsevier, Amsterdam, 1984. In D. R. Seaman, E. V. Manlapig and J. P. Franzidis, Selective transport of attached particles across the pulp-froth interface, *Minerals Engineering*, 2006, No. 19.
6. **Ross V. E.** Flotation and entrainment of particles during batch flotation tests, *Mineral Engineering*, 1990, Vol. 3, No. 3/4.
7. **Trahar W. J.** A rational interpretation of the role of particle size in flotation, *Int. J. Mineral Processing*, 1981, No. 3.
8. **Warren L. J.** Ultrafine particles in flotation, In: M. H. Jones, J. T. Woodcock (Eds.), *Principles of Mineral Flotation*, Australian IMM, Melbourne, 1984.
9. **Kirjavainen V. M.** Review and analysis of factors controlling the mechanical flotation of gangue minerals, *Int. J. Mineral Processing*, 1996, No. 46(1–2).
10. **Zheng X., Johnson N. W., and Franzidis J. P.** Modelling of entrainment in industrial flotation cells: water recovery and degree of entrainment, *Minerals Engineering*, 2006, No. 19(11).
11. **Neethling S. J. and Ciliers J. J.** The entrainment factor in froth flotation: model for particle size and other operating parameter effects, *Int. J. Mineral Processing*, 2009, No. 93.
12. **Ekmekci Z., Brashaw D. J., Harris P. J., and Buswell A. M.** Interactive effects of the type of milling media and CuSO₄ addition on the flotation performance of sulphide minerals from Merensky ore Part II: froth stability, *Int. J. Mineral Processing*, 2006, No. 78.
13. **Yianatos J. and Contreras F.** Particle entrainment model for industrial flotation cells, *Powder Technology*, 2010, Vol. 197.
14. **Konopacka Z., Drzymala J.** Types of particles recovery-water recovery entrainment plots useful in flotation research, *Adsorption*, 2010, No. 16.
15. **Moys M.** Mass transport in flotation froths, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 1989, No. 5(1–4).
16. **George P., Nguyen A. V., and Jameson G. J.** Assessment of true flotation and entrainment in the flotation of submicron particles by fine bubbles, *Minerals Engineering*, 2004, No. 17.
17. **Uçurum M. and Bayat O.** Effects of operating variables on modified flotation parameters in the mineral separation, *Separation and Purification Technology*, 2007, No. 55.
18. **Emin Cafer Cilek.** The effect of hydrodynamic conditions on true flotation and entrainment in flotation of a complex sulphide ore, *Int. J. Mineral Processing*, 2009, No. 90.