

А.А. Николаев, Со Ту, Б.Е. Горячев

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ КИНЕТИКИ ФЛОТАЦИИ НЕАКТИВИРОВАННОГО СФАЛЕРИТА КОМПОЗИЦИЯМИ СУЛЬФИДРИЛЬНЫХ СОБИРАТЕЛЕЙ ФЛОТОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ*

Представлены результаты исследования кинетики флотации сфалерита композициями сульфидрильных собирателей в щелочных средах без его предварительной активации медным купоросом. С помощью флотометрического метода исследований проведен анализ распределения неактивированного сфалерита по фракциям флотуемости (трудно, средне и быстро флотируемые), позволивший выявить закономерности кинетики его флотации в слабо и сильно щелочных средах. Изучено влияние композиций сульфидрильных собирателей (бутилового ксантогената калия, бутилового дитиофосфата натрия и М-ТФ) при разном их отношении и отдельных собирателей на распределение неактивированного сфалерита по фракциям флотуемости и флотационное извлечение. Выявлена закономерность, заключающаяся в увеличении извлечения неактивированного сфалерита в пенный продукт с ростом доли фракций флотуемости по-разному: в слабо щелочной среде этот эффект достигался за счет увеличения доли быстро флотируемых фракций, а в сильно щелочной среде за счет увеличения доли средне флотируемых фракций. Результаты данных исследований могут способствовать прояснению влияния активации флотации сфалерита в различных циклах флотации сульфидных медно-цинковых и полиметаллических руд с использованием сульфидрильных реагентов собирателей и их композиций в щелочных средах.

Ключевые слова: флотация, сфалерит, бутиловый ксантогенат калия, бутиловый дитиофосфат натрия, композиции собирателей, кинетика флотации, фракции флотуемости.

Проблема селективной флотации сульфидных руд цветных металлов остается актуальной до настоящего времени, несмотря на развитие обогащательной отрасли. Это особенно характерно для колчеданных медно-цинковых и полиметаллических руд. Существующие реагентные режимы, реализуемые на ряде обогащательных фабрик России и СНГ, не всегда позволяют получать продукты требуемого качества по содержанию ценного компонента и примесей, что проявляется во взаимном загрязнении

моно концентратов, например медного концентрата цинком, цинкового свинцом, существует проблема присутствия пирита в них [1–4].

С одной стороны данная проблема может решаться подбором эффективных депрессоров и оптимизацией реагентных режимов коллективных и селективных циклов флотации руд. Вместе с тем, не последнюю роль в этой проблеме занимают применяемые реагенты собиратели. Одно из перспективных направлений здесь связано с поиском новых селективных реаген-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 гг.», проект RFMEF157514X0085.

тов [5] в том числе и собирателей, что не всегда экономически выгодно.

Альтернативой этому могут быть исследования собирательного действия существующих собирателей или их композиций с целью поиска эффективных решений по оптимизации реагентных режимов [6–9].

В коллективных циклах флотации медно цинковых руд, проводимых в слабо щелочных пульпах, сфалерит совместно с сульфидами меди переходит в пенный продукт. В циклах медной флотации сульфидных медно-цинковых и полиметаллических руд сфалерит, как правило, вместе с пиритом переходит в камерный продукт. Флотация при этом проводится, как в слабо щелочных пульпах, так и в сильно щелочных, с активацией сфалерита медным купоросом или без его активации [3, 10].

Механизмы активации сфалерита ионами меди и закономерности флотация активированного сфалерита изложены в [1–4, 11–14]. Вместе с тем, сфалерит может флотироваться поразному, даже без его специальной активации в ходе технологического процесса. Это накладывает определенные ограничения на технологию и качественно-количественные показатели селекции минерального сырья. Для обеспечения требуемых технологических показателей флотации важно иметь актуальную информацию о флотации не только активированного и неактивированного сфалерита, но и главного минерала колчеданных руд – пирита [1–4, 11–15].

Минеральный состав пробы сфалерита

Минерал	Массовая доля, %
Сфалерит	92,71
Галенит	6,9
Кальцит	0,39
Всего:	100

Именно поэтому настоящее исследование, направленное на изучение флотации неактивированного сфалерита композициями сульфгидрильных собирателей является актуальной задачей.

Методы исследований и материалы

Для флотации использовали сфалерит, пробу которого дробили в щековой дробилке, после чего вели сухое измельчение в шаровой фарфоровой мельнице. Измельченный продукт рассеивали на наборе сит с выделением класса $-0,074 + 0,044$ мм, который направляли на флотацию. Масса навесок сфалерита 5 г.

Подготовленную для флотации навеску минерала загружали в камеру механической флотационной машины, заливали водой заданного pH, регулируемого щелочью. После чего проводилось последовательное кондиционирование навески минерала с водой (3 мин), собирателем (5 мин) и пенообразователем (1 мин) и велась флотация. Для исследования кинетики флотации проводили порционный съем пенного продукта. Общее время флотации составляло 5 мин.

Анализ кинетики флотации проводился по данным взвешивания порций высушенного пенного продукта с использованием флотометрического анализа, который проводили с помощью программы «SPECTR», (Д.В. Шехирев, НИТУ «МИСиС»). По итогам расчетов строились гистограммы спектра флотируемости, отражающие распределение минерала по фракциям флотируемости (трудно, средне и быстро флотируемые фракции).

Минеральный состав пробы сфалерита приведен в таблице. Как следует из таблицы, проба минерала на 92,71% была представлена сфалеритом и содержала 6,9% галенита.

В качестве собирателей использовали следующие реагенты: бутило-

вый ксантогенат калия $C_4H_9O_2SSK$ (BX), бутиловый дитиофосфат натрия $(C_4H_9O)_2PSSNa$ (Af), М-ТФ (MTF). Используя вышеперечисленные реагенты, были приготовлены следующие композиции собирателей: BX–MTF, BX–Af, Af–MTF со следующим отношением компонент 3:1, 1:3 [16].

Флотацию вели в слабо щелочной ($pH = 8$) и в сильно щелочной ($pH = 12$) средах, создаваемых КОН. Расходы композиций собирателей составляли 200 и 400 г/т и постоянном расходе пенообразователя 20 г/т (Т-80).

Результаты и их обсуждение

Результаты исследований кинетики флотации мономинеральных фракций сфалерита композициями собирателей в слабо щелочной среде ($pH = 8$) показаны на рис. 1.

Анализ кинетики флотации сфалерита композицией BX–MTF (рис. 1, а) показал следующее:

В случае преобладания в композиции BX (0,75) с увеличением времени флотации извлечение сфалерита в пенный продукт возрастало до 46% (расход композиции 200 г/т). Повышение расхода в два раза привело к повышению извлечения сфалерита до 63%.

Когда в композиции собирателей преобладал MTF (0,75), то сфалерит флотировался лучше, что проявлялось в повышении извлечения до 73% (200 г/т) и 94% (400 г/т).

То есть, когда в композиции BX–MTF доля MTF была больше, то это проявлялось в лучшей флотации сфалерита (прирост извлечения составил 27–31%).

Флотация сфалерита композицией BX–Af (см. рис. 1, б) выявила следующую закономерность: если в композиции преобладал Af (0,75), то извлечение сфалерита было сопоставимо с его флотацией композицией BX–MTF (MTF 0,75) и составляло 77% и 94% при аналогичных расходах. В слу-

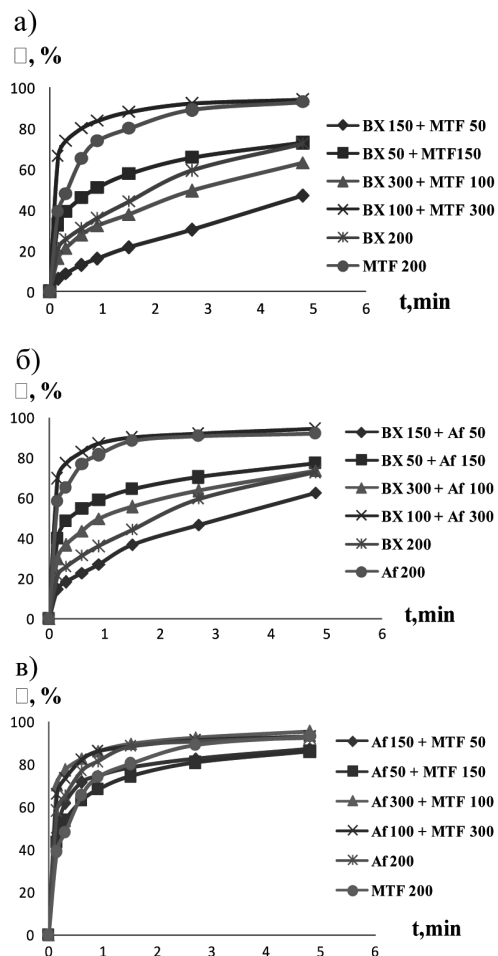


Рис. 1. Кинетика флотации мономинеральных фракций сфалерита композициями собирателей ($pH = 8$): а) BX и MTF; б) BX и Af; в) Af и MTF

чае преобладания в композиции BX (0,75), сфалерит хуже флотировался (извлечение 62% и 73%), но вместе с тем лучше, чем композицией BX–MTF при аналогичной доле BX и соответствующих расходах.

Для сравнения, при расходе собирателя 200 г/т извлечение сфалерита только BX было на уровне 72%, только MTF 93% и только Af 92%, то есть BX хуже флотировал сфалерит, по сравнению с его хорошей флотацией MTF или Af.

В целом, для композиций ВХ–МТФ и ВХ–Аф прослеживалась тенденция лучшей флотации сфалерита, когда доля ВХ была низкой (0,25).

Было отмечено, что при флотации сфалерита композицией Аф–МТФ соотношение между Аф и МТФ практически не влияло на результаты флотации (см. рис. 1, в).

Кинетика флотации сфалерита композициями сульфгидрильных собирателей проанализирована с помощью флотометрического анализа. На рис. 2 изображены гистограммы спектров флотиремости минерала композициями собирателей.

Из гистограммы спектра флотиремости следует, что сфалерит был неоднороден по флотиремости, даже несмотря на достаточно высокий расход собирателя. Об этом свидетельствует наличие фракций с разной скоростью флотации: трудно флотируемая (1), средне флотируемая (2) и быстро

флотируемая (3) с константой скорости флотации $K_1 = 0,0001-0,01 \text{ мин}^{-1}$, $K_2 = 0,01-1 \text{ мин}^{-1}$ и $K_3 = 1-100 \text{ мин}^{-1}$.

Из рис. 2 следует, что если в композиции собирателей ВХ–Аф (200 г/т) преобладал ВХ (0,75), то кинетика флотации сфалерита определялась средне флотируемыми фракциями 2 (0,57 отн. ед.) и трудно флотируемыми фракциями 1 (0,34 отн. ед.), доля быстро флотируемых фракций 3 была низкой (0,09 отн. ед.). Повышение общего расхода композиции собирателей в два раза, при сохранении того же соотношения собирателей в ней, приводило к увеличению доли быстро флотируемых фракций в три раза и одновременному снижению доли трудно флотируемых фракций в два раза.

Когда в композиции собирателей ВХ–Аф преобладал Аф, то кинетика флотации сфалерита определялась быстро флотируемыми фракциями

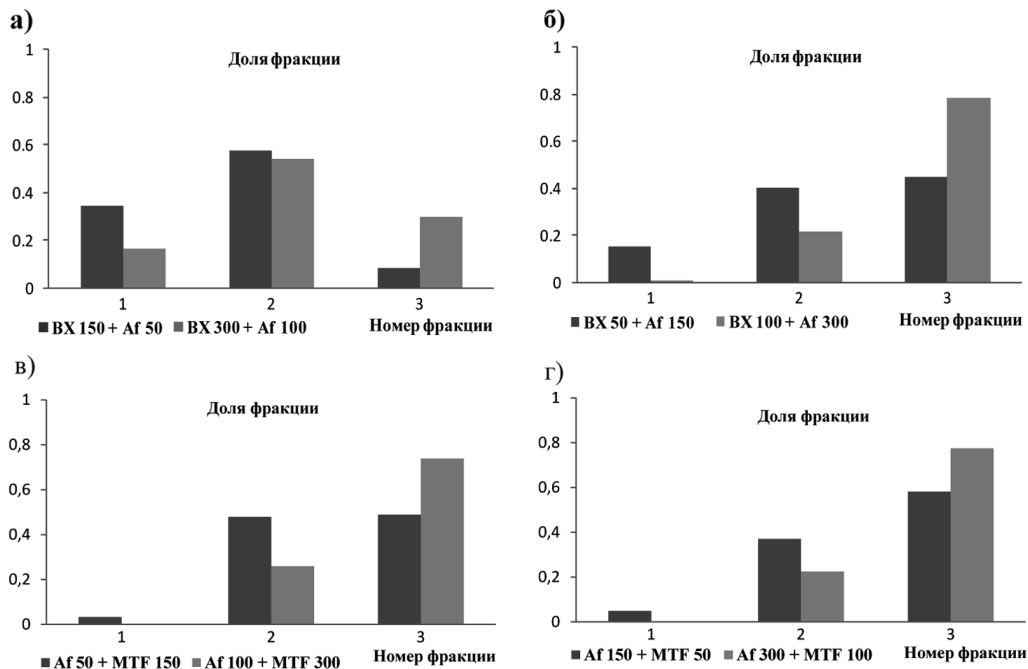


Рис. 2. Гистограмма спектра флотиремости сфалерита композициями собирателей (рН = 8): а) ВХ > Аф; б) ВХ < Аф; в) Аф < МТФ; г) Аф > МТФ

(0,45 отн. ед.) и средне флотуруемыми фракциями (0,4 отн. ед.). Увеличение расхода композиции собирателей в два раза при сохранении того же отношения собирателей в ней приводило к росту доли быстро флотуруемых фракций сфалерита (0,78 отн. ед.) и исчезновению трудно флотуруемых фракций.

Вид гистограммы спектра флотуруемости сфалерита при его флотации композицией ВХ-МТФ был по своему виду близок к гистограмме спектра флотуруемости сфалерита ВХ-Аф.

Другой характер наблюдался в случае композиции собирателей Аф-МТФ: изменение соотношения между составляющими ее собирателями не приводило к изменению спектра флотуруемости. Вид гистограммы спектра флотуруемости сфалерита и доля его быстро и средне флотуруемых фракций были сопоставимы с гистограммами композиций ВХ-МТФ и ВХ-Аф для случаев ВХ 0,25. Отличие наблюдалось в отсутствии или чрезвычайно низкой доле трудно флотуруемых фракций при флотации сфалерита композицией Аф-МТФ.

Обобщая результаты флотометрического анализа сфалерита композицией сульфгидрильных собирателей в слабо щелочной среде можно сделать следующий вывод: для композиций ВХ-МТФ и ВХ-Аф преобладание ВХ приводило к значительному снижению доли быстро флотуруемых фракций и росту доли трудно и средне флотуруемых фракций, в том числе по сравне-

нию с ВХ, Аф и МТФ; для композиции собирателей Аф-МТФ преобладание Аф или МТФ в ней не влияло на изменение распределения минерала по фракциям флотуруемости.

Принципиально иной характер зависимостей наблюдался при флотации сфалерита в сильно щелочной среде (рН = 12). Кинетика флотации сфалерита приведена на рис. 3, а гистограммы спектров флотуруемости на рис. 4. В этом случае уровень извлечения сфа-

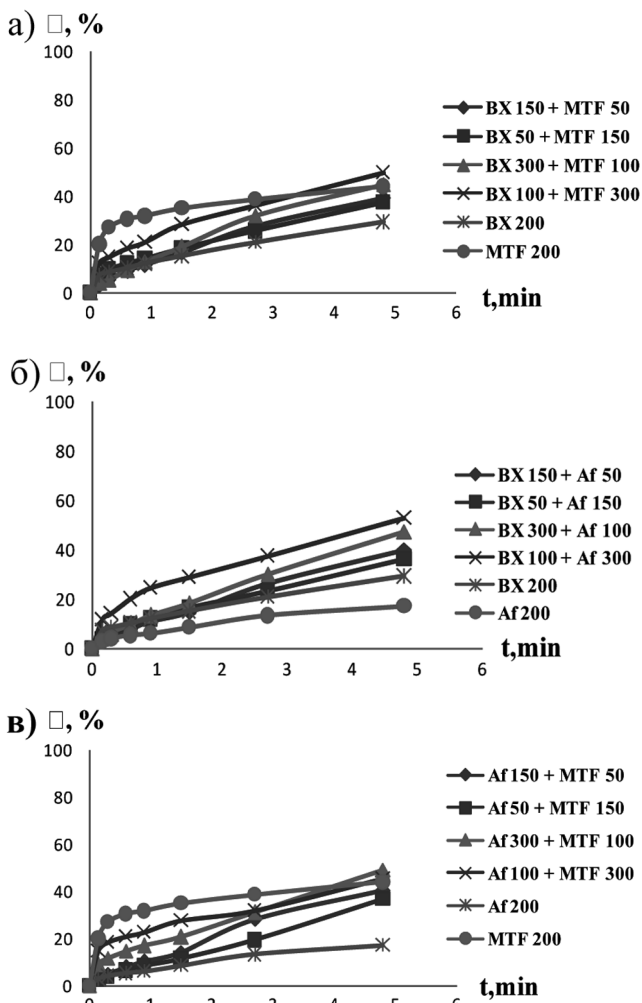


Рис. 3. Кинетика флотации мономинеральных фракций сфалерита композициями собирателей (рН = 12): а) ВХ и МТФ; б) ВХ и Аф; в) Аф и МТФ

лерита рассмотренными композициями, а также только собирателями их составляющими, не превышал 50–55%.

В сильно щелочных средах сфалерит флотировался композицией ВХ–МТФ на уровне извлечений 37–49%, причем отношение собирателей ВХ и МТФ практически не влияло на этот показатель (см. рис. 3, а).

Похожие закономерности наблюдались и для композиции Аф–МТФ: в случае преобладания в ней доли Аф извлечение сфалерита составляло 36% (200 г/т) и повышалось 52% (400 г/т); если в композиции преобладал ВХ, то извлечение сфалерита было сопоставимо с предыдущим (40% и 47% соответственно). Похожие закономерности в полной мере относятся и к флотации сфалерита композицией ВХ–Аф (см. рис. 3).

При флотации сфалерита в сильно щелочной среде его извлечение только МТФ составило 44%, а только Аф 17%,

а только КХ (200 г/т). Сравнение флотуемости минерала разными собирателями и их композициями показало, что в сильно щелочной среде сфалерит лучше флотировался только МТФ.

В сильно щелочной среде распределение сфалерита по фракциям флотуемости отличалось от его распределения по фракциям флотуемости в слабо щелочной среде. При флотации минерала композициями собирателей (рН = 12) доля трудно флотуемых фракций преобладала над средне флотуемыми, а доля быстро флотуемых фракций была незначительной либо отсутствовала. Такой вид спектра был характерен для всех рассмотренных композиций собирателей. Можно сказать, что флотация сфалерита в этих условиях практически не зависела от типа собирателя в композиции и их соотношения внутри нее.

При флотации сфалерита в сильно щелочных пульпах композицией ВХ–Аф,

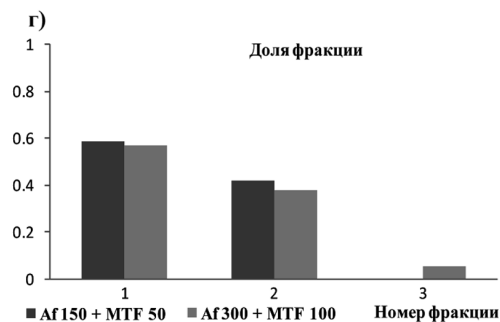
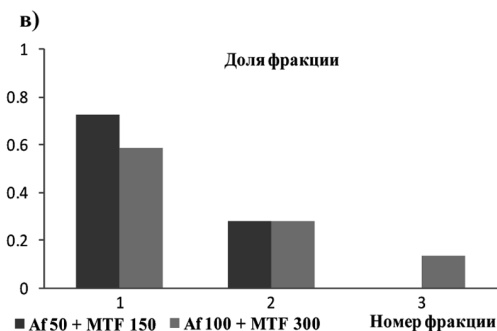
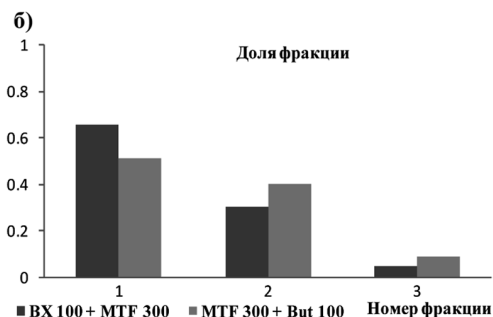
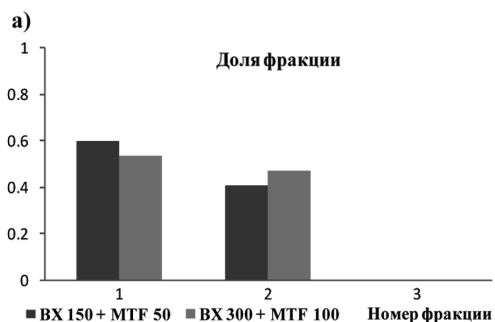


Рис. 2. Рис. 4. Гистограмма спектра флотуемости сфалерита композициями собирателей (рН = 12): а) ВХ > Аф; б) ВХ < Аф; в) Аф < МТФ; г) Аф > МТФ

когда преобладала доля ВХ в ней, доля трудно и средне флотируемых фракций составила 0,62 и 0,38 отн. ед. соответственно при расходе композиции собирателей 200 г/т. Повышение расхода композиции в два раза не приводило к существенным изменениям – происходило перераспределение между трудно (0,55 отн. ед.) и средне (0,44 отн. ед.) флотируемыми фракциями (см. рис. 4, а). Когда в композиции преобладал Аf, то появлялись быстро флотируемые фракции (0,09 отн. ед.), см. рис. 4, б.

Для остальных композиций картина гистограммы спектра флотируемости была приблизительно схожей.

Сводная информация о влиянии композиций собирателей при их расходе 200 г/т на флотационное извлечение сфалерита и фракции флотируемости в слабо и сильно щелочных средах показана на рис. 5.

Из рис. 5 следует, что при рН = 8 собирательное действие реагентов на извлечение сфалерита в пенный продукт коррелирует с быстро флотируемыми фракциями, а при рН = 12 со средне флотируемыми. Наименьшее извлечение сфалерита при рН = 8 наблюдалось при его флотации композицией ВХ–МТФ, когда в композиции преобладал ВХ (0,75). Наибольшее извлечение сфалерита при рН = 8 наблюдалось при его флотации МТФ и Аf, а при рН = 12 – МТФ.

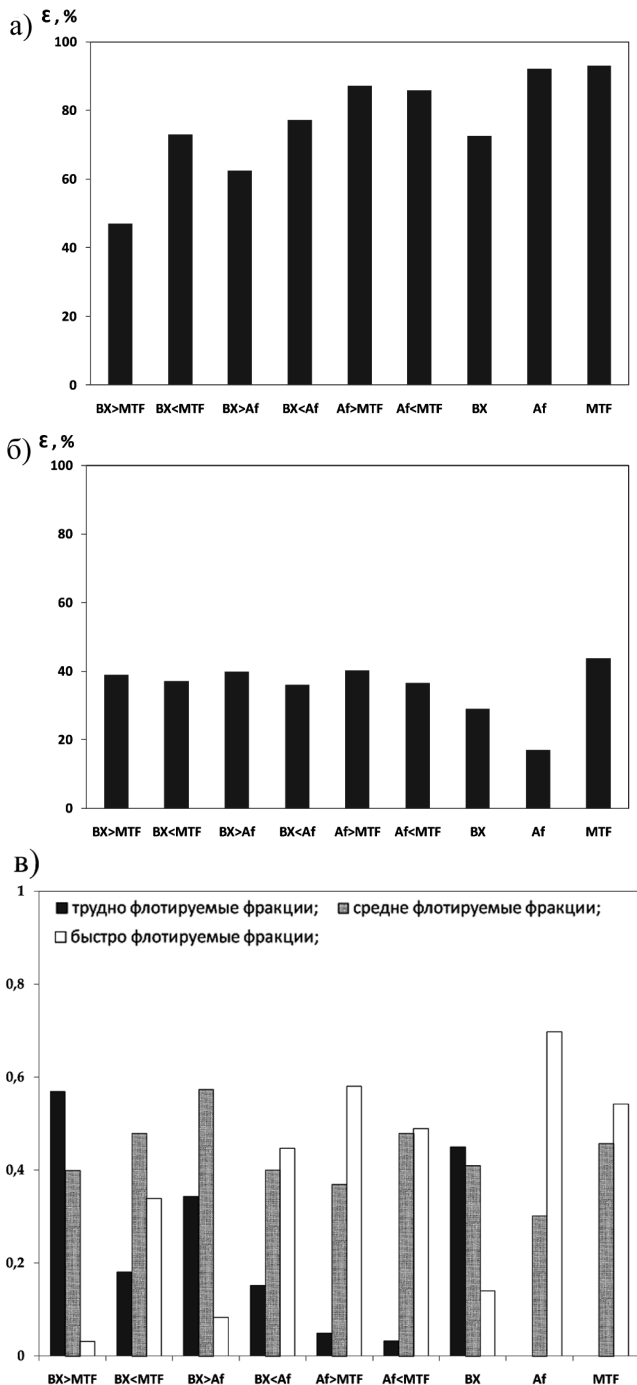


Рис. 5. Извлечение (а, б) и гистограмма спектра флотируемости (в) сфалерита при его флотации композициями сульфгидрильных собирателей (200 г/т): (а, в) – рН = 8; (б) – рН = 12

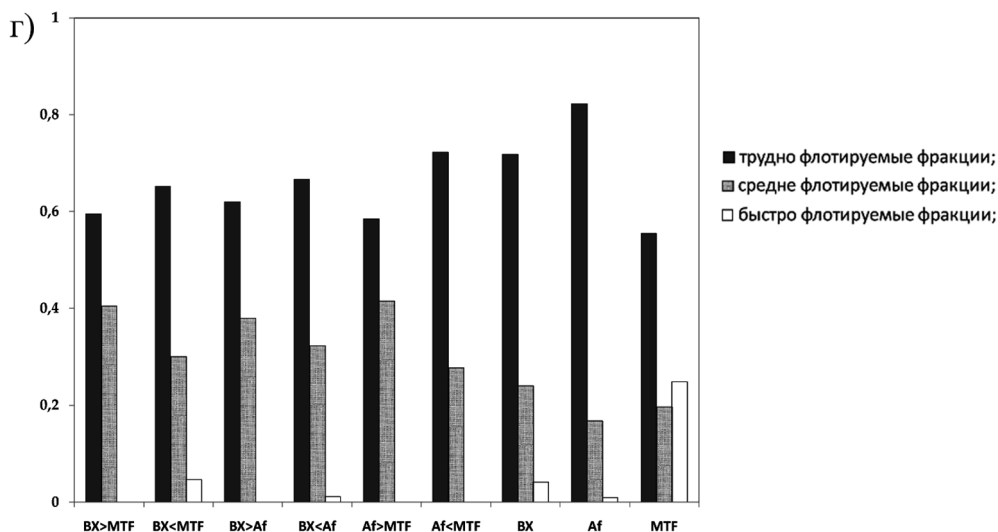


Рис. 5. Гистограмма спектра флотуемости (г) сфалерита при его флотации композициями сульфгидрильных собирателей (200 г/т), pH = 12

Выявлена закономерность, заключающаяся в увеличении извлечения неактивированного сфалерита в пенный продукт с ростом доли фракций флотуемости: в слабо щелочной среде этот эффект достигался за счет увеличения доли быстро флотируемых фракций, а в сильно щелочной среде за счет увеличения доли средне флотируемых фракций.

Результаты данных исследований могут прояснить влияние активации флотации сфалерита в различных циклах флотации медно-цинковых и полиметаллических руд используемыми реагентами собирателями.

Выводы

1. В слабощелочной среде:

- когда в композиции ВХ–МТФ доля МТФ была больше, то это проявлялось в лучшей флотации сфалерита. Наименьшее извлечение сфалерита наблюдалось для композиции ВХ–МТФ, когда в ней преобладал ВХ (0,75).

- для композиций ВХ–МТФ и ВХ–Аф выявлена тенденция лучшей флотации сфалерита, когда доля ВХ была низкой. Преобладание ВХ приводило

к значительному снижению доли быстро флотируемых фракций и росту доли трудно и средне флотируемых фракций, и как следствие снижению извлечения.

- для композиции Аф–МТФ соотношение между Аф и МТФ практически не влияло на извлечение сфалерита. Преобладание Аф или МТФ в ней не влияло на изменение распределения минерала по фракциям флотуемости.

2. В сильно щелочной среде фракции флотуемости сфалерита были связаны с трудно и средне флотируемыми фракциями, что проявилось в низком уровне извлечений минерала, значительно меньшим по сравнению с его флотацией в слабо щелочной среде.

3. Выявлена закономерность, заключающаяся в увеличении извлечения сфалерита в пенный продукт с ростом доли фракций флотуемости: в слабо щелочной среде этот эффект достигался за счет увеличения доли быстро флотируемых фракций, а в сильно щелочной среде за счет увеличения доли средне флотируемых фракций.

1. Богданов О.С., Максимов И.И., Поднек А.К. и др. Теория и технология флотации руд. – М.: Недра, 1990. – 363 с.
2. Абрамов А.А. Флотационные методы обогащения. – М.: МГТУ, 2008. – 710 с.
3. Бочаров В.А., Игнаткина В.А. Технология обогащения полезных ископаемых: в 2 т. Т. 1: Минерально-сырьевая база полезных ископаемых. Обогащение руд цветных металлов, руд и россыпей редких металлов. – М.: Руда и Металлы, 2007. – 472 с.
4. Бочаров В.А., Рыскин М.Я. Технология кондиционирования и селективной флотации руд цветных металлов. – М.: Недра, 1993. – 305 с.
5. Шубов Л.Я., Иванков С.И. Запатентованные флотационные реагенты: справочное пособие. – М.: Недра, 1992. – 362 с.
6. McFadzean B., Castelyn D.G., O'Connor C.T. The effect of mixed thiol collectors on the flotation of galena // Minerals Engineering, 2012, Vol. 36–38, p. 211–218.
7. McFadzean B., Mhlanga S.S., O'Connor C.T. The effect of thiol collector mixtures on the flotation of pyrite and galena // Minerals Engineering, 2013, Vol. 50–51, p. 121–129.
8. Ngobeni W.A., Hangone G. The effect of using sodium di-methyl-dithiocarbamate as a co-collector with xanthates in the froth flotation of pentlandite containing ore from Nkomati mine in South Africa // Minerals Engineering, 2013, Vol. 54, p. 94–99.
9. Makanza A.T., Vermaak M.K.G., Davidtz J.C. The flotation of auriferous pyrite with a mixture of collectors // International Journal of Mineral Processing, 2008, Vol. 86, p. 85–93.
10. Кисляков Л.Д., Козлов Г.В., Нагирняк Ф.И. и др. Флотация медно-цинковых и медных руд Урала. – М.: Недра, 1966. – 336 с.
11. Горячев Б.Е., Наинг Лин У, Николаев А.А., Полякова Ю.Н. Особенности влияния катионов меди, цинка и железа на флотированность пирита одного из медно-цинковых месторождений Урала // Цветные металлы. – 2015. – № 1. – С. 12–17.
12. Chandra A.P., Gerson A.R. A review of the fundamental studies of the copper activation mechanisms for selective flotation of the sulfide minerals, sphalerite and pyrite // Advances in Colloid and Interface Science, 2009, Vol. 145, p. 97–110.
13. Finkelstein N.P. The activation of sulphide minerals for flotation: a review // International Journal of Mineral Processing 1997. Vol. 52. p. 81–120.
14. Dichmann T.K., Finch J.A. The role of copper ions in sphalerite-pyrite flotation selectivity // Minerals Engineering. 2001. Vol. 4. Iss. 2. p. 217–225.
15. Горячев Б.Е., Наинг Лин У, Николаев А.А. Особенности флотации пирита одного из медно-цинковых месторождений Уральского региона бутиловым ксантогенатом калия и дитиофосфатом натрия // Цветные металлы. – 2014. – № 6. – С. 16–22.
16. Бочаров В.А., Игнаткина В.А., Хачатрян Л.С., Херсонский М.И., Бондарев А.А., Комаровский В.Л. Способ флотации колчеданных пирротино-пиритных руд цветных и благородных металлов. Патент 2499633 2013.11.27. **ПАТЕНТ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Николаев Александр Александрович – кандидат технических наук, доцент,
e-mail: nikolaevopr@misis.ru,

Со Ту – аспирант, e-mail: soethu.soethu49@gmail.com,

Горячев Борис Евгеньевич – доктор технических наук, профессор,
e-mail: beg@misis.ru,

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС».

UDC 622.765

FLOTOMETRIC ANALYSIS OF KINETIC MECHANISMS OF NON-ACTIVATED SPHALERITE FLOTATION WITH BLENDS OF SULFHYDRYL COLLECTORS

Nikolaev A.A.¹, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,
e-mail: nikolaevopr@misis.ru,

So Tu¹, Graduate Student, e-mail: soethu.soethu49@gmail.com,

Goryachev B.E.¹, Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: beg@misis.ru,

¹ National University of Science and Technology «MISIS»,
119049, Moscow, Russia.

The article presents the studies into kinetics of sphalerite flotation with blends of sulfhydryl collectors in alkaline medium without pre-activation by blue copperas. The flotometric analysis of distribution of non-activated sphalerite in fractions of floatability (difficult-, medium- and easy-to-float) reveals the kinetics of the flotation in weakly and heavily alkaline media. The influence of various blends of sulfhydryl collectors (potassium butyl xanthate, sodium butyl dithiophosphate and M-TF) as well as individual effect of the collectors on distribution of non-activated sphalerite in flotation fractions and on flotation yield is examined. It is found that non-activated sphalerite yield in froth grows with the increase in floatability fraction amount in different ways: in weakly alkaline medium, this effect is reached due to increased amount of easy-to-float fractions, whereas in heavily alkaline medium—owing to increased amount of medium-floatable fractions. The presented research findings can contribute to explaining the influence of activation of sphalerite flotation in various cycles of copper–zinc and complex ore flotation using sulfhydryl collectors and their blends in alkaline media.

Key words: flotation, sphalerite, potassium butyl xanthate, sodium butyl dithiophosphate, blend of collectors, flotation kinetics, floatability fraction.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work was carried out with financial support from the RF Ministry of Education and Science, in the framework of the Federal Target Program “Research and Development in Priority Areas of Scientific and Technical Advance in Russia in 2014–2020,” project no. RFMEF157514X0085.

REFERENCES

1. Bogdanov O.S., Maksimov I.I., Podnek A.K. *Teoriya i tekhnologiya flotatsii rud* (Theory and technology of ore flotation), Moscow, Nedra, 1990, 363 p.
2. Abramov A.A. *Flotatsionnye metody obogashcheniya* (Mineral flotation), Moscow, MGGU, 2008, 710 p.
3. Bocharov V.A., Ignatkina V.A. *Tekhnologiya obogashcheniya poleznykh iskopaemykh: v 2 t. T. 1: Mineral'no-syr'evaya baza poleznykh iskopaemykh. Obogashchenie rud tsvetnykh metallov, rud i rosspei redkikh metallov* (Mineral processing technology, vol. 1. Mineral and raw materials base. Processing of nonferrous metals, metal ores and precious metals at placers), Moscow, Ruda i metally, 2007, 472 p.
4. Bocharov V.A., Ryskin M.Ya. *Tekhnologiya konditsionirovaniya i selektivnoi flotatsii rud tsvetnykh metallov* (Conditioning and selective flotation of nonferrous metal ores), Moscow, Nedra, 1993, 305 p.
5. Shubov L.Ya., Ivankov S.I. *Zapatentovannyye flotatsionnye reagenty: spravochnoe posobie* (Patent-protected flotation agents: Reference guide), Moscow, Nedra, 1992, 362 p.
6. McFadzean B., Castelyn D.G., O'Connor C.T. The effect of mixed thiol collectors on the flotation of galena. *Minerals Engineering*, 2012, Vol. 36–38, p. 211–218.
7. McFadzean B., Mhlanga S.S., O'Connor C.T. The effect of thiol collector mixtures on the flotation of pyrite and galena. *Minerals Engineering*, 2013, Vol. 50–51, p. 121–129.
8. Ngobeni W.A., Hangone G. The effect of using sodium di-methyl-dithiocarbamate as a co-collector with xanthates in the froth flotation of pentlandite containing ore from Nkomati mine in South Africa. *Minerals Engineering*, 2013, Vol. 54, p. 94–99.
9. Makanza A.T., Vermaak M.K.G., Davidtz J.C. The flotation of auriferous pyrite with a mixture of collectors. *International Journal of Mineral Processing*, 2008, Vol. 86, p. 85–93.
10. Kislyakov L.D., Kozlov G.V., Nagirnyak F.I. *Flotatsiya medno-tsinkovykh i mednykh rud Urala* (Flotation of copper–zinc and copper ores in the Ural), Moscow, Nedra, 1966, 336 p.
11. Goryachev B.E., Naing Lin U, Nikolaev A.A., Polyakova Yu.N. *Tsvetnye metally*. 2015, no 1, pp. 12–17.
12. Chandra A.P., Gerson A.R. A review of the fundamental studies of the copper activation mechanisms for selective flotation of the sulfide minerals, sphalerite and pyrite. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2009, Vol. 145, p. 97–110.
13. Finkelstein N.P. The activation of sulphide minerals for flotation: a review. *International Journal of Mineral Processing*. 1997. Vol. 52. p. 81–120.
14. Dichmann T.K., Finch J.A. The role of copper ions in sphalerite-pyrite flotation selectivity. *Minerals Engineering*. 2001. Vol. 4. Iss. 2. p. 217–225.
15. Goryachev B.E., Naing Lin U, Nikolaev A.A. *Tsvetnye metally*. 2014, no 6, pp. 16–22.
16. Bocharov V.A., Ignatkina V.A., Khachatryan L.S., Khersonskii M.I., Bondarev A.A., Komarovskii V.L. *Patent RU 2499633*, 27.11.2013.

