

УДК 622.7

**РАЦИОНАЛЬНЫЕ СПОСОБЫ РАЗДЕЛЕНИЯ ПОЛИМИНЕРАЛЬНЫХ
МЕДНО-ЦИНКОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ КОЛЧЕДАНЫХ РУД**

В. А. Бочаров, В. А. Игнаткина, А. А. Каюмов

*Национальный исследовательский технологический университет “МИСиС”
E-mail: woda@mail.ru, Ленинский проспект, 4, 119049, г. Москва, Россия*

На моно- и полиминеральных фракциях, рудном материале и концентратах изучено влияние основных технологических факторов на разделение минералов. Установлены главные критерии, определяющие выбор способов селективного фракционного выделения минералов и их разновидностей в разных циклах технологической схемы. К основным критериям отнесены: степень активирующего влияния минералов меди на другие сульфиды; многофункциональная роль соединений железа; значения рН среды; сочетание и концентрации депрессирующих ионов модификаторов; соотношения долей композиции селективных собирателей; научные принципы построения технологических схем; основы концентрирования и выделения минералов в разных операциях процессов обогащения.

Минералы, сульфиды, разновидности, флотация, активация, депрессия, окисление, флотореагенты, фракционирование, концентрирование, гидрофобность, гидрофильность, контрастность, технология, режим, схема

Свойства многих минералов колчеданных медно-цинковых руд имеют схожие параметрические характеристики, но по ряду генетических и технологических признаков они различаются. Особую трудность для разделения представляют разновидности минералов одного и того же металла. Значительной проблемой также являются модификации одного и того же сульфида, например активированный катионами меди сфалерит, высокожелезистые разновидности сфалерита (марматит), вюрцит, клеофан и др. Различия разновидностей проявляются: в контрастных свойствах, структуре кристаллов и минералов; в наличии сросшихся поликристаллов мономинерала; неодинаковых структурах, в элементных примесях и минеральном составе сростков; в твердости; степени окисленности и способности к разрушению; в дефектности кристалла и поверхности минерала; в химической активности или устойчивости; в плотности; в широком диапазоне крупности от наноразмерных частиц до крупных агрегативных комплексов и т. д. Вследствие этого генетические модификации одних и тех же сульфидов колчеданных руд или имеют близкую флотоактивность или значительно различаются по кинетике флотации и степени флотируемости.

Основной рудный минерал пирит с высоким содержанием примесей менее флотоактивен. Корродированный пирит легко окисляется, шламуется при измельчении и активно флотируется в восстановительной среде при селекции его от других сульфидов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 214700393).

Марматит в отличие от активированного сфалерита также проявляет низкую флотоактивность; высокожелезистые разновидности минералов меди — халькопирит, борнит, теннантит — флотируются значительно хуже халькозина и ковеллина.

Правильная структура минералов, наименьшая дефектность кристаллической решетки, однородность поверхности характеризуют более высокие контрастные свойства разделяемых минералов и способствуют улучшению условий формирования степени гидрофобности флотируемых или повышению гидрофильности поверхности депрессируемых минералов.

В работах [1–5] отмечены некоторые генетические особенности разновидностей пирита, сульфидов меди, сфалерита, пирротина и их влияние на изменение контрастных и технологических свойств разделяемых минералов.

На качество флотационного разделения минералов влияют: соотношения первичных, вторичных и окисленных минералов меди; доля природоактивированного сфалерита и степень пассивации высокожелезистого марматита; контрастность свойств корродированного коллоидного и кристаллического разновидностей пирита и пирротина; повышенное содержание в рудном материале мышьяково-сурьмянистых минералов меди со сложной структурой и разным примесным составом; высокое содержание многофазного пирротина.

Отмеченные различия в технологических особенностях и генетические признаки создают значительные проблемы в выборе схем и режимов разделения минералов при флотационном обогащении колчеданных руд. Значительную проблему представляет многофункциональная роль соединений железа, участвующих в окислительно-восстановительных процессах при измельчении и флотации. Натирающееся железо, как продукт износа мелющей среды и продукт окисления железосодержащих сульфидных минералов, поставляет в пульпу разные формы: Fe^0 , Fe^{2+} , Fe^{3+} и сложные оксидные соединения. Элементарное Fe^0 и Fe^{2+} являются восстановителями, Fe^{3+} — окислителем, количественный состав и соотношения которых зависят от рН среды, степени окисления Fe^0 , количества и состава минералов пиритных медно-цинковых руд, типа применяемых флотореагентов, их концентрации, продолжительности контакта и т. д.

В [6] рассмотрены отдельные фрагменты развития окислительно-восстановительных процессов с участием соединений железа, в которых проявляется многофункциональная роль железа во влиянии на ионо-молекулярный состав пульпы и показатели разделения минералов пиритных пульп.

Цель настоящих исследований — продолжение начатого в [6] изучения влияния подавителей, активаторов, значений рН, сочетаний селективных собирателей на флотационные свойства мономинеральных фракций и смесей сульфидных минералов с последующей проверкой определяющих технологических факторов на результаты разделения минералов на пробах рудного материала колчеданных месторождений Уральского региона.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Методология исследований мономинеральных фракций, смесей рудных минералов и технология испытаний проб рудного материала изложена в работах [1, 2, 6–9].

На образцах слабоактивного сфалерита, марматита, сульфидов меди, корродированного и кристаллического образцов пирита месторождений Урала изучено влияние основных технологических факторов на активацию, флотируемость, депрессию сфалерита и пирита в присутствии сульфидных медных минералов. Флотация неактивированного сфалерита проводилась в смеси с кварцем или пиритом при содержании в ней цинка 3.5 %.

Извлечение сфалерита из кварцевой пульпы (рис. 1, кривая 1) с ростом рН от 6.0 до 10.0 снижается с 65 до 36 %. В пиритной пульпе (кривая 2) флотируемость сфалерита снижается более активно из-за повышения окисляемости пирита с выделением в жидкую фазу депресси-

рующих ионов серы в известковой среде, в которой образование гидроксидных и других пленок на поверхности минералов проходит с большей вероятностью, что затрудняет сорбцию [1, 4, 7, 10] собирателя и флотируемость минералов. При $\text{pH} > 10$ сфалерит практически не флотируется (кривая 2), в кварцевой пульпе снижение флотоактивности продолжается значительно медленнее; в кислой среде флотируемость сфалерита более высокая, чем в щелочной, но в пиритной пульпе извлечение сфалерита меньше в 2 раза. При флотации сфалерита из смеси с различными сульфидами меди извлечение его ввиду активации катионами меди значительно возрастает: при $\text{pH} 6-10$ извлечение сфалерита с борнитом составляет 8–20%; с халькопиритом — 15–30%; с халькозином — 45–65%; с ковеллином — 80–85%. Вследствие высокой степени окисляемости и растворения ковеллина и халькозина активация катионами меди более активная; извлечение сфалерита с ростом pH в щелочной области в сравнении с халькопиритом и борнитом увеличивается в разы.

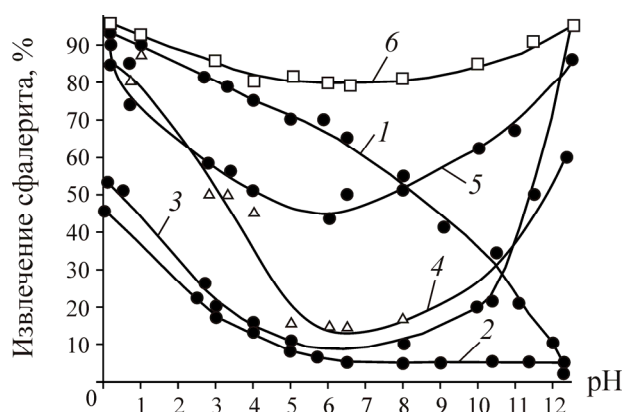


Рис. 1. Влияние pH на флотируемость сфалерита в кварцевой (1) и пиритной (2) пульпах в присутствии минералов меди: 3 — борнит; 4 — халькопирит; 5 — халькозин; 6 — ковеллин

Приведенные результаты согласуются с данными авторов [1, 7]. Активация и флотируемость сфалерита с борнитом и халькопиритом в сравнении с ковеллином и халькозином в кислой среде также значительно ниже, что объясняется меньшей их окисляемостью [1, 2, 11].

Результаты, полученные при флотации малоактивного сфалерита (рис. 1, кривая 1) в зависимости от pH среды, сопоставимы с данными работы [12]. Характерно, что сфалерит в смеси с сульфидами меди в кислых и сильнощелочных средах при $\text{pH} < 4$ и $\text{pH} > 9$ обладает наибольшей флотоактивностью, минимум флотации сфалерита наблюдается при $\text{pH} 5-8$. При активации галенита катионами меди [7, 12] в сравнении с сфалеритом флотоактивность галенита при $\text{pH} 8-9.5$ проявляется медленнее, но с ростом $\text{pH} > 10$ извлечение резко снижается до 30%, в то время как сфалерит в этих условиях активно флотируется.

Обобщая полученные результаты и данные, изложенные в [9, 12–15], видим, что наилучшее разделение сфалерита и галенита приходится на значения pH , близкие к нейтральным средам. При этом значительная разница в извлечении этих минералов возможна при минимальных концентрациях сульфида натрия.

При увеличении расхода сернистого натрия более 200 г/т практически полностью депрессируются оба минерала. Приведенные результаты исследований в сравниваемых работах близки. На практике для снижения активации и для дезактивации природоактивированных сфалерита и галенита, повышения их контрастных свойств в условиях депрессии или флотируемости, для связывания катионов тяжелых металлов в устойчивые комплексные соединения, в процессах

селективной флотации разработаны схемные решения с применением способов, изменяющих состав поверхностных соединений [6, 9, 13, 15, 16]. При этом используют сочетания сильных модификаторов — цианидов, сернистого натрия, сульфосолей (серная кислота, сульфит, тиосульфат, бисульфит натрия или аммония, цинковый и железный купорос, диоксид серы и др.), которые образуют с катионами меди и железа комплексные соединения, гидрофилизирующие поверхность сфалерита, пирита, галенита, без снижения гидрофобности поверхностей сульфидов меди, создаваемых сочетанием селективных собирателей [15]. Регулированием значений pH, применяя известь или соду, с учетом различий в степени окисления минералов можно создать благоприятные условия, при которых достигаются необходимые оптимальные концентрации депрессирующих ионов — сульфидных, сульфитных, тиосульфатных, гидросульфидных, при взаимодействии которых образуются дезактивирующие комплексные соединения, связывающие “нежелательные” для селекции катионы металлов [1, 4, 10].

Наличие в рудах и коллективных концентратах минералов меди, особенно окисленных и вторичных, усложняет проблему селективной флотации разделяемых минералов: меди, цинка, свинца и сульфидов железа.

На рис. 2–4 приведены результаты изменения контрастности и флотируемости разделяемых сульфидных минералов из смесей с классическими депрессорами, применяемыми в мировой практике обогащения подобных руд.

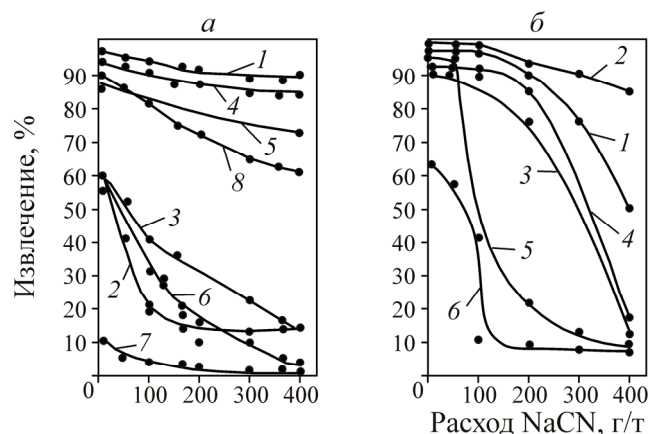


Рис. 2. Флотация из минеральной смеси: *а* — при pH 5.0–6.4: 1 — борнита; 2 — сфалерита; 3 — пирита; 4 — халькопирита; в щелочной среде (pH 12): 5 — борнита; 6 — сфалерита; 7 — пирита; 8 — халькопирита; *б* — при pH 5.0–6.4: 1 — халькозина; 2 — сфалерита; 3 — пирита; в щелочной среде (pH 12): 4 — халькозина; 5 — сфалерита; 6 — пирита

При флотации сфалерита и борнита из смеси с пиритом при минимальном расходе депрессора при pH 5.0–6.4 до 50 г/т извлечение борнита более 90 %, извлечение сфалерита значительно меньше. При увеличении расхода подавителя до 100 г/т борнит сохраняет высокую флотоактивность, сфалерит и пирит активно депрессируются (рис. 2а). С увеличением расхода при pH 5.6–6.4 извлечение борнита остается высоким. С повышением pH до 12 флотоактивность борнита снижается более значительно, а извлечение с увеличением расхода депрессора уменьшается. При pH 12 извлечение сфалерита при расходе депрессора до 100 г/т выше на 10 % в сравнении с pH 5.6–6.4, а затем с увеличением расхода до 400 г/т наступает глубокая депрессия. Пирит, начиная с расхода 50 г/т, плохо флотируется. При флотации с халькозином (рис. 2б) с расходом депрессора до 200 г/т и снижении pH до 5.0–6.4 пирит активно флотируется, а затем при расходе более 200 г/т резко депрессируется и при pH 12 флотация его прекращается; при расходе депрессора 100 г/т сфалерит сохраняет флотоактивность (85–90 %) при pH 5.0–6.4; при

этом извлечение сфалерита выше халькозина более чем на 10 %. При расходе до 200 г/т и выше с ростом pH до 12 извлечение сфалерита и пирита резко снижается. Халькозин сохраняет высокую флотоактивность при всех значениях pH среды и расходе депрессора до 300 г/т.

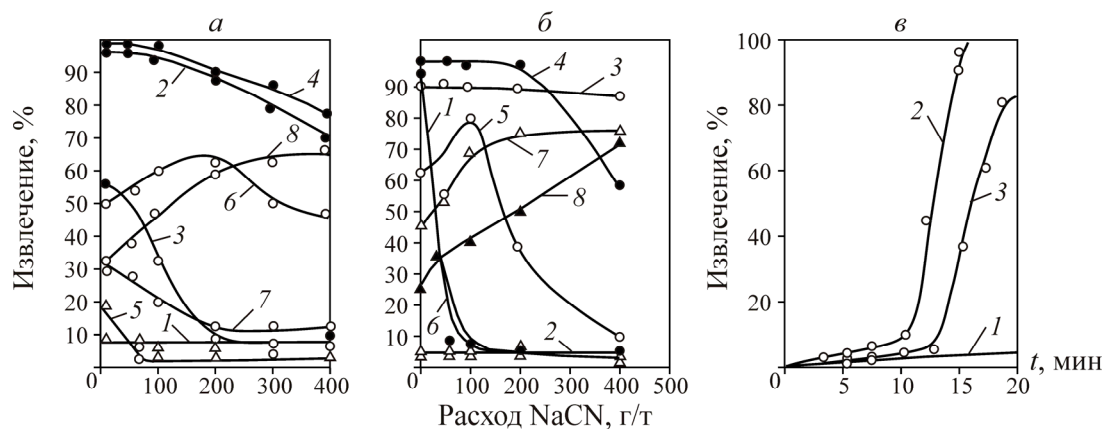


Рис. 3. Депрессия сфалерита (а), измельченного с сульфидами меди в растворе извести при pH 12: 1 — халькопирит; 2 — халькозин; 3 — борнит; 4 — ковеллин; при pH 6: 5 — халькопирит; 6 — халькозин; 7 — борнит; 8 — ковеллин. Флотируемость сульфидов меди и сфалерита (б) из смеси, измельченной в растворе извести при pH 12: 1 — халькопирит; 2 — сфалерит; 3 — ковеллин; 4 — сфалерит; при pH 6.4: 5 — халькопирит; 6 — сфалерит; 7 — ковеллин; 8 — сфалерит. Флотируемость сфалерита (в) в среде сернистого натрия при pH 9: 1 — неактивированный сфалерит (Na_2S — 500 г/т); 2 — активированный сфалерит (Na_2S — 500 г/т); 3 — активированный сфалерит (Na_2S — 500 г/т и Na_2SO_3 — 3 000 г/т)

Из рис. 2–3 следуют основные выводы:

— пирит в высокощелочной известковой среде (pH 12) активно подавляется цианидом при расходе 50 г/т; в нейтральных и слабощелочных средах он начинает депрессироваться при расходе 100 г/т и выше. Для эффективной депрессии целесообразно применять в качестве добавки к основным подавителям (извести и сернистому натрию) цианид. В зарубежной практике (страны Скандинавии, Канада, Япония и др.) цианид используют для усиления подавления флотации пирита в циклах селекции и в цинковой флотации при расходе 10–15 г/т как дополнительный депрессор;

— в присутствии монофракций медных минералов, индивидуально измельченных, но флотируемых вместе из смеси в щелочной среде сфалерит подавляется уже при малых расходах цианида 50–100 г/т. Минимум флотоактивности сфалерита заметен с халькопиритом. В нейтральной среде (слабокислой) при расходе депрессора до 200 г/т сфалерит хорошо флотируется, так же как и с халькозином, а затем с повышением расхода подавляется.

Извлечение сфалерита в присутствии ковеллина с увеличением расхода депрессора практически равно извлечению ковеллина или превышает его. На рис. 3а, б приведена флотируемость минералов меди и сфалерита, измельченных вместе. Видно, что халькопирит достаточно активно депрессируется и в щелочной, и в слабокислой (нейтральной) среде при полном подавлении флотации сфалерита. В присутствии ковеллина извлечение сфалерита составляет более 95 % при расходе депрессора в пределах 200 г/т, а затем с увеличением расхода подавителя снижается. Извлечение ковеллина при этом от расхода цианида изменяется незначительно.

Таким образом, в слабокислых, нейтральных и сильнощелочных средах флотируемость сульфидов меди из минеральных смесей при расходе цианида до 100 г/т достаточно высокая и изменяется в ряду $\text{CuFeS}_2 < \text{CuFeS}_4 < \text{Cu}_2\text{S} \leq \text{CuS}$, но при pH 12 флотоактивность минералов ме-

ди в сравнении с рН 5.0–6.4 снижается. Извлечение минералов, измельченных индивидуально или в смеси, но флотируемых вместе с сфалеритом и пиритом, неодинаково. Активация катионами меди и флотируемость сфалерита наибольшая с халькозином и ковеллином (рис. 3а).

Результаты разделения минералов измельченных смесей с халькопиритом при рН 5.0–6.4 значительно лучше, чем с ковеллином или халькозином. В известковой среде при рН 12 халькопирит достаточно легко депрессируется цианидом, но значительно меньше, чем пирит при малых расходах вместе с сфалеритом. Ковеллин и халькозин сохраняют высокую флотоактивность; при этом флотируемость сфалерита при расходе цианида до 200 г/т высокая, извлечение составляет 90 %.

В работе [17] исследована флотируемость сфалерита с использованием основного депрессора — сернистого натрия при концентрациях, применяемых в практике флотации пиритных медно-цинковых руд [1, 2, 9, 18]. Неактивированный сфалерит (рис. 3в) при расходе сернистого натрия 300 г/т практически полностью подавляется. Активированный сфалерит после кондиционирования с депрессором активно начинает флотироваться. Установленные зависимости депрессии сфалерита и пирита и флотируемости сульфидов меди от расхода подавителя и значений рН позволяют оптимизировать режим разделения минералов с использованием сочетаний модификаторов, предопределяя возможные различия в степени окисления, депрессии или активации сульфидов в операциях измельчения и стадиях селективной флотации разделяемых минералов.

Изучено влияние соединений железа на флотируемость сульфидных минералов в растворах депрессоров — сернистого натрия и сульфосоединений. Показано, что в нейтральных и кислых средах вследствие цементации катионов меди на железе и восстановления до металлической фазы концентрация меди в жидкой фазе снижается в зависимости от значений рН. Железо элементное и его окисленные соединения Fe^{2+} и Fe^{3+} активно взаимодействуют с модификаторами, образуя различные устойчивые комплексные соединения на поверхностных участках сульфидных минералов в виде гидрофильных или гидрофобных пленок [6]. Получены новые данные по флотируемости минералов меди, цинка и пирита. На рис. 4а показано, что при расходе металлического порошка железа 2–6 кг/т при рН 6.4 лучшие результаты разделения получены при концентрации сернистого натрия $5 \cdot 10^{-3}$ г-экв/л; с ростом концентрации селекция сохраняется, но извлечение меди снижается.

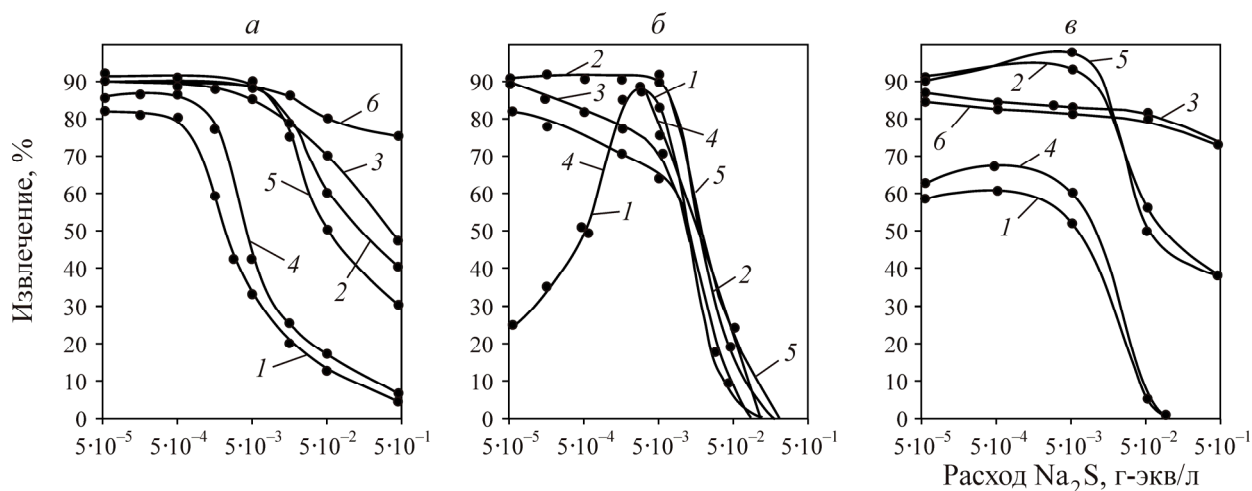


Рис. 4. Зависимость извлечения цинка (1, 4), меди (2, 5), пирита (3, 6) от концентрации Na_2S и количества железа (2 кг/т — кривые 1, 2, 3 и 6 кг/т — кривые 4, 5, 6) при рН 6.4 (а); рН 11 (б); рН 9 (в)

Из рис. 4б видно, что при рН 11 наблюдается большая депрессия сфалерита при малых концентрациях Na_2S при селективной флотации меди. Снижение извлечения серы пирита происходит при более высоких концентрациях Na_2S ; при уменьшении концентрации до 10^{-4} г-экв/л активно начинает флотироваться сфалерит, пирит депрессируется в меньшей степени. При концентрации $\text{Na}_2\text{S} > 5 \cdot 10^{-3}$ г-экв/л снижается флотоактивность минералов меди. Влияние расхода железа в пределах до 6 кг/т на снижение флотации минералов меди и цинка проявляется меньше, чем на депрессию пирита. С увеличением расхода железа флотоактивность пирита еще более снижается, особенно при рН 11.

Резюмируя результаты исследований, следует отметить, что при концентрации сернистого натрия $5 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-3}$ г-экв/л и расходе железа 2 кг/т извлечение цинка при рН 9 значительно меньше, чем при рН 11, но выше, чем при рН 6.4. С ростом концентрации сернистого натрия депрессия сфалерита усиливается при рН 11 в сравнении с рН 6–9; аналогично меняется извлечение меди в зависимости от рН и концентрации сернистого натрия. Таким образом, подавление флотации минералов меди, цинка и пирита при расходе железа 2 кг/т и концентрации сернистого натрия $5 \cdot 10^{-2} - 5 \cdot 10^{-3}$ г-экв/л уменьшается со снижением рН в щелочную область. При рН 9 извлечение пирита достаточно высокое (рис. 4в). При этом флотируемость сфалерита значительно ниже, чем при рН 11, а при концентрации сульфида натрия $5 \cdot 10^{-3}$ г-экв/л разница в извлечении меди и цинка составляет более 40 % (абс.), т. е. разделение минералов проходит достаточно активно и успешно.

Анализ полученных результатов показал, что в присутствии железа разделение минералов меди и цинка происходит лучше при концентрации сернистого натрия $5 \cdot 10^{-3} - 10^{-4}$ г-экв/л; с ростом концентрации снижается флотоактивность всех минералов; оптимальной средой при разделении минералов являются значения рН не выше 9.5. При применении цианида при расходе более 50 г/т в присутствии железа все сульфидные минералы начинают активно депрессироваться в широком диапазоне рН.

На рис. 5а, б показано влияние сульфата цинка и железа металлического на флотируемость минералов. При концентрации сульфата цинка более $1.5 \cdot 10^{-2}$ г-экв/л и расходе железа до 2 кг/т наблюдается активное подавление флотации сфалерита при сохранении высокого уровня извлечения меди и хорошей депрессии пирита при рН около 11; при рН 7–9 пирит повышает флотоактивность. При увеличении расхода цинкового купороса и железа при рН 7 флотируемость минералов снижается; с увеличением рН и расхода железа флотоактивность минералов изменяется незначительно (рис. 5б). При рН 11 на рис. 5в приведены результаты депрессии сфалерита при разных расходах железа, при которых наблюдается снижение флотоактивности минералов меди. С увеличением расхода железа при рН ≤ 9 флотоактивность пирита сохраняется. Сульфат цинка в присутствии железа наиболее активно подавляет флотацию сфалерита при рН 9–11; при этом сохраняется флотируемость медных минералов с увеличением депрессии пирита. В связи с этим применительно к практике флотации руд сульфат цинка целесообразно подавать в цикл шарового измельчения руды или доизмельчения коллективного концентрата.

В этих условиях металлическое железо натирается вследствие износа шаров и футеровки мельницы в количестве до 2 кг/т руды (данные практики) для усиления депрессии сфалерита и снижения флотоактивности пирита. В сочетании с умеренным расходом сернистого натрия флотоактивность пирита уменьшается.

На рис. 6 отражены статистические результаты разделения доизмельченного коллективного медно-цинкового концентрата в промышленных условиях в зависимости от содержания окисленных и вторичных сульфидов меди, что согласуется с данными исследований на мономинеральных фракциях. Снижение активности пирита с подачей сульфата цинка совместно с сульфидом натрия

в измельчение объясняется увеличением степени окисления в процессе раскрытия сростков пирита с другими сульфидами и окислением железа мелющей среды. При этом возможно селективное взаимодействие контактирующих микрогальванических электропар железо–пирит, разница в электродных потенциалах которых значительно возрастает в присутствии электролита раствора цинкового купороса, подаваемого в процесс для депрессии сфалерита [6, 11].

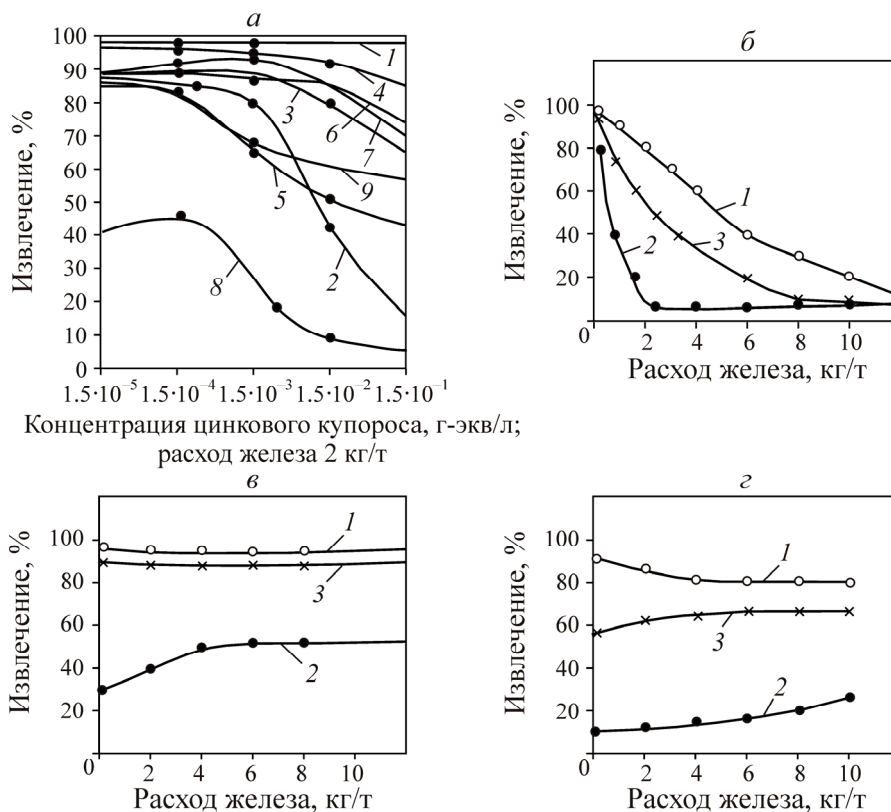


Рис. 5. Влияние расхода сульфата цинка (а) на извлечение сульфидов меди, цинка и пирита при разных значениях рН: 7 — 1, 2, 3; 9 — 4, 5, 6; 11 — 7, 8, 9 соответственно. Влияние железа на извлечение сульфидов меди (1), цинка (2) и пирита (3) при концентрации $ZnSO_4 4.5 \cdot 10^{-2}$ г-экв/л и рН среды: 7 (б), 9 (в), 11 (з)

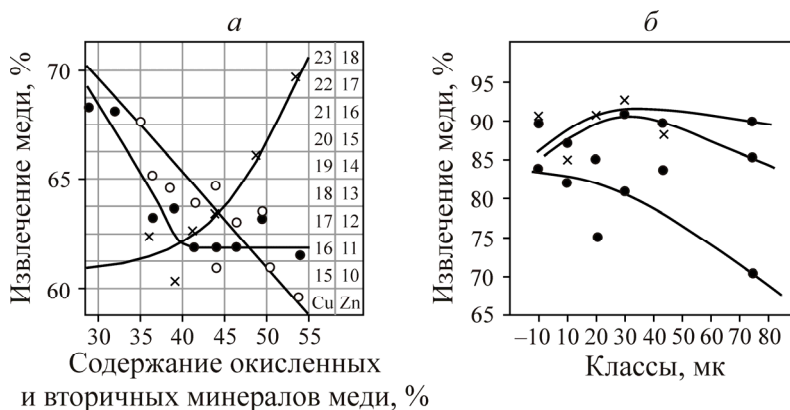


Рис. 6. Влияние окисленных и вторичных медных минералов (а) на разделение коллективного медно-цинкового концентрата: 1 — извлечение меди в Cu-концентрат; 2 — содержание меди в Cu-концентрате; 3 — содержание цинка в Cu-концентрате. Извлечение минералов меди (б) при селекции коллективного медно-цинкового концентрата: 1 — халькопирит; 2 — теннантит; 3 — вторичные минералы меди

В результате взаимодействия металлического железа образуются гидроксидные соединения железа, цинка, коллоидных осадков сернистых соединений цинка, железа, меди, налипающих на поверхность пирита, сфалерита и усиливающих гидрофильность или гидрофобность отдельных участков поверхности разделяемых минералов [5, 9]. В сочетании с разработанным режимом селективных по отношению к пириту композиций собирателей [14, 19] и выделением в межцикловых операциях высокоактивных разновидностей пирита и сульфидов цветных металлов в отдельные фракционные концентраты, продукты и отвальные хвосты улучшаются результаты разделения полиминеральных концентратов пиритных руд [9, 15, 16].

ВЫВОДЫ

На мономинеральных фракциях и пробах рудного материала изучены и выявлены основные факторы, влияющие на разделение минералов меди, цинка и пирита при флотации различных типов колчеданных медно-цинковых руд и коллективных полиминеральных концентратов: установлены критерии технологической оценки разделения сульфидных минералов; отмечено многофункциональное влияние разновидностей сульфидных медных минералов и продуктов их окисления на состав минеральной пульпы, активацию или депрессию сфалерита и пирита; определено значение окислительно-восстановительной роли различных форм железа в процессах окисления сульфидов и флотиремости минералов в сочетании с необходимыми для селективной флотации оптимальными значениями рН, концентрацией депрессирующих ионов; обозначены и реализованы структурные элементы построения обоснованных схем и режимов снижения флотоактивности, депрессии корродированных и колломорфных разновидностей пирита, модификаций сфалерита и флотации разновидностей минералов меди с выделением их в разных циклах флотации с использованием сочетаний и соотношений селективных собирателей.

Получены новые данные по влиянию модификаторов (сульфата цинка, сернистого натрия, цианида натрия и др.), применяемых в мировой практике для регулирования контрастных и флотационных свойств разделяемых минералов упорных колчеданных медно-цинковых руд, на депрессию минералов.

Определены концентрации и расходы различных подавителей-модификаторов при депрессии пирита, сфалерита; указаны условия снижения активирующего влияния минералов меди на флотоактивность сульфидов железа и сфалерита.

Установлены критические концентрации катионов тяжелых металлов и их солей, значения рН; выявлены области максимального развития процессов окисления компонентов пульпы и выделены операции (измельчения и флотации) для дозирования флотореагентов, в которых выбранные сочетания улучшают результаты разделения минералов с близкими технологическими свойствами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бочаров В. А., Игнаткина В. А. Технология обогащения полезных ископаемых. — М.: Руда и металлы, 2007. — Т. 1. — 470 с.
2. Игнаткина В. А., Бочаров В. А. Особенности флотации разновидностей сульфидов меди и сфалерита колчеданных руд // Горн. журн. — 2014. — № 12. — С. 75–79.
3. Абрамов А. А. Флотационные методы обогащения. — М.: Горная книга, 2008. — Т. IV. — 710 с.
4. Абрамов А. А. Технология переработки и обогащения руд цветных металлов. — М.: Изд. МГГУ, 2005. — Т. III, кн. 1. — 575 с., 2006. — Т. III, кн. 2. — 472 с.

5. **Кабачник М. И.** Химия фосфорорганических соединений. — М.: Наука, 2008. — Т. 50. — 459 с.
6. **Бочаров В. А., Игнаткина В. А.** О роли железа и его содержания в процессах обогащения сульфидных руд цветных и благородных металлов // Изв. вузов. Цв. металлургия. — 2007. — № 5. — С. 4–12.
7. **Митрофанов С. И.** Селективная флотация. — М.: Недра, 1967. — 583 с.
8. **Сахарова М. О.** Основные вопросы изоморфизма и генезиса блеклых руд // Геология руд. месторождений. — 1966. — № 1. — С. 23–40.
9. **Бочаров В. А., Игнаткина В. А., Хачатрян Л. С.** Проблемы разделения минеральных комплексов при переработке массивных упорных руд цветных металлов // Цв. металлы. — 2014. — № 5. — С. 16–23.
10. **Абрамов А. А.** Флотация. Сульфидные минералы: собр. соч. — М.: Горная книга, 2013. — Т. VIII. — 704 с.
11. **Чантурия В. А.** Перспективы устойчивого развития горноперерабатывающей индустрии России // Горн. журн. — 2007. — № 2. — С. 2–9.
12. **Богданов О. С., Максимов И. С., Поднек А. К. и др.** Теория и технология флотации руд. — М.: Недра, 1990. — 435 с.
13. **Игнаткина В. А., Бочаров В. А., Дьячков Ф. Г.** Повышение контрастности флотационных свойств сульфидов цветных металлов полиметаллических руд с использованием сульфгидрильных собирателей различных структур // ФТПРПИ. — 2014. — № 6. — С. 161–170.
14. **Рябой В. И.** Проблемы использования и разработки новых флотореагентов в России // Цв. металлы. — 2011. — № 3. — С. 7–14.
15. **Игнаткина В. А., Бочаров В. А., Милович Ф. О. и др.** Новые подходы к изучению механизма действия сульфгидрильных собирателей при флотации сульфидов / Сб. материалов Конгресса обогащителей стран СНГ. — М.: МИСиС, Outotec, 2015. — Т. II. — С. 475–482.
16. **Еропкин Ю. И.** Обогащение орудененных песчаников. — СПб: Наука, 1999. — 160 с.
17. **Филимонов В. И., Вершинин Е. А., Бочаров В. А.** О влиянии сульфита натрия при бесцианидной флотации сульфидных минералов в реакциях окисления // Цв. металлы. — 1968. — № 7. — С. 15–17.
18. **Вершинин Е. А., Филимонов В. И.** О совместном действии сернистого натрия и сульфита натрия при флотации халькопирита, сфалерита и пирита // Цв. металлургия. — 1968. — № 11. — С. 15–18.
19. **Himawan T. B. M. Petrus, Hirajima Petrus T.** Alternative techniques to separate tennantite from chalcopurite: single minerals and arseno copper ore flotation study, XXVI IMPC, New Deli, India, 2012. — 412 p.

Поступила в редакцию 13/IV 2016