

ВЛИЯНИЕ МОДИФИКАТОРОВ КЛАССА СУЛЬФОКСИДОВ НА ФЛОТИРУЕМОСТЬ СУЛЬФИДНЫХ МИНЕРАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ФЛОТАЦИИ РУДЫ

В.А. Бочаров¹, В.А. Игнаткина¹, Д.В. Абрютин², А.А. Каюмов¹, В.Р. Каюмова (Корж)¹

¹ НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: maliaby_92@mail.ru

² ООО «АДВ-Инжиниринг», Москва, Россия

Аннотация: Представлены результаты исследований образования и устойчивости серосодержащих ионов, образующихся в жидкой фазе пульпы, в зависимости от pH среды и продолжительности кондиционирования реагентов-модификаторов класса сульфоксидов. Установлено, что при флотации руд цветных металлов с серосодержащими реагентами-модификаторами воздействие их на флотационную систему будет зависеть в основном от величины pH и продолжительности кондиционирования, которые предопределяют устойчивость модификаторов. В большей степени флотлируемость пирита ниже при $\text{pH}_{\text{исх}} = 8$ с $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$, NH_4HSO_3 , Na_2SO_3 . Технологические показатели флотации медно-цинковой руды Учалинского месторождения выше с Na_2SO_3 , $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ и NH_4HSO_3 при $\text{pH}_{\text{исх}} = 8$ в сравнении с SO_2 . Установлено, что индекс селективности выше с Na_2SO_3 (6,3) в сравнении с SO_2 (5,3), $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (5,0), NH_4HSO_3 (3,2). Определено, что увеличение расхода модификатора >1 кг/т приводит к снижению флотлируемости сульфидов меди на руде. Установлено, что при стандартных реагентных режимах флотации пиритной медно-цинковой руды Узельгинского месторождения увеличение концентрации тиосульфата натрия с 0,3 до 1 г/л приводит к снижению извлечения меди с 61 до 19%. Индекс селективности флотации сульфидов меди при параметрах флотации $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 = 0,3$ г/л, $\text{pH} = 8,0$; $\text{ОВП} = +120$ мВ составляет 3,31 против 1,68 при $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 = 1$ г/л, $\text{pH} = 11,5$; $\text{ОВП} = -30$ мВ.

Ключевые слова: сульфиды, руда, модификаторы, окисление, восстановление, электрохимия, флотация, технология.

Благодарность: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 20-05-00157.

Для цитирования: Бочаров В. А., Игнаткина В. А., Абрютин Д. В., Каюмов А. А., Каюмова В. Р. (Корж) Влияние модификаторов класса сульфоксидов на флотлируемость сульфидных минералов и технологические показатели флотации руды // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 12. – С. 20–33. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_12_0_20.

Effect of sulfoxide-based modifiers on sulfide mineral floatability and on production data of ore flotation

V.A. Bocharov¹, V.A. Ignatkina¹, D.V. Abrytin², A.A. Kayumov¹, V.R. Kayumova (Korzh)¹

¹ Mining Institute, National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia,
e-mail: maliaby_92@mail.ru

² ООО «ADV-Engineering», Moscow, Russia

Abstract: The article describes the research findings on the formation and stability of sulfur-bearing ions in the water phase of pulp slurries depending on the medium pH and on the duration of tempering agents-modifiers from the class of sulfoxides. In flotation of nonferrous metals with sulfur-bearing modifiers, the influence of the latter mainly depends on the value of pH and on the tempering duration which governs stability of the modifiers. For example, floatability of pyrite is lower in a greater degree at $\text{pH}_{\text{init}} = -8$ with $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$, NH_4HSO_3 , Na_2SO_3 . The productivity of flotation of Uchaly copper-zinc ore is higher with Na_2SO_3 , $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ and NH_4HSO_3 at $\text{pH}_{\text{init}} = -8$ as compared with SO_2 . The selectivity index is higher with Na_2SO_3 (6,3) as against SO_2 (5,3), $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (5,0) and NH_4HSO_3 (3,2). The increase in the consumption of the modifiers over 1 kg/t decreases the floatability of copper sulfides. In the standard reagent modes of flotation of Uzelga pyritic copper-zinc ore, the increased concentration of sodium thiosulfate from 0.3 to 1 g/l reduces the copper recovery from 61 to 19%. The selectivity index in flotation of copper sulfides at $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 = 0,3$ g/l, $\text{pH} = -8,0$ and $\text{ORP} = +120$ mV totals 3.31 as against 1.68 at $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 = 1$ g/l, $\text{pH} = -11,5$ and $\text{ORP} = -30$ mV.

Key words: sulfides, ore, modifiers, oxidation, recovery, electrochemistry, flotation, technology.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research, Project No. 20-05-00157.

For citation: Bocharov V. A., Ignatkina V. A., Abrytin D. V., Kayumov A. A., Kayumova V. R. (Korzh). Effect of sulfoxide-based modifiers on sulfide mineral floatability and on production data of ore flotation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(12):20-33. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_12_0_20.

Введение

Вовлекаемые в переработку массивные, тонковкрапленные, труднообогатимые сульфидные руды месторождений РФ с многообразной минеральной формой сульфидов железа обладают флотационными свойствами, близкими с сульфидными цветными металлов. В рудах цветных металлов чаще всего основными рудными минералами являются сульфиды железа (пирит, пирротин), обладающие различными модификациями, отличающиеся как текстурно-структурными характеристиками, так и технологическими (флотационными) свойствами, влияющие на качество конечного концентрата цветных металлов, в этой связи задачи, связанные с повышением контрастности флотации минералов цветных металлов в зависимости от содержания в них сульфидов железа, остаются в тренде [1–3].

Флотоактивность пирита при переработке сульфидных руд цветных металлов приводит к увеличению степени концентрации серы и железа в концентрате, и тем самым к разубоживанию по ценному компоненту. Более того, если сульфиды железа представлены мышьяковистым пиритом, в процессе плавки будут образовываться токсичная мышьяковистая пыль и газы, что осложняет плавку концентратов цветных металлов [4–7].

В целом в мире на флотационную переработку поступает 1000 млн т/год минерального сырья. Успех флотации напрямую зависит от физико-химического состояния поверхности минералов [8–10]. Поскольку большинство сульфидных минералов являются полупроводниками, в процессе флотации протекают различные электрохимические реакции [11–14]. Одним из основных факторов, влияющих на электрохимиче-

ские процессы, является электрохимический потенциал. Электрохимический потенциал отвечает не только за взаимодействие взаимодействия флотационных реагентов с поверхностью минералов, способствующих повышению гидрофобности, но и за образование труднорастворимых гидроксидных соединений, повышающих гидрофильность минералов [15–18]. В отечественной и зарубежной практике обогащения медно-цинково-пиритных руд нашли широкое распространение серосодержащие реагенты-модификаторы [19, 20].

Таким образом, изучению влияния ионного состава жидкой фазы на флотацию сульфидных минералов уделено недостаточное внимание. Для эффективного депрессирующего действия реагентов необходимо знать их устойчивость в различных условиях ведения процесса флотации.

Объекты и методы исследования

Физико-химические исследования выполнены с использованием анионных серосодержащих модификаторов — Na_2S ,

SO_2 , Na_2SO_3 , NH_4HSO_3 , $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ — в нейтральной, щелочной и для отдельных модификаторов в кислых областях величины pH (среда создавалась с NaOH или HCl). Контроль концентраций модификаторов выполнен методом йодометрического титрования [21–23]. Сульфат-ион является конечной формой окисления всех серосодержащих анионов.

Потенциометрические измерения выполнены на лабораторном иономере с помощью pH-электрода со сферической мембраной и Ag/AgCl — электрода сравнения.

Флотационные исследования выполнены на мономинеральных фракциях пирита (FeS_2) крупностью фракций $-0,071+0,040$ мм с использованием сульфгидрильного собирателя — бутилового ксантогената (ЧДА), вспенивателя — Т-90 (оксаль), продолжительность флотации 3 мин (рис. 1). Пробы минералов предварительно подготовлены к исследованию и хранятся в эксикаторе с хлоридом кальция; сульфиды обрабатывались 5%-ным раствором соляной кислоты, затем отмывались пропорциональными



Рис. 1. Методика проведения кинетики пенной флотации мономинералов

Fig. 1. Methodology kinetics froth flotation of monominerals



Рис. 2. Принципиальная схема флотации проб пиритных медно-цинковых руд Учалинского и Узельгинского месторождений

Fig. 2. Principal flotation test flowsheet pyrite-copper-zinc ores of the Uchaly and Uzelga deposits (South Urals)

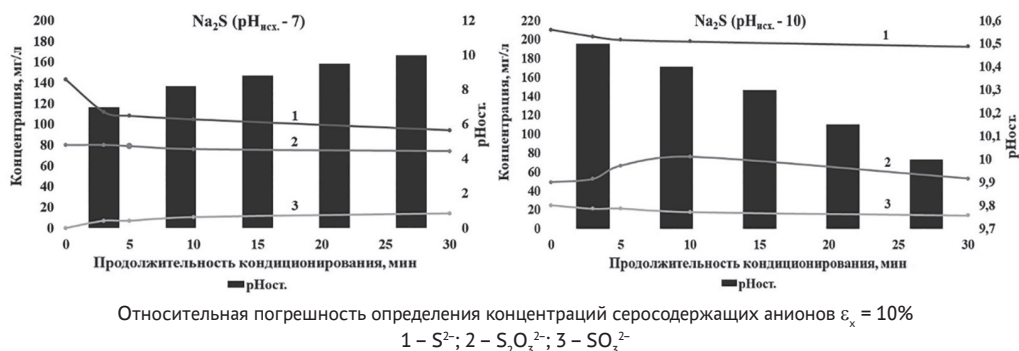


Рис. 3. Ионный состав раствора сернистого натрия в зависимости от продолжительности кондиционирования при pH 7 и 10

Fig. 3. Ionic composition of sodium sulfide solution versus conditioning time at pH 7 and 10

удельными объемами дистиллированной воды до нейтрального pH. Флотацию чистых минералов проводили в механической флотомашине (Механобр) объемом камеры 0,1 л (Т:Ж-1:20).

Технологические исследования проведены на пробах пиритных медно-цинковых руд Учалинского, Узельгинского месторождений по схеме прямой селективной флотации (рис. 2) с использованием в качестве собирателя бутилового ксантогената и вспенивателя — Т-90 (оксаль), расход модификаторов находится в пределах 0,3–1,0 кг/т. Испытания выполнены в механической флотомашине (ГИНЦВЕТМЕТ) объемом камеры 3 л (Т:Ж-1:3).

Обсуждение результатов

Изучено влияние продолжительности кондиционирования на ионный состав раствора Na_2S и SO_2 при разных величинах pH среды (рис. 3, 4).

В процессе кондиционирования установлено, что в начальный момент времени образуются различные соединения, характерные практически для всех серосодержащих модификаторов.

С увеличением продолжительности кондиционирования раствора сернистого натрия до 30 мин (см. рис. 3) при $pH_{исх} = 7$ наблюдается снижение концентрации S^{2-} в 2 раза при одновременном повышении щелочности среды с $pH_{исх} = 7$ до $pH_{исх} = 10$. В случае сульфит- и тио-

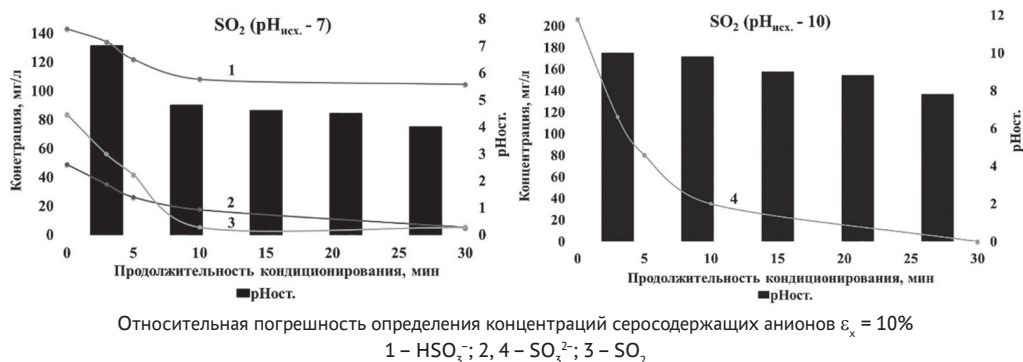


Рис. 4. Ионный состав раствора диоксида серы в зависимости от продолжительности кондиционирования при pH 7 и 10

Fig. 4. Ionic composition of sulfur dioxide solution versus conditioning time at pH 7 and 10

сульфат-иона концентрация первого увеличивается незначительно, а последнего — остается равновесной. При кондиционировании раствора сернистого натрия при $\text{pH}_{\text{исх}} - 10$ наблюдается совершенно другая картина; установлена устойчивость сульфид-иона в щелочной среде. При продолжительном кондиционировании 30 мин концентрация сульфид-иона снижается незначительно, в среднем на 15–18 мг/л. В щелочной среде концентрация тиосульфат-ионов возрастает почти в 1,5 раза за 10 мин, дальнейшее увеличение продолжительности кондиционирования приводит к снижению концентрации тиосульфат-ионов. Также в щелочной среде наблюдается незначительное окисление сульфидного иона до сульфат-иона.

При кондиционировании диоксида серы (см. рис. 4) при $\text{pH}_{\text{исх}} - 7$ в растворе образуются сульфит- и бисульфит-ионы.

Концентрация сульфит-иона снижается, как и концентрация диоксида серы, до нуля, но бисульфит-ион в этих условиях устойчивый. Концентрация понижается незначительно в среднем в 1,3 раза. В щелочной pH среде, как в случае с сульфитом натрия, так и с бисульфитом аммония, в растворе присутству-

ет сульфит-ион, который окисляется до сульфат-иона.

При кондиционировании раствора сульфита натрия (рис. 5) в нейтральной среде ($\text{pH}_{\text{исх}} - 7$) образуется бисульфит-ион, концентрация которого при продолжительном кондиционировании снижается незначительно.

В процессе кондиционирования раствора сульфита натрия в слабощелочной среде наблюдается существенное снижение pH среды с 7 до 5, а в щелочной среде — с 10 до 6.

Резкое снижение концентрации сульфит-иона связано, с одной стороны, с образованием бисульфит-иона, а с другой стороны — с окислением сульфит-иона до сульфата. При $\text{pH}_{\text{исх}} - 10$ в процессе кондиционирования раствора сульфита натрия происходит только окисление сульфита до сульфат-иона.

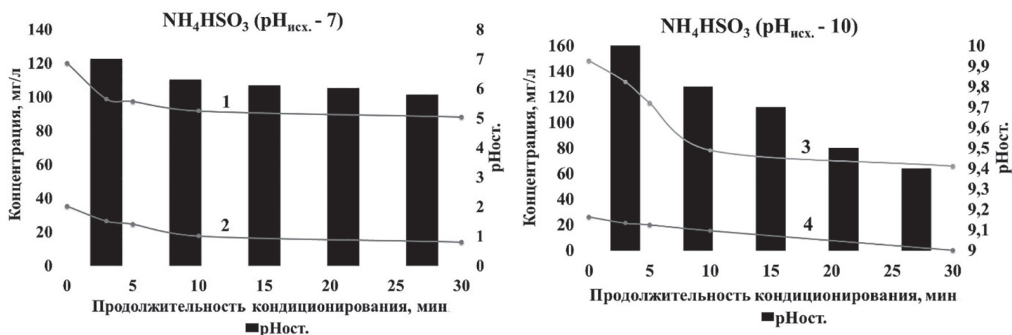
Отличие от сульфита натрия формирование ионного состава раствора бисульфита аммония происходит по-иному. Окисление бисульфит-иона сопровождается образованием тиосульфат-иона при всех значениях pH (рис. 6).

При $\text{pH}_{\text{исх}} - 7$ при продолжительном кондиционировании (30 мин) изменение концентрации бисульфит-, тиосульфат-иона и значения pH происходит



Рис. 5. Ионный состав раствора сульфита натрия в зависимости от продолжительности кондиционирования при pH 7 и 10

Fig. 5. Ionic composition of sodium sulfite solution versus conditioning time at pH 7 and 10



Относительная погрешность определения концентраций серосодержащих анионов $\epsilon_x = 10\%$
 1 – HSO_3^- ; 2, 4 – $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$; 3 – SO_3^{2-}

Рис. 6. Ионный состав раствора бисульфита аммония в зависимости от продолжительности кондиционирования при pH 7 и 10

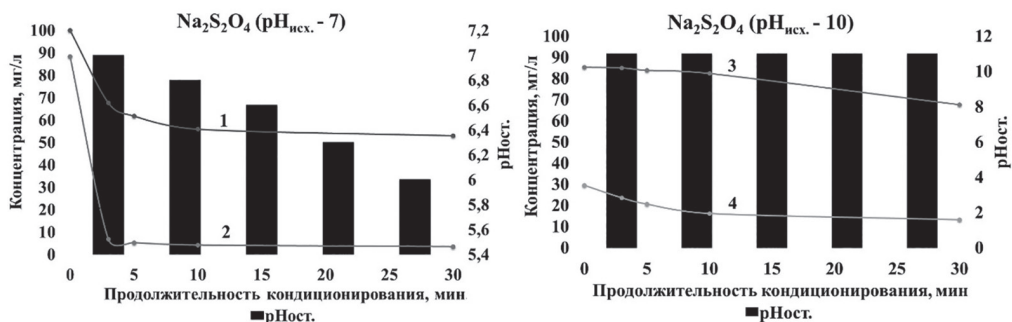
Fig. 6. Ionic composition of ammonium bisulfite solution versus conditioning time at pH 7 and 10

симбатно. В щелочной среде (pH_{исх} – 10) бисульфит-ион отсутствует. Окисление образовавшихся сульфит- и тиосульфат-ионов протекает до сульфат-ионов.

Кондиционирование раствора гидросульфата натрия при pH_{исх} – 7 натрия (3 мин) создает высокую концентрацию бисульфит- и тиосульфат-ионов (рис. 7). Дальнейшее увеличение продолжительности кондиционирования раствора гидросульфата натрия приводит к снижению концентрации тиосульфата почти до нуля, а концентрация бисульфит-иона за 30 мин снижается в 2 раза. В щелочной среде pH_{исх} – 10, как и в случае с бисуль-

фитом аммония, образуются сульфит- и тиосульфат-ионы, но, в отличие от бисульфита аммония, концентрация сульфит- и тиосульфат-ионов снижается более плавно и величина pH остается на одном уровне.

Проведенные исследования по изучению влияния продолжительности кондиционирования растворов серосодержащих модификаторов, показали, что при pH_{исх} – 7 восстановительные свойства проявляет сульфит-ион; при pH_{исх} – 10 наибольшей устойчивостью обладают сульфид- и тиосульфат-ионы, которые образуются в случае применения Na_2S .



Относительная погрешность определения концентраций серосодержащих анионов $\epsilon_x = 10\%$
 1 – HSO_3^- ; 2, 4 – $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$; 3 – SO_3^{2-}

Рис. 7. Ионный состав раствора тетраоксодисульфата натрия в зависимости от продолжительности кондиционирования при pH 7 и 10

Fig. 7. Ionic composition of sodium tetraoxodisulfate solution versus conditioning time at pH 7 and 10

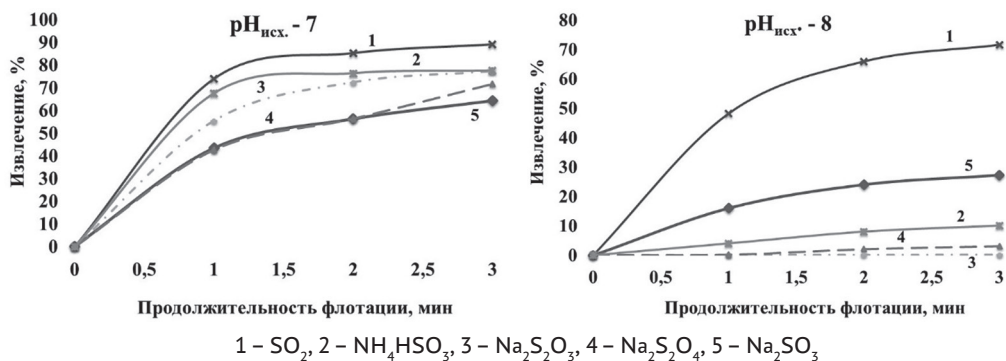


Рис. 8. Флотируемость мономинерального пирита с использованием модификаторов при pH 7 и 8
Fig. 8. Flotation response of pyrite using modifiers at pH 7 and 8

Таким образом, при флотации руд цветных металлов с серосодержащими реагентами-модификаторами воздействие их на флотационную систему будет зависеть в основном от величины pH, который предопределяет устойчивость

серосодержащих анионов и их воздействие с компонентами флотационной пульпы.

Изучено влияние ионного состава чистых растворов серосодержащих анионов на флотируемость мономинераль-

Таблица 1

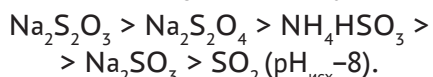
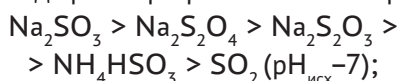
Результаты флотации пробы медно-цинковой руды с Na_2SO_3 при разных величинах pH среды

Results of flotation of copper-zinc ore using Na_2SO_3 at different pH values

Продукт	Выход, %	Массовая доля, %		Извлечение, %	
		Cu	Zn	Cu	Zn
Na_2SO_3, pH-7					
Медный концентрат	32,00	1,51	1,69	62,00	24,00
Хвосты медной флотации	68,00	0,44	2,51	38,00	76,00
Исходная проба	100,00	0,78	2,25	100,00	100,00
Na_2SO_3, pH-8					
Медный концентрат	11,00	5,11	5,11	72,00	25,00
Хвосты медной флотации	89,00	0,25	1,90	28,00	75,00
Исходная проба	100,00	0,78	2,25	100,00	100,00
Na_2SO_3, pH-9					
Медный концентрат	11,00	5,32	6,75	75,00	33,00
Хвосты медной флотации	89,00	0,22	1,69	25,00	67,00
Исходная проба	100,00	0,78	2,25	100,00	100,00
Na_2SO_3, pH-10					
Медный концентрат	11,00	5,46	8,59	77,00	42,00
Хвосты медной флотации	89,00	0,20	1,47	23,00	58,00
Исходная проба	100,00	0,78	2,25	100,00	100,00

ных фракций сульфидных минералов (рис. 8) в нейтральной и слабощелочной среде.

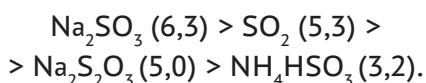
Наибольшая флотация пирита с использованием модификаторов установлена в нейтральной среде ($pH_{исх} -7$). При $pH_{исх} -8$ наблюдается депрессия пирита. По депрессирующему действию на пирит модификаторы располагаются в ряду:



На основании полученных результатов экспериментальных исследований выполнены сравнительные флотационные опыты на пробе руды Учалинского и Узельгинского месторождений (см. табл. 1–4).

Флотационные опыты на пробе медно-цинковой руды Учалинского месторождения (см. табл. 1–4) показали влияние pH , модификаторов и их расходов на основные показатели флотации сульфидов цветных металлов и железа.

Наилучшие показатели селективности с Na_2SO_3 , $Na_2S_2O_3$ и NH_4HSO_3 получены при $pH -8$, сернистый газ (SO_2) наиболее эффективен при $pH 6-7$, что согласуется с результатами флотации мономинерального пирита. Индекс селективности в слабо- и щелочной средах ($pH 8-9$) при использовании модификаторов флотации располагаются в ряду:



Наиболее перспективными с точки зрения селективности процесса флота-

Таблица 2

Результаты флотации пробы медно-цинковой руды с SO_2 при разных величинах pH среды

Results of flotation of copper-zinc ore using SO_2 at different pH values

Продукт	Выход, %	Массовая доля, %		Извлечение, %	
		Cu	Zn	Cu	Zn
SO_2, pH-6					
Медный концентрат	7,00	6,91	5,14	62,00	16,00
Хвосты медной флотации	93,00	0,32	2,03	38,00	84,00
Исходная проба	100,00	0,78	2,25	100,00	100,00
SO_2, pH-7					
Медный концентрат	10,00	5,46	4,50	70,00	20,00
Хвосты медной флотации	90,00	0,26	2,00	30,00	80,00
Исходная проба	100,00	0,78	2,25	100,00	100,00
SO_2, pH-8					
Медный концентрат	15,00	3,95	4,50	76,00	30,00
Хвосты медной флотации	85,00	0,22	1,85	24,00	70,00
Исходная проба	100,00	0,78	2,25	100,00	100,00
SO_2, pH-9					
Медный концентрат	13,00	4,80	9,52	80,00	55,00
Хвосты медной флотации	87,00	0,18	1,16	20,00	45,00
Исходная проба	100,00	0,78	2,25	100,00	100,00

Таблица 3

Результаты флотации пробы медно-цинковой руды с NH_4HSO_3 при разных величинах pH среды

Results of flotation of copper-zinc ore using NH_4HSO_3 at different pH values

Продукт	Выход, %	Массовая доля, %		Извлечение, %	
		Cu	Zn	Cu	Zn
NH_4HSO_3, pH-7					
Медный концентрат	43,00	1,45	1,88	80,00	36,00
Хвосты медной флотации	57,00	0,27	2,53	20,00	64,00
Исходная проба	100,00	0,78	2,25	100,00	100,00
NH_4HSO_3, pH-8					
Медный концентрат	19,00	2,79	2,87	68,00	24,20
Хвосты медной флотации	81,00	0,31	2,11	32,00	75,80
Исходная проба	100,00	0,78	2,25	100,00	100,00
NH_4HSO_3, pH-9					
Медный концентрат	20,00	2,83	5,63	72,56	50,00
Хвосты медной флотации	80,00	0,27	1,41	27,44	50,00
Исходная проба	100,00	0,78	2,25	100,00	100,00
NH_4HSO_3, pH-10					
Медный концентрат	20,50	2,85	5,93	75,00	54,00
Хвосты медной флотации	79,50	0,25	1,30	25,00	46,00
Исходная проба	100,00	0,78	2,25	100,00	100,00

ции при значениях pH 8-9 и расхода модификаторов до 1,0 кг/т являются Na_2SO_3 и SO_2 . Увеличение расхода модификаторов более 1 кг/т приводит к снижению флотируемости сульфидов меди, а при расходах менее 0,5 кг/т ослабевает депрессия сфалерита и пирита.

В табл. 5 приведены сравнительные результаты влияния серосодержащих анионов на технологические показатели флотации пиритной медно-цинковой руды Узельгинского месторождения.

При типовом реагентном режиме флотации с повышением концентрации тиосульфата натрия с 0,3 до 1 г/л технологические показатели флотации руды снижаются в среднем в 2-3 раза. В восстановительной среде (ОВП = -30 мВ) флотация сульфидов меди снижается на 42,65% и заметна активация флота-

ции сфалерита на 27,17% — возможно, по причине повышения концентрации растворимых ионов меди, что указывает на снижение селективности процесса флотации. Индекс селективности флотации сульфидов меди при параметрах флотации $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 = 0,3$ г/л, pH-8,0; ОВП = +120 мВ составляет 3,31 против 1,68 при $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 = 1$ г/л, pH-11,5; ОВП = -30 мВ.

Заключение

Совокупностью выполненных экспериментальных исследований определены устойчивость модификаторов, ионные составы растворов, образуемых модификаторами, в зависимости от продолжительности кондиционирования и величины pH, ОВП среды, влияющие на формирование ионно-молекулярного

Таблица 4

Результаты флотации пробы медно-цинковой руды с $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ при разных величинах pH среды

Results of flotation of copper-zinc ore using $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ at different pH values

Продукт	Выход, %	Массовая доля, %		Извлечение, %	
		Cu	Zn	Cu	Zn
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, pH-7					
Медный концентрат	36,30	1,68	1,55	78,00	25,00
Хвосты медной флотации	63,70	0,27	2,65	22,00	75,00
Исходная проба	100,00	0,78	2,25	100,00	100,00
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, pH-8					
Медный концентрат	10,00	5,46	5,44	70,00	24,19
Хвосты медной флотации	90,00	0,26	1,90	30,00	75,81
Исходная проба	100,00	0,78	2,25	100,00	100,00
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, pH-9					
Медный концентрат	20,00	2,89	5,63	74,00	50,00
Хвосты медной флотации	80,00	0,25	1,41	26,00	50,00
Исходная проба	100,00	0,78	2,25	100,00	100,00
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, pH-10					
Медный концентрат	17,00	3,58	10,32	78,00	78,00
Хвосты медной флотации	83,00	0,21	0,60	22,00	22,00
Исходная проба	100,00	0,78	2,25	100,00	100,00

Таблица 5

Результаты флотации пробы пиритной медно-цинковой руды с $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ при разных величинах pH среды

Results of flotation of pyrite-copper-zinc ore using $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ at different pH values

Продукт	Выход, %	Массовая доля, %		Извлечение, %	
		Cu	Zn	Cu	Zn
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 = 0,3$ г/л, pH-8,0; ОВП = +120 мВ					
Медный концентрат	16,43	11,37	1,87	61,92	27,26
Хвосты медной флотации	83,57	1,37	0,98	38,08	72,74
Исходная проба	100,00	3,02	1,13	100,00	100,00
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 = 1$ г/л, pH-11,5; ОВП = -30 мВ					
Медный концентрат	7,56	7,72	8,32	19,27	54,43
Хвосты медной флотации	92,44	2,65	0,57	80,73	45,57
Исходная проба	100,00	3,03	1,16	100,00	100,00

состава жидкой фазы пульпы и соответственно на флотиремость сульфидных цветных металлов и железа.

Установлено, что при использовании модификаторов флотиремость пирита ниже при $\text{pH}_{\text{исх}} = -8$, в большей степени с $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4^{\text{исх}}$, NH_4HSO_3 , Na_2SO_3 .

При флотации рудного материала показатели селективности выше с Na_2SO_3 , $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ и NH_4HSO_3 при $\text{pH}_{\text{исх}} = -8$, в сравнении с SO_2 . Установлено, что индекс селективности выше с Na_2SO_3 (6,3).

Таким образом, полученные результаты экспериментальных исследований показывают возможность регулирования контрастности флотации сульфидов меди от сфалерита и пирита в слабо- и щелочных средах и могут быть использованы для решения научно-практической задачи — повышения эффективности флотации труднообогатимых сульфидных руд цветных металлов с применением селективных реагентных режимов флотации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чантурия В. А., Шадрюнова И. В. Технология обогащения медных и медно-цинковых руд Урала. — М.: Наука, 2016. — 386 с.
2. Игнаткина В. А., Макавецкас А. Р., Каюмов А. А., Аксенова Д. Д. Анализ причин ухудшения технологических показателей флотации медьсодержащей сульфидной руды при камерной отработке медно-колчеданных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 9. — С. 5–22. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_9_0_5.
3. Каюмов А. А. Повышение эффективности извлечения минералов группы блеклых руд из колчеданных медно-цинковых руд на основе селективных реагентных режимов флотации. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М.: НИТУ «МИСиС», 2020. — 27 с.
4. Can I. B., Özçelik S., Ekmeççi Z. Effects of pyrite texture on flotation performance of copper sulfide ores // Minerals. 2021, no. 11, p. 1218. DOI: 10.3390/min11111218.
5. Molaei N., Hoseinian F. S., Rezai B. A study on the effect of active pyrite on flotation of porphyry copper ores // Physicochemical Problems of Mineral Processing. 2018, vol. 54, no. 3, pp. 922–933. DOI: 10.5277/ppmp1894.
6. Игнатов Д. О., Каюмов А. А., Игнаткина В. А. Селективное разделение мышьяк-содержащих сульфидных минералов // Цветные металлы. — 2018. — № 7. — С. 32–38. DOI: 10.17580/tsm.2018.07.05.
7. Игнаткина В. А., Бочаров В. А., Каюмов А. А., Аксенова М. Флотоактивность пирита при разделении массивных сульфидных руд // Цветные металлы. — 2017. — № 9. — С. 8–14. DOI: 17580/tsm.2017.09.01.
8. Marsden J. O. Technological innovation and sustainable competitive advantage in the copper industry — Real or imaginary? / IMPC 2018, 29th International Mineral Processing Congress. Moscow. 2019, pp. 23–21.
9. Mu Y., Peng Y. Selectively depress copper-activated pyrite in copper flotation at slightly alkaline pH // Mining Metallurgy & Exploration. 2021, vol. 38, pp. 751–762. DOI: 10.1007/s42461-021-00393-z.
10. Štirbanović Z. The effect of degree of liberation on copper recovery from copper-pyrite ore by flotation // Separation Science and Technology. 2020, vol. 55, no. 17, pp. 3260–3273. DOI: 10.1080/01496395.2019.1676260.
11. Чантурия В. А., Вигдергауз В. Е. Электрохимия сульфидов. Теория и практика флотации. — М.: Руда и металлы, 2008. — 272 с.
12. Javadi A. Sulphide Minerals: Surface oxidation and selectivity in complex sulphide ore flotation. Doctoral thesis. 2015. Luleå University of Technology, Sweden. 48 p.
13. Yufan Mua, Yongjun Peng, Lauten R. A. The depression of pyrite in selective flotation by different reagent systems — A literature review // Minerals Engineering. 2016, vol. 96-97, pp. 143–156. DOI: 10.1016/j.mineng.2016.06.018.

14. Moslemi H., Gharabaghi M. A review on electrochemical behavior of pyrite in the froth flotation process // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2017, vol. 47, pp. 1–18. DOI: 10.1016/j.jiec.2016.12.012.

15. Игнаткина В. А., Каюмов А. А., Ергешева Н. Д. Флотоактивность и расчетная реакционная способность сульфидных минералов и золота // *Известия вузов. Цветная металлургия*. – 2022. – Т. 28. – № 4. – С. 4–14. DOI: 10.17073/0021-3438-2022-4-4-14.

16. Öztürk Y., Bıçak Ö., Özdemir E., Ekmekçi Z. Mitigation negative effects of thiosulfate on flotation performance of a Cu-Pb-Zn sulfide ore // *Minerals Engineering*. 2018, vol. 122, pp. 142–147, DOI: 10.1016/j.mineng.2018.03.034.

17. Zhao Cao, Xumeng Chen, Yongjun Peng The role of sodium sulfide in the flotation of pyrite depressed in chalcopyrite flotation // *Minerals Engineering*. 2018, vol. 119, pp. 93–98. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.01.029.

18. Мвеене Л., Субраманиан С. Исследования по обогащению бедной медной руды методами селективной флокуляции и флотации // *Обогащение руд*. – 2019. – № 3. – С. 15–21. DOI: 10.17580/or.2019.03.03.

19. Алтушкин И. А., Бондаренко Н. С., Повираев Ю. А., Король Ю. А. Обогащение медно-цинковых руд месторождения «Весеннее» // *Цветные металлы*. – 2017. – № 3. – С. 19–27. DOI: 10.17580/tsm.2017.03.03.

20. Асончик К. М., Аксенова Г. Я., Максимов И. И., Тасина Т. И. Исследование различных режимов флотации медно-порфировой руды // *Обогащение руд*. – 2017. – № 4. – С. 18–21. DOI: 10.17580/or.2017.04.04.

21. Кольтгоф И. М., Беллчер Р., Стенгер В. А., Матсуяма Дж. Объемный анализ, т. 3. – М.: Госхимиздат, 1961. – С. 350–358.

22. Манахова С. В., Онохина Н. А. Введение в химический анализ неорганических соединений. – Архангельск: САФУ, 2014. – 119 с.

23. Харитонов Ю. Я. Аналитическая химия. Аналитика 2. Количественный анализ. Физико-химические (инструментальные) методы анализа. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2014. – 656 с. **ГЭОТАР**

REFERENCES

1. Chanturiya V. A., Shadrunkova I. V. *Tekhnologiya obogashcheniya mednykh i medno-tsinkovykh rud Urala* [Technology of enrichment of copper and copper-zinc ores of the Urals], Moscow, Nauka, 2016, 386 p.

2. Ignatkina V. A., Makavetskas A.R., Kayumov A. A., Aksenova D. D. Causes of degradation of production data in flotation of copper-bearing sulfide ore extracted from cupriferous pyrite deposit by open stoping. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 9, pp. 5–22. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_9_0_5.

3. Kayumov A. A. *Povyshenie effektivnosti izvlecheniya mineralov gruppy bleklykh rud iz kolchedannykh medno-tsinkovykh rud na osnove selektivnykh reagentnykh rezhimov flotatsii* [Improving the efficiency of extraction of minerals of the group of pale ores from pyrite copper-zinc ores based on selective reagent flotation modes], Candidate's thesis, Moscow, NITU «MISiS», 2020, 27 p.

4. Can I. B., Özçelik S., Ekmekçi Z. Effects of pyrite texture on flotation performance of copper sulfide ores. *Minerals*. 2021, no. 11, p. 1218. DOI: 10.3390/min11111218.

5. Molaei N., Hoseinian F. S., Rezai B. A study on the effect of active pyrite on flotation of porphyry copper ores. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2018, vol. 54, no. 3, pp. 922–933. DOI: 10.5277/ppmp1894.

6. Ignatov D. O., Kayumov A. A., Ignatkina V. A. Selective separation of arsenic-containing sulfide minerals. *Tsvetnye Metally*. 2018, no. 7, pp. 32–38. [In Russ]. DOI: 10.17580/tsm.2018.07.05.

7. Ignatkina V. A., Bocharov V. A., Kayumov A. A., Aksenova M. Flotation activity of pyrite in the separation of massive sulphide ores. *Tsvetnye Metally*. 2017, no. 9, pp. 8–14. [In Russ]. DOI: 17580/tsm.2017.09.01.

8. Marsden J. O. Technological innovation and sustainable competitive advantage in the copper industry – Real or imaginary? *IMPC 2018, 29th International Mineral Processing Congress*. Moscow, 2019, pp. 23–21.

9. Mu Y., Peng Y. Selectively depress copper-activated pyrite in copper flotation at slightly alkaline pH. *Mining Metallurgy & Exploration*. 2021, vol. 38, pp. 751–762. DOI: 10.1007/s42461-021-00393-z.

10. Štirbanović Z. The effect of degree of liberation on copper recovery from copper-pyrite ore by flotation. *Separation Science and Technology*. 2020, vol. 55, no. 17, pp. 3260–3273. DOI: 10.1080/01496395.2019.1676260.

11. Chanturiya V. A., Vigdergauz V. E. *Elektrokhimiya sul'fidov. Teoriya i praktika flotatsii* [Electrochemistry of sulfides. Theory and practice of flotation], Moscow, Ruda i metally, 2008, 272 p.

12. Javadi A. *Sulphide Minerals: Surface oxidation and selectivity in complex sulphide ore flotation*. Doctoral thesis. 2015. Luleå University of Technology, Sweden. 48 p.

13. Yufan Mua, Yongjun Peng, Lauten R. A. The depression of pyrite in selective flotation by different reagent systems – A literature review. *Minerals Engineering*. 2016, vol. 96-97, pp. 143–156. DOI: 10.1016/j.mineng.2016.06.018.

14. Moslemi H., Gharabaghi M. A review on electrochemical behavior of pyrite in the froth flotation process. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2017, vol. 47, pp. 1–18. DOI: 10.1016/j.jiec.2016.12.012.

15. Ignatkina V. A., Kayumov A. A., Yergesheva N. D. Floatability and calculated reactivity of sulfide minerals and gold. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya*. 2022, vol. 28, no. 4, pp. 4–14. [In Russ]. DOI: 10.17073/0021-3438-2022-4-4-14.

16. Öztürk Y., Bıçak Ö., Özdemir E., Ekmekçi Z. Mitigation negative effects of thiosulfate on flotation performance of a Cu-Pb-Zn sulfide ore. *Minerals Engineering*. 2018, vol. 122, pp. 142–147, DOI: 10.1016/j.mineng.2018.03.034.

17. Zhao Cao, Xumeng Chen, Yongjun Peng The role of sodium sulfide in the flotation of pyrite depressed in chalcopyrite flotation. *Minerals Engineering*. 2018, vol. 119, pp. 93–98. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.01.029.

18. Mveene L., Subramanian S. Studies on the enrichment of poor copper ore by selective flocculation and flotation methods. *Obogashchenie Rud*. 2019, no. 3, pp. 15–21. DOI: 10.17580/or.2019.03.03.

19. Altushkin I. A., Bondarenko N. S., Povirae Yu. A., Korol' Yu. A. Enrichment of copper-zinc ores of the Spring deposit. *Tsvetnye Metally*. 2017, no. 3, pp. 19–27. [In Russ]. DOI: 10.17580/tsm.2017.03.03.

20. Asonchik K. M., Aksenova G. Ya., Maksimov I. I., Tasina T. I. Investigation of various modes of flotation of porphyry copper ore. *Obogashchenie Rud*. 2017, no. 4, pp. 18–21. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2017.04.04.

21. Kol'tgof I. M., Bellcher R., Stenger V. A., Matsuyama J. *Ob'emnyy analiz*, t. 3. [Volumetric analysis, vol. 3], Moscow, Goskhimizdat, 1961, pp. 350–358.

22. Manakhova S. V., Onokhina N. A. *Vvedenie v khimicheskiy analiz neorganicheskikh soedineniy* [Introduction to the chemical analysis of inorganic compounds], Arkhangel'sk: SAFU, 2014, 119 p.

23. Kharitonov Yu. Yu. *Analiticheskaya khimiya. Analitika 2. Kolichestvennyy analiz. Fiziko-khimicheskie (instrumental'nye) metody analiza* [Analytical chemistry. Analytics 2. Quantitative analysis. Physico-chemical (instrumental) methods of analysis], Moscow, GEOTAR-Media, 2014, 656 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Бочаров Владимир Алексеевич*¹ – д-р техн. наук,
профессор,

ORCID ID: 0000-0002-8233-9635,

*Игнаткина Владислава Анатольевна*¹ – д-р техн. наук,
профессор, e-mail: woda@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0003-2552-206X,

Абрютин Дмитрий Владимирович – канд. техн. наук,
заместитель генерального директора,

ООО «АДВ-Инжиниринг»,

e-mail: abrutin@mail.ru,

*Каюмов Абдуазиз Абдурашидович*¹ – канд. техн. наук,
ведущий инженер-технолог,

e-mail: maliaby_92@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0003-0502-6595,

*Каюмова (Корж) Виктория Романовна*¹ – аспирант,

e-mail: viktoriya.korz09@gmail.com,

ORCID ID: 0000-0001-7527-1284,

¹ НИТУ «МИСиС».

Для контактов: Каюмов А.А., e-mail: maliaby_92@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*V.A. Bocharov*¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

ORCID ID: 0000-0002-8233-9635,

*V.A. Ignatkina*¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

e-mail: woda@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0003-2552-206X,

D.V. Abrytin, Cand. Sci. (Eng.),

Deputy General Director,

ООО «ADV-Inzhiniring»,

e-mail: abrutin@mail.ru,

*A.A. Kayumov*¹, Cand. Sci. (Eng.),

Leading Engineer-Technologist,

e-mail: maliaby_92@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0003-0502-6595,

*V.R. Kayumova (Korz)*¹, Graduate Student,

e-mail: viktoriya.korz09@gmail.com,

ORCID ID: 0000-0001-7527-1284,

¹ National University of Science and Technology «MISiS»,

119049, Moscow, Russia.

Corresponding author: A.A. Kayumov, e-mail: maliaby_92@mail.ru.

Получена редакцией 20.07.2022; получена после рецензии 26.09.2022; принята к печати 10.11.2022.

Received by the editors 20.07.2022; received after the review 26.09.2022; accepted for printing 10.11.2022.

