

А.А. Николаев, Со Ту, Б.Е. Горячев

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФРАКЦИОННОЙ СЕЛЕКТИВНОСТИ
ПИРИТА И СФАЛЕРИТА С УЧЕТОМ КИНЕТИКИ
ИХ ФЛОТАЦИИ КОМПОЗИЦИЯМИ
СУЛЬФИДРИЛЬНЫХ СОБИРАТЕЛЕЙ***

Приведены результаты исследований кинетики флотации сульфидных минералов композициями сульфидрильных собирателей. Такое исследование выполнено для пирита и сфалерита, являющимися основными промышленными минералами при обогащении сульфидных медно-цинковых и полиметаллических руд. Предложен расчет показателя фракционной селективности минералов с учетом кинетики их флотации и распределения минералов по фракциям флотиремости. Использование предложенного расчета и методики позволило оценить показатели селективности сфалерита и пирита с учетом кинетики флотации их трудно, средне и быстро флотируемых фракций при использовании в качестве собирателей бутилового ксантогената калия, дитиофосфата натрия, М-ТФ и их композиций в щелочной среде.

Ключевые слова: флотация, кинетика флотации, бутиловый ксантогенат калия, дитиофосфат натрия, тионокарбамат, пирит, сфалерит, фракция флотиремости, селективность.

При флотации минерального сырья актуальной задачей остается не только выбор селективных собирателей и исследование влияния реагентных режимов флотации на общее извлечение ценного компонента, но также и кинетику флотации минералов. Данное обстоятельство проявляется в неодинаковых извлечениях разных минералов в пенный и камерный продукты по фронту флотации промышленных флотационных машин. Все это в полной мере относится и к обогащению сульфидных медно-цинковых руд [1–6].

Кинетика флотации сульфидных минералов в разных циклах флотации (коллективных, селективных) может быть близкой, а может и отличаться, что в итоге может сказываться на пла-

новых технологических показателях работы обогатительной фабрики.

С другой стороны, одним из основных показателей работы флотационной машины служит ее производительность, которая зависит от скорости флотации обогащаемого минерального сырья в целом и от кинетики флотации конкретного минерала в частности. Последняя, в свою очередь, тоже меняется со временем [1–3].

На кинетику извлечения минералов при флотации оказывают влияние, как физико-химические, так и гидродинамические факторы. К первой группе факторов относят такие, как тип и расход флотационных реагентов, pH и окислительно-восстановительный потенциал и ионный состав жидкой фазы пульпы [1–6]. Вторая группа, не

* 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 RFMEFI57514X0085.

менее важная, не является предметом настоящей статьи.

В коллективных циклах флотации сульфидных медно-цинковых, полиметаллических руд, проводимых с использованием сульфгидрильных собирателей, сульфиды меди и сфалерит выделяют в пенный продукт флотации. В последующих циклах медной флотации руд сфалерит, часто совместно с пиритом переводят в камерный продукт флотации. Активация сфалерита, его флотация и депрессия флотации пирита ведется в щелочной среде, причем pH меняется от слабо до сильно щелочного [1, 2, 4–5, 7].

Закономерности флотация активированного сфалерита, механизм его активации ионами меди и технологические аспекты рассмотрены в работах [1, 2, 4–5, 7–10]. Вместе с тем, известно, что как сфалерит, так и пирит могут иметь разную флотоактивность может флотироваться по-разному, что приводит к неудовлетворительному

флотационному обогащению руд. Все это существенно влияет и на конечные технологические показатели работы обогатительной фабрики.

Именно поэтому исследованию флотации пирита и сфалерита посвящено большое количество работ [7–15].

В работах [13, 14] приведены результаты исследований кинетики флотации пирита бутиловым ксантогенатом калия и дитиофосфатом натрия, рассмотрено влияние ионов тяжелых металлов на кинетику флотации узких классов крупности пирита.

В работе [15] рассмотрены некоторые результаты исследований кинетики флотации неактивированного сфалерита композициями сульфгидрильных собирателей в щелочных средах и выявлены закономерности изменения извлечения минерала в пенный продукт в зависимости от доли фракций разной флотируемости.

В настоящей статье приведены результаты исследований кинетики флотации пирита и сфалерита композициями сульфгидрильных собирателей. Изучено влияние типа собирателя и состава композиций на распределение пирита и сфалерита по фракциям флотируемости. Предложена методика по расчету показателя фракционной селективности минералов с учетом кинетики их флотации и распределения по фракциям флотируемости. Использование предложенной методики позволило рассчитать показатели селективности сфалерита и пирита по трудно, средне и быстро флотируемым фракциям и изучить селективность собирателей и их композиций на кинетику флотации.

Методы исследований и материалы

Для подготовки к флотации пробу сфалерита измельчали в шаровой керамической мельнице без добавления воды, проводили рассев на набо-

Таблица 1

Минеральный состав пробы пирита и сфалерита

Название	Массовая доля, %
Проба пирита	
Пирит	94,99
Галенит	0,29
Кварц и алюмосиликаты	3,78
Карбонаты железа, магния, природное железо	0,02
Борнит	0,14
Рутил	0,02
Другие	0,76
Итого	100
Проба сфалерита	
Сфалерит	92,71
Галенит	6,9
Кальцит	0,39
Итого	100

Таблица 2

Композиции сульфгидрильных собирателей

№ п/п	Состав композиции и доля собирателя в ней	Принятые обозначения
1	0,25 бутиловый ксантогената калия 0,75 бутиловый дитиофосфат натрия	BX < Af
2	0,75 бутиловый ксантогената калия 0,25 бутиловый дитиофосфат натрия	BX > Af
3	0,25 бутиловый ксантогената калия 0,75 М-ТФ	BX < МТФ
4	0,75 бутиловый ксантогената калия 0,25 М-ТФ	BX > МТФ
5	0,25 бутиловый дитиофосфат натрия 0,75 М-ТФ	Af < МТФ
6	0,75 бутиловый дитиофосфат натрия 0,25 М-ТФ	Af > МТФ

ре сит с выделением готового класса крупности $-0,074 + 0,044$ мм. Выделение готового класса крупности проводили на наборе сит [15]. Подготовка пирита к флотации велась по методике, изложенной в статье [13, 14], крупность пирита для флотации $-0,074 + 0,044$ мм.

Данные минерального анализа проб приведены в табл. 1.

Кинетику флотации минералов изучали в лабораторной механической флотационной машине [15]. Результаты кинетики флотации обрабатывали с использованием программы «Spectr» с построением гистограмм спектра флотируемости. [15]. Интерпретация результатов расчетов в указанной программ проводилась с использованием трех фракций флотируемости с разным диапазоном константы скорости флотации (K): трудно ($K_1 = 0,0001-0,01 \text{ мин}^{-1}$), средне ($K_2 = 0,01-1 \text{ мин}^{-1}$) и быстро ($K_3 = 1-100 \text{ мин}^{-1}$) флотируемым фракциям.

Флотацию вели в щелочной среде при $\text{pH} = 8-12$ (калия гидроксид), пенообразователь Т-80. В качестве собирателей для флотации минералов использовали композиции состоящие из сульфгидрильных собирателей: бутиловый ксантогената калия, бутиловый дитиофосфат натрия и М-ТФ, представляющий собой смесь изобутилового дитиофосфата и тионоккарбаматов [16]. Состав использованных для фло-

тации композиций собирателей показан в табл. 2.

Результаты исследований

Извлечение пирита и сфалерита в пенный продукт при их отдельной флотации композициями сульфгидрильных собирателей при постоянном расходе ($q = 100 \text{ г/т}$) в щелочной среде приведены на рис. 1.

При $\text{pH} = 8$ и расходе собирателя 100 г/т минимальное извлечение пирита в опытах ($\sim 45\%$) наблюдалось при его флотации композицией $\text{BX} < \text{MTF}$ и $\text{Af} < \text{MTF}$, а наибольшее при флотации пирита только МТФ (62%). Минимальное извлечение сфалерита ($52,2\%$) наблюдалось при его флотации $\text{BX} < \text{MTF}$, а максимальное ($89,1\%$) при флотации только Af. Для сравнения, извлечение пирита только Af составило $58,7\%$, а сфалерита только МТФ $81,5\%$.

При $\text{pH} = 10$ минимальное извлечение пирита $40,0-42,6\%$ наблюдалось для композиции BX-MTF . Наиболее высокие извлечения пирита $83,3\%$ и $80,4\%$ наблюдались при его флотации только МТФ или Af. Не намного меньшим ($71-75\%$) было извлечение пирита композицией Af-MTF или только BX.

При $\text{pH} = 10$ нижняя граница извлечения сфалерита $61,2\%$ и $63,5\%$ достигалась для композиции $\text{BX} > \text{MTF}$ и одного BX соответственно, а верхняя ($86,2\%$) наблюдалась при флотации МТФ.

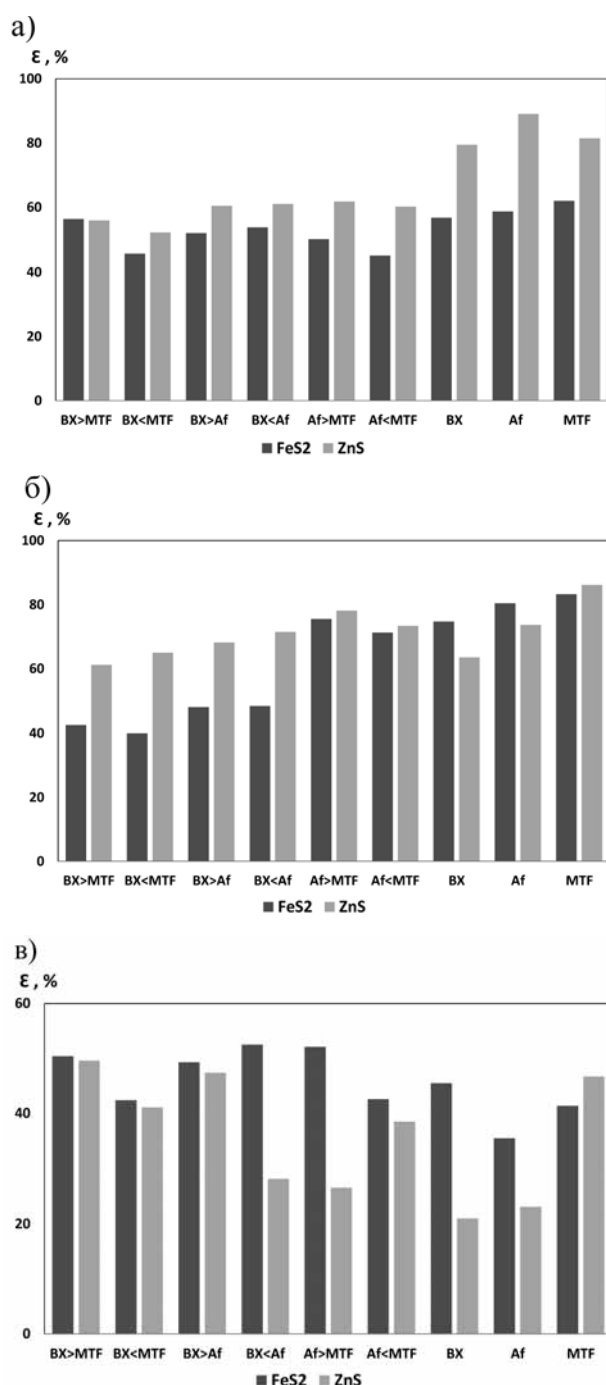


Рис. 1. Извлечение сфалерита и пирита в пенный продукт при их раздельной флотации пирита и сфалерита композициями сульфгидрильных собирателей ($q = 100$ г/т): а) $pH = 8$; б) $pH = 10$ в) $pH = 12$

Влияние композиций собирателей нашло свое отражение и на спектре флотиремости минералов. На рис. 2 изображены гistogramмы спектра флотиремости пирита.

Анализ спектров флотиремости пирита показал, что при $pH = 8$ и 12 для всех композиций и отдельных собирателей, быстро флотиремые фракции отсутствовали. При $pH = 10$ быстро флотиремые фракции пирита наблюдались при его флотации только BX, Af и MTF, доля их составила 0,1, 0,3 и 0,29 соответственно.

Принципиально иной был вид гistogramмы спектра флотиремости сфалерита, изображенный на рис. 3.

Кинетика флотации сфалерита показала, что в большинстве случаев распределение минерала было во всех фракциях флотиремости (быстро, средне и трудно флотиремых), но с разной их долей в зависимости от собирателя и pH .

Анализ спектров флотиремости рутинных кинетических опытов по флотации нескольких минералов разными собирателями при разных pH , а тем более реагентных режимах флотации, является весьма трудоемкой операцией. Поэтому актуальной задачей является расчет универсального показателя, позволяющий сравнить кинетику флотации по фракциям флотиремости. Поэтому для анализа кинетических данных нами

предложено использовать показатели селективности по фракциям флотуемости.

По аналогии с классическим показателем селективности по извлечению ценного компонента (минерала), который рассчитывается, как например может быть рассчитан, как разность между извлечениями сфалерита и пирита в пенный продукт:

$$E_{\varepsilon} = \varepsilon^{\text{ZnS}} - \varepsilon^{\text{FeS}_2}, \quad (1)$$

где ε^{ZnS} и $\varepsilon^{\text{FeS}_2}$ – извлечения сфалерита и пирита в пенный продукт, доли единицы.

Положительные значения E_{ε} ($E_{\varepsilon} > 0$) свидетельствовали о том, что извлечение сфалерита выше чем пирита, а если $E_{\varepsilon} < 0$, то извлечение пирита выше сфалерита. Случай $E_{\varepsilon} = 0$ свидетельствовал о равных извлечениях минералов.

Показатель селективности по извлечению, однако, не позволяет учесть различия в кинетике флотации минералов. Именно поэтому в работе было предложено использовать показатель фракционной селективности, рассчитанный, как разница долей фракций флотуемости между минералами, в данном случае между сфалеритом и пиритом:

$$E_T = f_T^{\text{ZnS}} - f_T^{\text{FeS}_2} \quad (2)$$

$$E_c = f_c^{\text{ZnS}} - f_c^{\text{FeS}_2} \quad (3)$$

$$E_6 = f_6^{\text{ZnS}} - f_6^{\text{FeS}_2} \quad (4)$$

где f_T^{ZnS} , f_c^{ZnS} и f_6^{ZnS} – доля фракций трудно, средне и быстро флотуемых фракций сфалерита, $f_T^{\text{FeS}_2}$, $f_c^{\text{FeS}_2}$, $f_6^{\text{FeS}_2}$ – доля трудно, средне и быстро флотуемых фракций пирита.

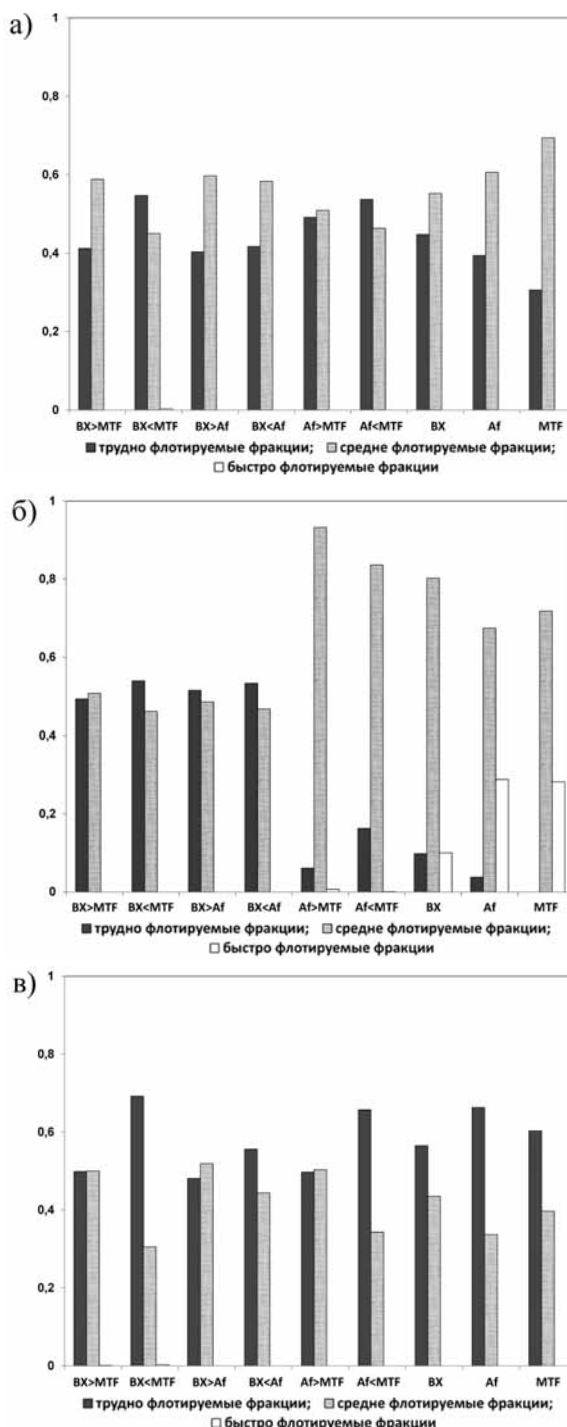


Рис. 2. Гистограмма спектра флотуемости пирита композициями сульфгидрильных собирателей $q = 100$ г/т: а) pH = 8; б) pH = 10 в) pH = 12

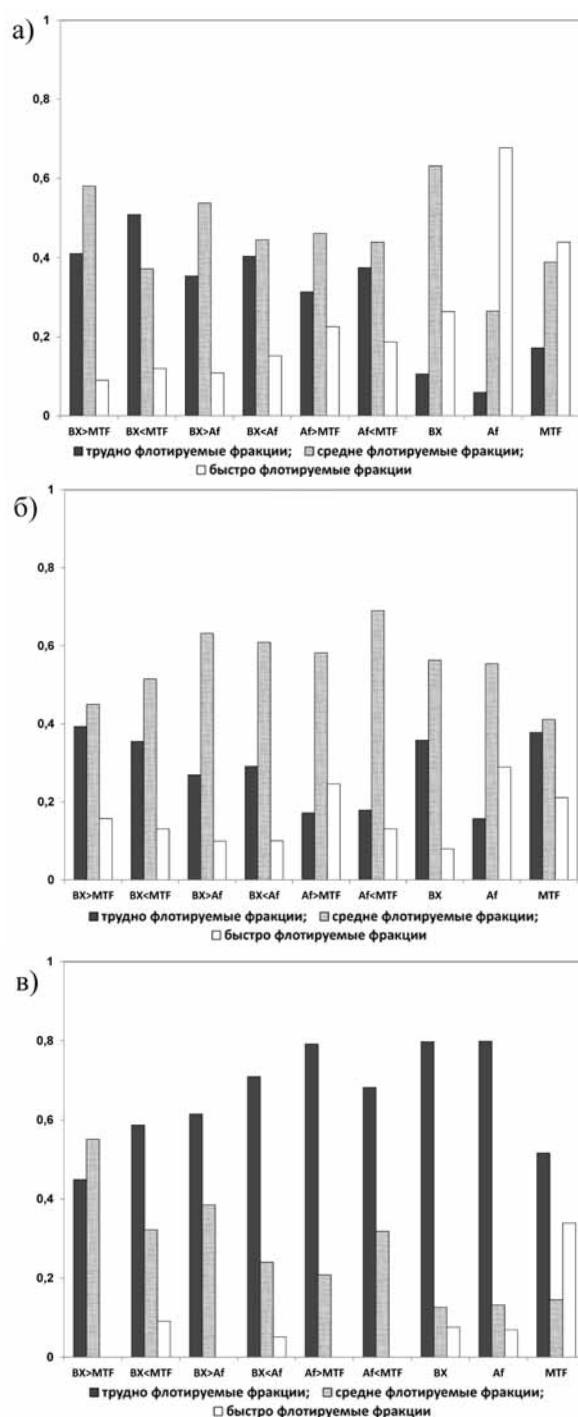


Рис. 3. Гистограмма спектра флотируемости сфалерита композициями сульфидрильных собирателей $q = 100$ г/т: а) $pH = 8$; б) $pH = 10$; в) $pH = 12$

средне и быстро флотируемых фракций пирита.

В табл. 3 приведены условия, при которых показатель фракционной селективности меньше, больше или равен нулю.

Результаты расчетов показателей фракционной селективности при флотации пирита и сфалерита композициями сульфидрильных собирателей для вышеуказанных условий флотации приведены на гистограммах, изображенных на рис. 4 и 5.

Анализ показателя селективности по извлечению E_{ε} показал, что при $pH = 10$ наибольшие значения $E_{\varepsilon} = 0,186 - 0,25$ наблюдались для композиций MTF-BX и BX-Af при расходе 100 г/т. То есть извлечение сфалерита при флотации этими композициями было выше по сравнению с пиритом.

Для композиций Af-MTF или только MTF уровень извлечения сфалерита и пирита практически не отличался, о чем свидетельствуют близкие к нулю значения $E_{\varepsilon} = 0,02$, то есть, селективность этой композиции снизилась в 10 раз по сравнению с предыдущей. Флотация минералов только Af или только BX приводила к тому, что показатель селективности становился отрицательным $E_{\varepsilon} = -0,07$ или $-0,11$, то есть извлечение пирита было выше по сравнению со сфалеритом.

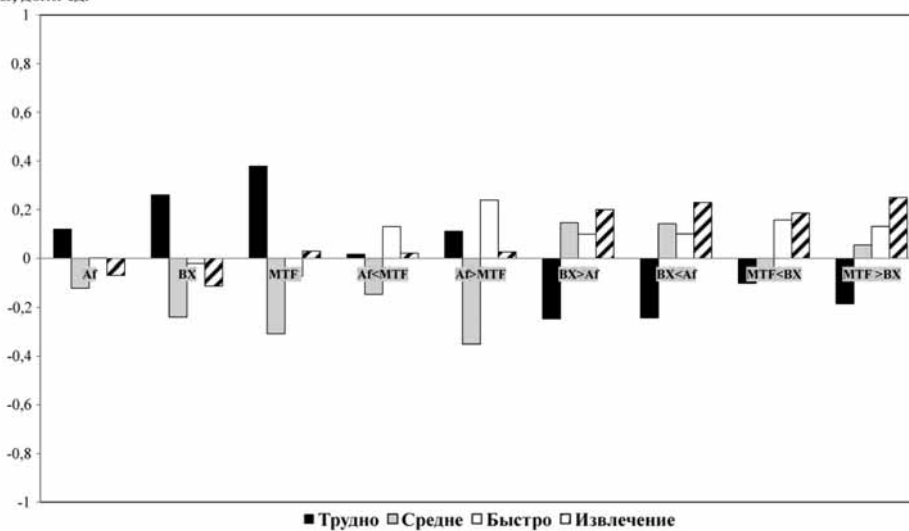
Кинетика флотации минералов зависела от значений показателя фракционной селективности. Так для

Таблица 3

Показатели фракционной селективности минералов с учетом кинетики их флотации

Трудно флотируемые фракции		Средне флотируемые фракции		Быстро флотируемые фракции	
$E_T > 0$	$f_{ZnS}^T > f_{FeS_2}^T$	$E_c > 0$	$f_{ZnS}^c > f_{FeS_2}^c$	$E_6 > 0$	$f_{ZnS}^6 > f_{FeS_2}^6$
$E_T < 0$	$f_{ZnS}^T < f_{FeS_2}^T$	$E_c < 0$	$f_{ZnS}^c < f_{FeS_2}^c$	$E_6 < 0$	$f_{ZnS}^6 < f_{FeS_2}^6$
$E_T = 0$	$f_{ZnS}^T = f_{FeS_2}^T$	$E_c = 0$	$f_{ZnS}^c = f_{FeS_2}^c$	$E_6 = 0$	$f_{ZnS}^6 = f_{FeS_2}^6$

а) Е, доли ед.



б) Е, доли ед.

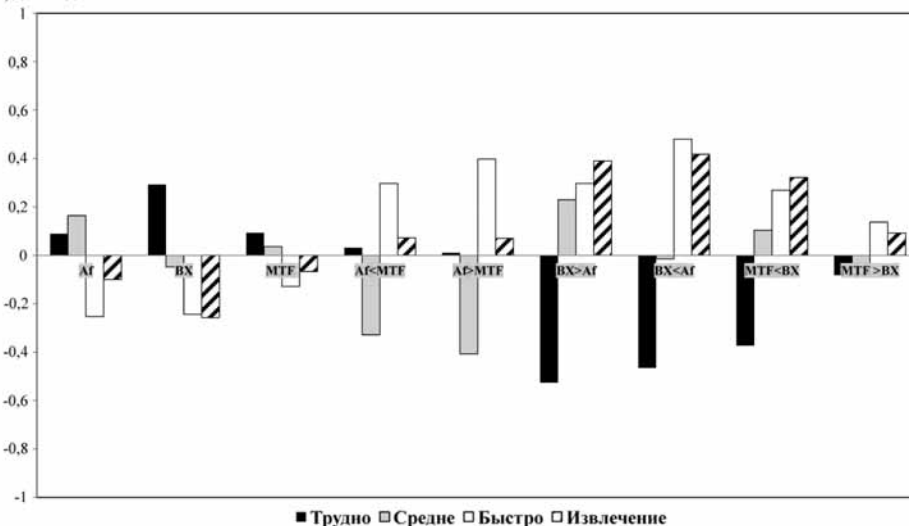


Рис. 4. Показатель селективности при флотации сфалерита и пирита композициями сульфидрильных собирателей при pH = 10 и расходах собирателей 100 г/т (а) и 200 г/т (б)

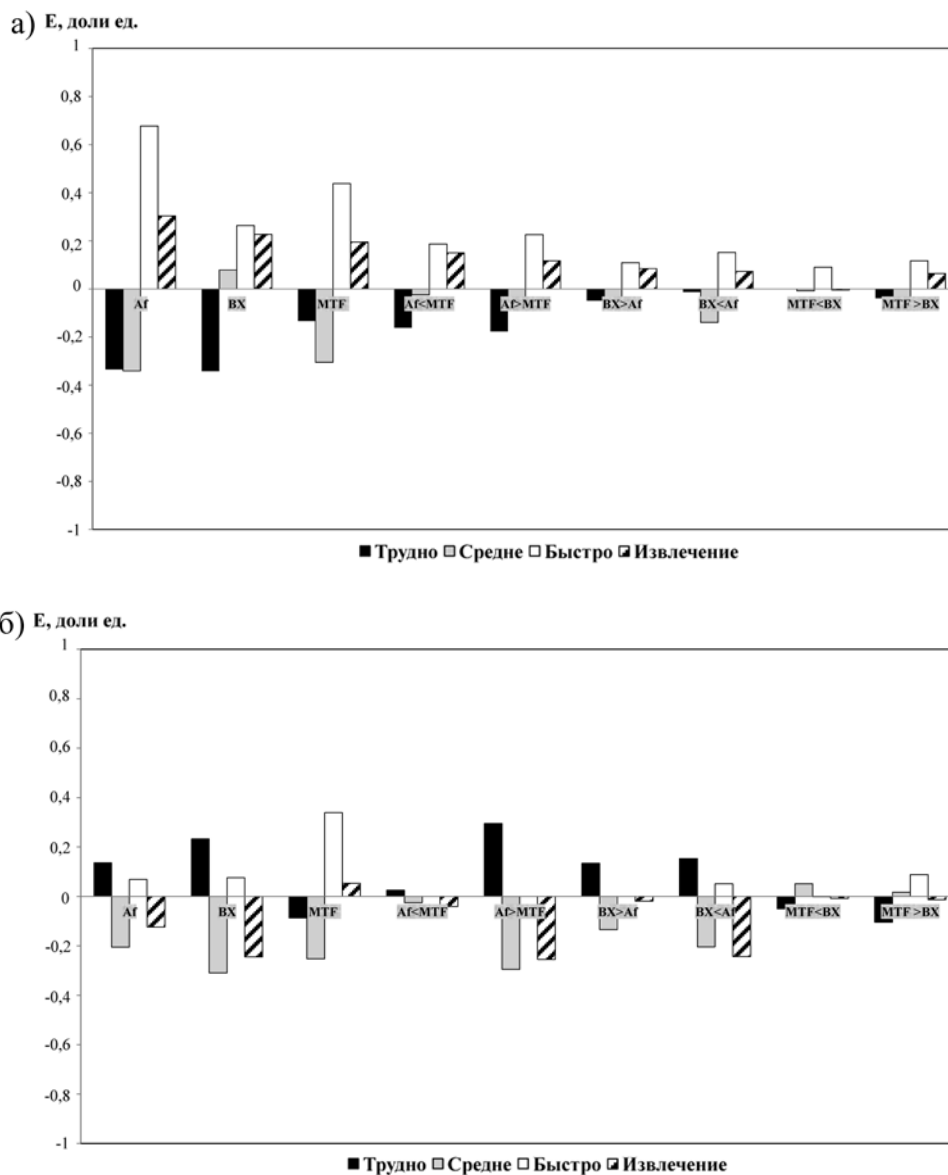


Рис. 5. Показатель селективности при флотации сфалерита и пирита композициями сульфгидрильных собирателей (100 г/т): а) $pH = 8$; б) $pH = 12$

композиций MTF–BX и BX–Af показатель $E_t = -0,1 - -0,25$, что означает преобладание доли трудно флотируемых фракций пирита над сфалеритом, а $E_b = 0,1 - 0,24$, то есть доля быстро флотируемых фракций сфалерита было

больше, чем у пирита. Отмечено, что для этой композиции показатель $E_c > 0$ за исключением случая MTF < BX.

При использовании композиций Af–MTF или только MTF кинетика флотации минералов менялась: так

значение $E_t > 0$, причем максимальное $E_t = 0,38$ было для МТФ и снижалось до 0,11 и 0,02 для композиции Af > МТФ и Af < МТФ соответственно. Показатель селективности быстро флотируемых фракций $E_b \geq 0$ и составил 0,13 и 0,24 для Af < МТФ и Af > МТФ соответственно, а показатель для средне флотируемых $E_c < 0$, то есть доля средне флотируемых фракций пирита была выше, чем сфалерита.

Кинетика флотации минералов только собирателями ВХ, Af и МТФ показала, что отличия $E_b < 0$, то есть доля быстро флотируемых фракций пирита превышала долю таких же фракций сфалерита, а показатели $E_t < 0$, $E_c < 0$.

На рис. 5 показано влияние композиций сульфидрильных собирателей на селективность сфалерита и пирита в слабо и сильно щелочных средах.

При pH = 8 и расходе собирателя 100 г/т наибольшая селективность наблюдалась при флотации минералов Af, об этом свидетельствует $E_b = 0,304$, а наименьшая при флотации композицией МТФ–ВХ $E_b = 0,005–0,064$. Показатели фракционной селективности в части быстро флотируемых фракций составили $E_b = 0,677$ и $E_b = 0,1$ соответственно. Селективность по трудно флотируемым фракциям составила $E_t = -0,335$ и $E_t = -0,04$, а по средне флотируемым фракциям $E_c = -0,341$ и $E_c = -0,08$ соответственно. То есть, в слабо щелочной среде наиболее селективным собирателем, как по извлечению, так и по кинетике флотации, оказался Af, а наименее селективным – композиция МТФ–ВХ. Отмечено, что при pH = 8 значение $E_c < 0$.

Принципиально иными были значения показателей селективности при флотации минералов в сильно щелочной среде (pH = 12). Как было отмечено выше, при данном значении pH пирит флотировался с большим извле-

чением по сравнению со сфалеритом. Об этом свидетельствуют отрицательные значения $E_b < 0$ для всех собирателей и композиций, за исключением МТФ ($E_b = 0,053$). Отмечено, что наименьшие значения $E_b \sim -0,25$ наблюдались при использовании в качестве собирателя композиций Af > МТФ, ВХ < Af или ВХ.

Влияние pH проявилось и в отличиях кинетики флотации минералов. Так селективность по средне флотируемым фракциям для ВХ и Af > МТФ была близкой ($E_c = -0,3$), а для композиции ВХ < Af составила $E_c = -0,2$. Отличия в доле трудно флотируемых фракциях проявлялись по-разному: для большинства собирателей $E_t > 0$, а для собирателей МТФ и МТФ–КХ $E_t > 0$. То есть, для трех последних собирателей доля трудно флотируемых фракций сфалерита была больше, чем доля трудно флотируемых фракций пирита ($E_t = 0,05 – 0,1$).

Анализ селективности быстро флотируемых фракций установил, что в сильно щелочной среде для Af, ВХ, ВХ < Af, МТФ > ВХ показатель $E_b = 0,05 – 0,09$, а для остальных собирателей и композиций $E_b = 0$. С учетом спектра флотируемости пирита при pH = 12 (см. рис. 2в), в котором отсутствовали быстро флотируемые фракции, справедлив вывод о том, что кинетика флотации пирита и селективность в большей степени определялась средне флотируемыми фракциями. Исключением стал МТФ, при котором $E_b = 0,34$.

Предложенная методика и расчет по оценке показателя фракционной селективности минералов с учетом кинетики их флотации позволила на примере сфалерита и пирита рассчитать показатели их селективности по трудно, средне и быстро флотируемым фракциям сульфидрильными собирателями и их композициями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. Рубинштейн Ю.Б. Кинетика флотации. – М.: Недра, 1980. – 375 с.
4. 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.
5. Бочаров В.А., Рыскин М.Я. Технология кондиционирования и селективной флотации руд цветных металлов. – М.: Недра, 1993. – 305 с.
6. Шубов Л.Я., Иванков С.И. Запатентованные флотационные реагенты: справочное пособие. – М.: Недра, 1992. – 362 с.
7. Кисляков Л.Д., Козлов Г.В., Нагирняк Ф.И. и др. Флотация медно-цинковых и медных руд Урала. – М.: Недра, 1966. – 336 с.
8. 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.
9. Finkelstein N.P. The activation of sulphide minerals for flotation: a review // *International Journal of Mineral Processing* 1997. Vol. 52. p. 81–120.
10. 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.
11. 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.
12. Makanza A.T., Vermaak M.K.G., Davidt J.C. The flotation of auriferous pyrite with a mixture of collectors // *International Journal of Mineral Processing*, 2008, Vol. 86, p. 85–93.
13. 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.
14. Горячев Б.Е., Наинг Лин У, Николаев А.А., Полякова Ю.Н. Особенности влияния катионов меди, цинка и железа на флотиремость пирита одного из медно-цинковых месторождений Урала // *Цветные металлы*. – 2015. – № 1. – С. 12–17.
15. Николаев А.А., Со Ту, Горячев Б.Е. Исследование закономерностей кинетики флотации неактивированного сфалерита композициями сульфгидрильных собирателей флотометрическим методом // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2015. – № 6. – С. 86–95.
16. Бочаров В.А., Игнаткина В.А., Хачатрян Л.С., Херсонский М.И., Бондарев А.А., Комаровский В.П. Способ флотации колчеданных пирротино-пиритных руд цветных и благородных металлов. Патент 2499633. 2013.11.27. **ПАТ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Николаев Александр Александрович – кандидат технических наук, доцент,
e-mail: nikolaevopr@misis.ru,
Со Ту – аспирант
Горячев Борис Евгеньевич – доктор технических наук, профессор,
НИТУ «МИСиС».

UDC 622.765

PROSPECT FOR SHALE GAS PRODUCTION

Nikolaev A.A.¹, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, e-mail: nikolaevopr@misis.ru,
So Tu¹, Graduate Student,
Goryachev B.E.¹, Doctor of Technical Sciences, Professor,
National University of Science and Technology «MISIS», 119049, Moscow, Russia.

The article discusses the economic feasibility of gas production from shales in comparison with its production from traditional raw materials. The achievements in this area made by USA are shown. In some examples shown that in our days shale gas can not provide serious competition to traditional sources of gas, but it is also

mentioned that with the improvement of mining technology shale gas may become cost-effective. The article highlights issues related to the exploration and production of shale gas in Europe, where some European countries have serious environmental claims.

Key words: shale gas, prospecting, mining, resources, ecology.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work was supported by the RF Ministry of Education and Science, under the Federal Targeted Program for Research and Development in the Priority Areas of Advancement of the Russian Scientific and Technological Complex for 2014–2020, Project No. rfmefi57514X0085.

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* (Dressing by flotation), Moscow, MGGU, 2008, 710 p.
3. Rubinshteyn Yu.B. *Kinetika flotatsii* (Kinetics of flotation), Moscow, Nedra, 1980, 375 p.
4. 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 rossypey redkikh metallov* (Mineral processing technology. vol. 1: Natural resources. Beneficiation of nonferrous and rare metal ores), Moscow, Ruda i Metally, 2007, 472 p.
5. Bocharov V.A., Ryskin M.Ya. *Tekhnologiya konditsionirovaniya i selektivnoy flotatsii rud tsvetnykh metallov* (Technology of conditioning and selective flotation of nonferrous metals), Moscow, Nedra, 1993, 305 p.
6. Shubov L.Ya., Ivankov S.I. *Zapatentovannyye flotatsionnye reagenty: spravochnoe posobie* (Proprietary flotation agents: Reference aid), Moscow, Nedra, 1992, 362 p.
7. Kislyakov L.D., Kozlov G.V., Nagirnyak F.I. *Flotatsiya medno-tsinkovykh i mednykh rud Urala* (Flotation of copper–zinc and copper ore of the Ural), Moscow, Nedra, 1966, 336 p.
8. 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.
9. Finkelstein N.P. The activation of sulphide minerals for flotation: a review. *International Journal of Mineral Processing*. 1997. Vol. 52. p. 81–120.
10. 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.
11. 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.
12. Makanza A.T., Vermaak M.K.G., Davidt J.C. The flotation of auriferous pyrite with a mixture of collectors. *International Journal of Mineral Processing*, 2008, Vol. 86, p. 85–93.
13. Goryachev B.E., Naing Lin U, Nikolaev A.A. *Tsvetnye metally*. 2014, no 6, pp. 16–22.
14. Goryachev B.E., Naing Lin U, Nikolaev A.A., Polyakova Yu.N. *Tsvetnye metally*. 2015, no 1, pp. 12–17.
15. Nikolaev A.A., So Tu, Goryachev B.E. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 6, pp. 86–95.
16. Bocharov V.A., Ignatkina V.A., Khachatryan L.S., Khersonskiy M.I., Bondarev A.A., Komarovskiy V.L. *Patent RU 2499633*, 2013.11.27.



Жизнь и карьера инженера зависят от уровня образования и культуры общества и востребованности новых технологий.