

УДК 622.765

**В.А. Игнаткина, В.А. Бочаров, Д.А. Алексейчук**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
СУЛЬФИДРИЛЬНЫХ СОБИРАТЕЛЕЙ  
С ПОВЕРХНОСТЬЮ СУЛЬФИДНЫХ МИНЕРАЛОВ**

*Изложены результаты лабораторных исследований, направленных на исследование взаимодействия сульфидрильных собирателей с поверхностью сульфидных минералов. Были проведены исследования, направленные на установление взаимосвязи флотуемости сульфидных минералов различными сульфидрильными собирателями и адсорбции этих реагентов на минеральной поверхности от концентрации реагентов, значений pH среды, и выбор наиболее селективных реагентов. Было исследовано более 10 сульфидрильных собирателей на мономинеральных фракциях сульфидов железа, меди, цинка и свинца. Наибольшую селективность по отношению к разделяемым сульфидам обеспечивает применение собирателей марки «Берафлот», которые относятся к модифицированным дитиофосфатам и имеют промышленное производство. Определены взаимосвязь флотуемости сульфидов с адсорбцией реагентов на поверхности, оптимальный диапазон pH при флотации, оптимальная концентрация реагентов, при которой достигается максимальное насыщение ими мономинеральной поверхности.*

*Ключевые слова: сульфидрильные собиратели, флотация, минерал, адсорбция, селективность, поверхность.*

---

**В**ыбор технологических схем и режимов обогащения руд цветных металлов зависит от физико-химических свойств рудных и породных минералов, слагающих конкретный технологический тип руды. Многие минералы, которые необходимо разделить, с выделением в разные концентраты или продукты, близки по своим физико-химическим и флотационным свойствам, что создает значительные трудности в выборе режима флотации. Практически значительно легче отделить сульфидные минералы от породных минералов и намного труднее разделить сульфиды одного металла от сульфидных минералов другого металла. В связи с этим становится актуальным выбор оптимальных собирателей и их количественных сочетаний с целью селективного разделения сульфидных минералов.

Основным рудообразующим минералом для медно-колчеданных и медно-цинковых сплошных и серно-колчеданных вкрапленных руд Уральского региона является пирит. Его выделения морфологически многообразны: зерна, кристаллы разного размера с четкими гранями, изометричные неправильной формы выделения, скрытокристаллические структуры, колломорфные образования и фрамбоиды. В некоторых месторождениях исследователи выделяют до 5 генераций пирита. Пириты разных генераций имеют неодинаковые физико-химические свойства, в том числе и флотационные. Это обуславливает сложности селективного разделения сульфидных минералов, так многие генерации пиритов легко флотируются вместе с другими сульфидами ксантогенатами.

Универсальным способом управления селективностью разделения минералов с близкими физико-химическими свойствами, является изменение поверхностных свойств разделяемых минералов, повышение их контрастности за счет применения селективных собирателей.

Проведенные исследования направлены на установление взаимосвязи флотиремости сульфидных минералов различными сульфгидрильными собирателями и адсорбции этих реагентов на минеральной поверхности от концентрации реагентов, значений рН среды, и выбор наиболее селективных реагентов.

#### **Методы исследований**

В работе использованы следующие методы исследований: беспенная флотация мономинеральных фракций пирита, халькопирита, сфалерита и галенита; УФ спектроскопия (адсорбционные исследования), ИК спектроскопия, в том числе МНПВО, комплексные исследования мономинералов.

Объектами исследований являлись мономинеральные фракции сульфидных минералов (пирита, халькопирита, неактивированного сфалерита и галенита), крупностью минус 44 + 10 мкм.

В лабораторных условиях исследованы следующие собиратели: бутиловый, этиловый, изобутиловый и изопропиловый ксантогенаты, диметилдитиокарбамат (ДМДК), диэтилдитиокарбамат (ДЭДК), изобутиловый и изопропиловый дитиофосфаты, тионокарбамат, СГМ-1, СГМ-5, Берафлот 3026, Берафлот 3035, Берафлот 4027, Берафлот 4029.

#### **Результаты исследований и их обсуждение**

В результате исследований, проведенных методом беспенной флотации на мономинеральных фракциях

сульфидных минералов, были получены следующие зависимости, представленные на рис. 1 (*а* — для пирита, *б* — для халькопирита, *в* — для неактивированного сфалерита, *г* — для галенита).

Как видно из данных, приведенных на рис. 1, наибольшее извлечение пирита достигается при применении бутилового ксантогената или модифицированных дитиофосфатов — Берафлот 4029 и Берафлот 3026, а наименьшее при использовании ДМДК, изобутилового дитиофосфата, тионокарбамата, Берафлота 3035; наиболее высокая флотиремость халькопирита получена при использовании ДЭДК, изобутилового дитиофосфата и бутилового ксантогената, а из технических собирателей более высокое извлечение в концентрат достигается с применением Берафлота 3035. Неактивированный сфалерит показывает невысокие результаты извлечения в концентрат, наименьшее извлечение достигается ксантогенатами, а наиболее высокое — техническими собирателями — Берафлот 4027 и Берафлот 4029; для галенита наибольшее извлечение достигается при применении Берафлота 3035, ДЭДК, а наименьшее при применении тионокарбамата и этилового ксантогената.

Проведенные исследования методом беспенной флотации на разных образцах мономинералов позволили установить следующие ряды извлечения сульфидов:

1. для халькопирита установлен следующий ряд повышения флотиремости: ДМДК < тионокарбамат ≈ ДЭДК < Берафлот 3026 < Берафлот 4027 << этиловый ксантогенат ≈ Берафлот 4029 < бутиловый ксантогенат < изобутиловый ДТФ < Берафлот 3035;

**Элементный состав изучаемых мономинералов**Пирит  $\text{FeS}_2$ 

Элемент	Содержание, %
S	51,7320
Fe	45,7807
Si	1,0528
Al	0,8851
Pb	0,1664
Ca	0,1042
Cu	0,1029
Cr	0,0774
Mg	0,0503
Zn	0,0236
P	0,0128
Ni	0,0118

Халькопирит  $\text{CuFeS}_2$ 

Элемент	Массовая доля, %
Cu	32,2891
S	36,7883
Fe	28,6504
Si	0,8456
Pb	0,7088
Zn	0,3811
Ca	0,2573
Se	0,0416
Al	0,0313
Ra	0,0064
Th	0,0001

Сфалерит  $\text{ZnS}$ 

Элемент	Массовая доля, %
Zn	53,5546
S	33,2019
Pb	5,6273
Fe	5,5775
Ca	0,6425
Si	0,5884
Cd	0,3698
Mn	0,1566
Cu	0,1060
Mg	0,0921
Al	0,0353
Ra	0,0286
Co	0,0196

Галенит PbS

Элемент	Массовая доля, %
Pb	83,8613
S	12,6546
Zn	1,1741
Fe	0,6885
Ra	0,5192
Ca	0,4535
Si	0,1867
Cu	0,1328
Mg	0,1219
Rb	0,0936
Mn	0,0723
Al	0,0416

2. для неактивированного сфалерита ряд повышения флотиремости: ДМДК < ДЭДК ≈ Берафлот 3026 ≈ тионокарбамат ≈ Берафлот 3035 ≈ изобутиловый ДТФ < Берафлот 4029 ≈ Берафлот 4027 < этиловый ксантогенат < бутиловый ксантогенат.

Ряды сравнения извлечения пирита по сравнению с бутиловым ксантогенатом при беспенной флотации выглядят следующим образом:

- изобутиловый дитиофосфат < Берафлот 3035 < этиловый ксантогенат < диэтилдитиокарбамат < метилзопропилтионокарбамат < **бутиловый ксантогенат** < Берафлот 3026 < Берафлот 4027 < Берафлот 4029.

Данные, полученные при беспенной флотации сульфидных минералов

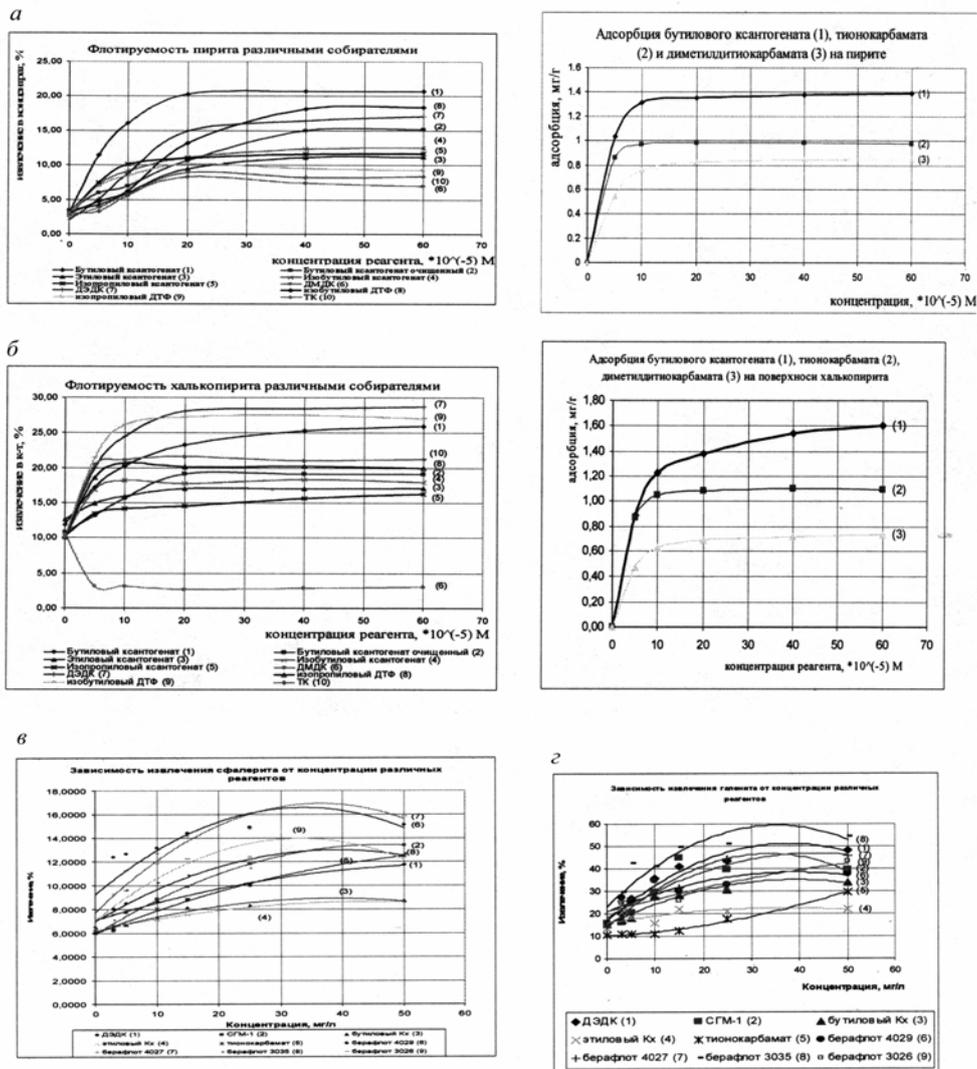
сопоставимы с результатами, полученными при изучении адсорбции сульфгидрильных собирателей на мономинеральной поверхности, увеличение адсорбции реагента, приводит к увеличению извлечения мономинерала в концентрат. Получено, что насыщение поверхности пирита и халькопирита бутиловым ксантогенатом достигается при обменной емкости последнего 1,31 мг/г и 1,55 мг/г, тионокарбаматом при 0,97 мг/г и 1,1 мг/г, диметилдитиокарбаматом (ДМДК) достигается при обменной емкости последнего 0,85 мг/г и 0,72 мг/г соответственно. При пересчете на площадь удельной поверхности мономинерала, получим:

Показатель	Пирит		Халькопирит	
	Буг.Кх	ТК	Буг.Кх	ТК
$\Gamma_{\infty} \cdot 10^{-5}, \text{M}/\text{M}^2$	2,11	1,65	3,09	2,09
$\alpha \cdot 10^{-5}$	0,86	1,00	0,71	0,38
$1/\alpha \cdot 10^5$	1,16	1,00	1,43	2,5
$S_{\infty} \cdot 10^{-20}, \text{M}^2$	7,8	10,00	5,3	7,9

Опытами по беспенной флотации было установлено, что наибольшая разница в извлечении мономинералов в концентрат наблюдается при pH=9,5.

Результаты флотиремости по беспенной флотации мономинераль-

ных фракций пирита, халькопирита, сфалерита сульфгидрильными реагентами при исходном значении pH среды, равном 8,1—8,5, показали, что в наименьшей степени пирит флотируется изобутиловым ДТФ и ДМДК. Наибольшую разницу между



**Рис. 1. Результаты беспенной флотации и адсорбционных исследований:**

*а* — для пирита, *б* — для халькопирита, *в* — для неактивированного сфалерита, *г* — для галенита

извлечением пирита и халькопирита показали изобутиловый ДТФ (20—28 %). Опытами по беспенной флотации было установлено, что наибольшая разница в извлечении мономинералов в концентрат наблюдается при  $pH=9,5$ .

Результаты флотуемости по беспенной флотации мономинеральных

фракций пирита, халькопирита, сфалерита сульфгидрильными реагентами при исходном значении  $pH$  среды, равном 8,1—8,5, показали, что в наименьшей степени пирит флотуется изобутиловым ДТФ и ДМДК. Наибольшую разницу между извлечением пирита и халькопирита показали изобутиловый ДТФ (20—28 %)

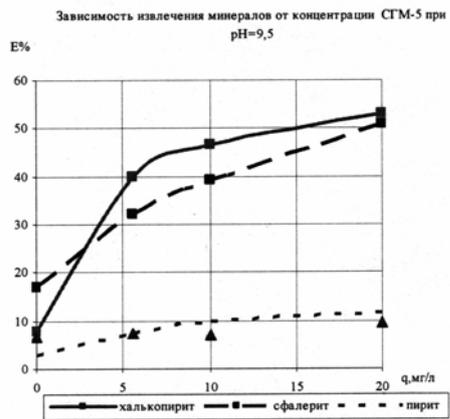
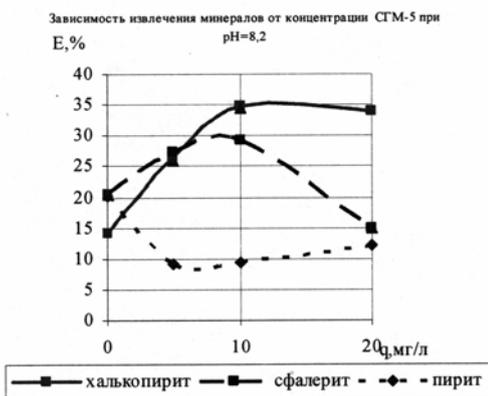
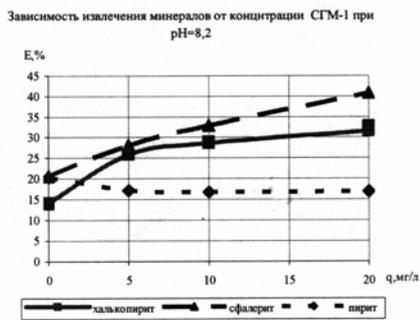


Рис. 2. Зависимость извлечения сульфидных минералов сульфгидрильными собирателями при pH исходного раствора 8 и 9,5

и этиловый ксантогенат (7—9 %); наибольшая разница в извлечении пирита и галенита наблюдается при применении: ДМДК (27-37 %), ДЭДК (23-37 %) и изобутилового ДТФ (29-34 %). Извлечение неактивированного сфалерита в опытах не превышает 20 %.

Результаты флотуемости халькопирита, пирита и природноактивированного сфалерита от концентрации бутилового ксантогената, изобутилового дитиофосфата (СГМ-1) и Берафлота 3035 (СГМ-5) при различных значениях рН среды, приведенные на рисунке 2, свидетельствуют о том, что модифицированные дитиофосфаты (СГМ-1, СГМ-5, Берафлот -3035) существенно увеличивают разницу в извлечении между пиритом с одной стороны и халькопиритом и сфалеритом с другой стороны, по сравнению с бутиловым ксантогенатом.

### **Выводы**

1) Установлены следующие ряды извлечения сульфидов методом беспенной флотации.

Для пирита установлен следующий ряд повышения флотуемости: ДМДК  $\approx$  изобутиловый ДТФ < Берафлот 3035 < Берафлот 3026 < тионокарбамат < этиловый ксантогенат < Берафлот 4027 < Берафлот 4029 < ДЭДК < бутиловый ксантогенат.

Для халькопирита установлен следующий ряд повышения флотуемости: ДМДК < тионокарбамат  $\approx$  ДЭДК

< Берафлот 3026 < Берафлот 4027 << этиловый ксантогенат  $\approx$  Берафлот 4029 < бутиловый ксантогенат < изобутиловый ДТФ < Берафлот 3035.

Для неактивированного сфалерита установлен следующий ряд повышения флотуемости: ДМДК < ДЭДК  $\approx$  Берафлот 3026  $\approx$  тионокарбамат  $\approx$  Берафлот 3035  $\approx$  изобутиловый ДТФ < Берафлот 4029  $\approx$  Берафлот 4027 < этиловый ксантогенат < бутиловый ксантогенат.

Наименьшее извлечение пирита получено при использовании ДМДК, изобутилового дитиофосфата, этилового ксантогената, тионокарбамата, Берафлота 3035. Наибольшую селективность при разделении сульфидных минералов обеспечивает применение Берафлота 3035.

Наилучшие результаты получены при флотации пирита при рН 6—7, уменьшение или увеличение этого значения приводит к снижению показателей флотации.

2) Характер адсорбционных кривых соответствует характеру кривых, полученных при беспенной флотации мономинералов исследуемыми реагентами. По результатам сорбционных исследований определена оптимальная концентрация реагентов, при которой достигается максимальное насыщение ими мономинеральной поверхности. Это значение равно  $10^{-4}$  М/л.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Бочаров В.А., Игнаткина В.А. Технология обогащения полезных ископаемых. — М.: Руда и Металлы, 2007.
2. Абрамов А.А. Технология обогащения руд цветных металлов. — М.: Недра, 1993.
3. Абрамов А.А. Технология обогащения окисленных и смешанных руд цветных металлов. М.: Недра, 1986, 302 с.
4. Методы исследования флотационного процесса / В.И. Мелик-Гайказян, А.А. Абрамов, Ю.Б. Рубинштейн, В.М. Авдохин, П.М. Соложенкин. — М.: Недра, 1990. **ИЛАС**

### **КОРОТКО ОБ АВТОРАХ**

*Игнаткина В.А.* — кандидат технических наук, доцент, докторант,  
*Бочаров В.А.* — доктор технических наук, профессор,  
*Алексейчук Д.А.* — аспирант, инженер,  
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС».