

УДК 622.765

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2025-4-5-17>

Научная статья

Research article



Оценка влияния композиции металлосодержащих модификаторов с сернистым натрием на селективность флотационного разделения сульфидов меди и цинка

Хтет Зо У, Чжо Зай Яа, Б.Е. Горячев

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Россия, 119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4, стр. 1

✉ Хтет Зо У (htetzawoo68099@gmail.com)

Аннотация: Разработаны наилучшие селективные реагентные режимы для флотации медно-цинковой колчеданной руды одного из месторождений Урала, основанные на применении композиций металлосодержащих реагентов-модификаторов в сочетании с сернистым натрием. Проанализированы наиболее эффективные условия флотации минералов меди и цинка от пирита в коллективном цикле флотации медно-цинковой руды, а также условия для повышения селективного разделения коллективного медно-цинкового концентрата. Оценено влияние композиций реагентов-модификаторов, вводимых в коллективный цикл флотации, на технологические показатели селективной флотации коллективного концентрата. Приведены результаты фракционного анализа флотируемости минералов меди, цинка и железа с учетом кинетики флотации и распределения этих минералов во флотируемый концентрат по фракциям: труднофлотируемой, среднефлотируемой и легкофлотируемой. Используемые композиции реагентов-модификаторов не только подавляли флотацию пирита, но и обеспечивали эффективное разделение минералов меди и цинка в отдельные концентраты. Установлено, что наиболее эффективное влияние на селективность флотационного разделения минералов меди и цинка оказывает дозирование композиции железного купороса и сульфида натрия в коллективную медно-цинковую флотацию в равных долях (50 и 50 г/т). В результате применения данной композиции реагентов получены медно-пиритный концентрат с содержанием меди 12 % при извлечении меди 74,45 % и цинковый концентрат с содержанием цинка 5 % при извлечении 73,68 % от руды. Анализ кинетики флотации показал, что введение указанной смеси реагентов способствует наилучшей скорости флотации меди, обеспечивая максимальное извлечение меди в пенный (медно-пиритный) продукт на уровне 86,74 %.

Ключевые слова: медно-цинковые руды, извлечение, флотация, сернистый натрий, кинетика флотации, разделение, селективность, модификаторы, сульфиды.

Для цитирования: Хтет Зо У, Чжо Зай Яа, Горячев Б.Е. Оценка влияния композиции металлосодержащих модификаторов с сернистым натрием на селективность флотационного разделения сульфидов меди и цинка. *Известия вузов. Цветная металлургия.* 2025;31(4):5–17. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2025-4-5-17>

Effect of metal-containing modifier compositions with sodium sulfide on the selective flotation of copper and zinc sulfides

Htet Zaw Oo, Kyaw Zay Ya, B.E. Goryachev

National University of Science and Technology “MISIS”

1 Bld, 4 Leninskiy Pros., Moscow 119049, Russia

✉ Htet Zaw Oo (htetzawoo68099@gmail.com)

Abstract: The most efficient selective reagent modes for the flotation of a copper–zinc pyrite ore from one of the Ural deposits have been developed, based on the use of compositions of metal-containing reagent modifiers in combination with sodium sulfide. The study analyzed the most effective conditions for separating copper and zinc minerals from pyrite during the bulk flotation of copper–zinc ore, as well as the conditions for improving the selective separation of the bulk copper–zinc concentrate. The influence of reagent–modifier compositions introduced into the bulk flotation cycle on the process parameters of selective flotation of the bulk concentrate was evaluated. The results of fractional analysis of the floatability of copper, zinc, and iron minerals were presented, taking into account the flotation kinetics and the distribution of these minerals in the floated concentrate by fractions: poorly floatable, moderately floatable, and easily floatable. The reagent–modifier compositions used not only depressed pyrite flotation but also ensured efficient separation of copper and zinc minerals into individual concentrates. It was found that the most effective selectivity in flotation separation of copper and zinc minerals was achieved by introducing a composition of ferrous sulfate and sodium sulfide into the bulk copper–zinc flotation circuit in equal proportions (50 and 50 g/t). As a result, a copper–pyrite concentrate containing 12 wt. % Cu with a copper recovery of 74.45 % and a zinc concentrate containing 5 wt. % Zn with a zinc recovery of 73.68 % from the ore were obtained. Analysis of flotation kinetics showed that the introduction of this reagent mixture contributed to the highest flotation rate of copper, ensuring a maximum copper recovery to the froth (copper–pyrite) product of 86.74 %.

Key words: copper–zinc ores, recovery, flotation, sodium sulfide, flotation kinetics, separation, selectivity, modifiers, sulfides.

For citation: Htet Zaw Oo, Kyaw Zay Ya, Goryachev B.E. Effect of metal-containing modifier compositions with sodium sulfide on the selective flotation of copper and zinc sulfides. *Известия. Non-Ferrous Metallurgy*. 2025;31(4):5–17.

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2025-4-5-17>

Введение

Медно-цинковые руды месторождений Урала в основном представлены колчеданными типами и являются одними из самых сложных объектов для обогащения [1]. Это обусловлено высокой долей пирита в руде (от 85 до 90 мас. %) и тонким неравномерным взаимопрорастанием сульфидных минералов между собой и с породными минералами [2; 3].

Наиболее эффективным технологическим процессом разделения минералов из тонковкрапленных руд цветных металлов, таких как медно-цинковые колчеданные руды, является флотация [4–7]. Для переработки больших объемов труднообогатимого сырья необходимы разработка и внедрение новых методов и технологий [8]. Внедрение селективных режимов с применением реагентов и изменение условий кондиционирования пуль-

пы могут повысить контрастность поверхностных свойств минералов с близкими технологическими характеристиками [9].

В данный момент на обогатительных фабриках наиболее распространена коллективно-селективная схема флотации, при которой из коллективного медно-цинкового концентрата выделяются минералы меди и цинка, с подавлением флотации пирита [10; 11]. Эта технология обеспечивает высококачественное извлечение металлов из тонковкрапленных и труднообогатимых руд с последующим получением концентратов различного назначения, а также существенно повышает селективность их разделения [12; 13].

Несмотря на значительный рост обогатительной отрасли, селективная флотация сульфидных руд цветных металлов, в частности медно-цин-

ковых колчеданных руд, по-прежнему остается актуальной задачей [10]. Она может быть решена посредством совершенствования существующих технологий путем внесения изменений в технологические схемы и оптимизации режимов применения реагентов, а также за счет расширения номенклатуры используемых реагентов [10]. Одним из ключевых подходов к повышению эффективности технологических процессов переработки медно-цинковых руд является совершенствование номенклатуры применяемых реагентов, включая композиции металлосодержащих реагентов-модификаторов [14].

В предыдущих исследованиях [15–17] было продемонстрировано положительное влияние композиций металлосодержащих реагентов-модификаторов на результаты коллективной флотации медно-цинковой руды. Однако их роль в процессе селективной флотации коллективного медно-цин-

кового концентраты оставалась неизученной. Целью данной работы является исследование влияния композиций реагентов-модификаторов с сернистым натрием, вводимых в коллективный цикл флотации, на эффективность селективной флотации этого концентраты.

Материалы и методы исследования

Объекты исследования

Объектом исследования в данной работе были пробы медно-цинковой колчеданной руды одного из месторождений Урала. Среднее содержание меди, цинка и железа в пробах исходной руды составляло $0,65 \pm 0,02$, $1,30 \pm 0,08$ и $38,48 \pm 1,52$ мас. % соответственно [15]. В эксперименте применялись реагенты: бутиловый ксантогенат калия (БКК) в качестве собираителя, сосновое масло как пенообразователь, известь (CaO) для регулирова-

Таблица 1. Рентгенографический фазовый анализ исходной руды (порошка)

Table 1. Quantitative X-ray diffraction (XRD) phase analysis of the raw ore (powder)

Минерал	Теоретическая формула	Доля, мас. %
Пирит	FeS_2	61
Халькопирит	CuFeS_2	3
Сфалерит	ZnS	5
Тетраэдрит	$(\text{Cu},\text{Fe},\text{Zn},\text{Ag})_{24}(\text{Sb},\text{As})_8\text{S}_{26}$	0,5
Кварц	SiO_2	21
Кальцит	$\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$	3
Барит	BaSO_4	2
Хлорит	$(\text{Mg},\text{Fe})_{4,75}\text{Al}_{1,25}(\text{Si}_{2,75}\text{Al}_{+,25}\text{O}_{10})(\text{OH})_8$	2
Иллит	$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10}) \cdot (\text{OH})_2$	1
	Σ	98,5

Таблица 2. Минералогический анализ исходной руды (полированный шлиф)

Table 2. Mineralogical analysis of the raw ore (polished section)

Минерал	Доля минералов в исследуемых пробах, мас. %										Среднее значение	Доверительный интервал
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Пирит	84	75	91	77	92	75	74	73	81	96	81,80	$\pm 5,27$
Кварц	15	20	6	16	5	22	20	23	14,5	2	14,35	$\pm 4,67$
Сфалерит	–	–	–	3	–	–	–	2,5	–	–	2,75	$\pm 0,72$
Халькопирит	–	–	1,5	0,5	1,5	1,5	3	1	2	1	1,50	$\pm 0,57$
Блеклая руда	–	–	–	–	1	–	1,5	–	1,5	0,5	1,13	$\pm 0,40$
Карбонат	–	3	1	2	–	–	1,5	–	1	0,5	1,50	$\pm 0,63$
Прочие	1	2	0,5	1,5	0,5	1,5	–	0,5	–	–	1,07	$\pm 0,44$

ния среды, а также реагенты-модификаторы: железный купорос ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$), медный купорос ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$), цинковый купорос ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$) и сернистый натрий ($Na_2S \cdot 9H_2O$).

Рентгенографический количественный фазовый анализ и минералогический анализ пробы исходной руды выполнены с использованием рентгеновского дифрактометра «Tongda TD-3700» и оптического микроскопа «Olympus BX 51». Результаты этих анализов представлены в табл. 1 и 2.

Методика проведения коллективной флотации медно-цинковой руды

Рудоподготовка проводилась следующим образом: исходная руда дробилась в щековой дробилке (ДШ 80×150) до крупности 3 мм. Из полученного рудного материала после его усреднения и сокращения отбирались отдельные пробы массой 1 кг. Они измельчались в шаровой мельнице (МШЛ-7) до крупности 80 % класса –0,074 мм, после чего измельченный продукт направлялся на процесс коллективной флотации.

Для исследования флотационные опыты проводились в механических машинах (МЕХАНОБР

и ФЛ 137) с объемом камер 0,5 и 3,0 л. В лабораторных условиях выполнены флотационные эксперименты по технологической схеме, которая включала флотации I (медная головка) и II (медно-цинковая флотация) [15]. Схема проведения коллективной флотации медно-цинковой руды и получения коллективного медно-цинкового концентратра представлена на рис. 1.

Во флотации I применялись только реагенты сорбателя и пенообразователя, после чего проводилась флотация на 2 мин. Хвосты флотации I использовались в качестве питания для флотации II, в которой дозировались известь, реагенты-модификаторы, бутиловый ксантофенат калия и сосновое масло [15]. Общий расход реагентов-модификаторов во всех опытах составлял 100 г/т. Далее проводилась флотация II в течение 8 мин. Концентраты флотации I и II объединялись в коллективный медно-цинковый концентрат.

Методика проведения селективной флотации коллективного концентратра

Процесс селективной флотации коллективного медно-цинкового концентратра включает следующие этапы: десорбцию с поверхности сульфидных минералов сорбателя в среде сернистого натрия,

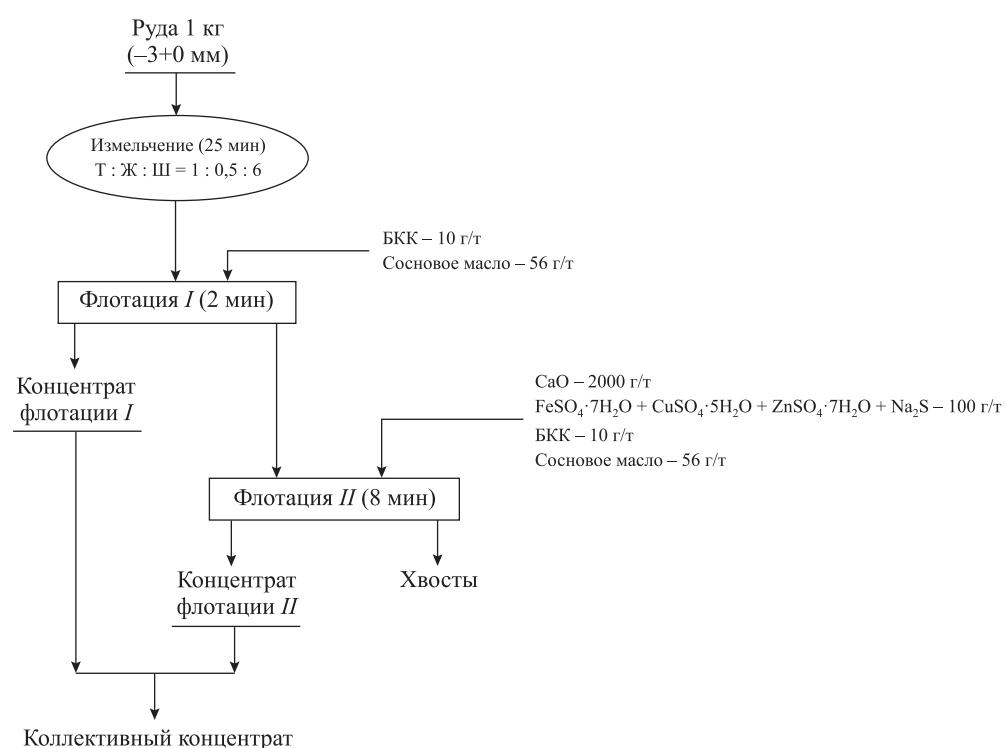


Рис. 1. Схема получения коллективного медно-цинкового концентратра

Fig. 1. Flowsheet for producing the bulk copper-zinc concentrate



Рис. 2. Схема селекции коллективного медно-цинкового концентрата

Fig. 2. Flowsheet of the selective flotation of the bulk copper–zinc concentrate

обеспечивающую глубокую депрессию сфалерита; сгущение и отмывку концентрата от избыточной щелочности; доизмельчение грубого коллективного медно-цинкового концентрата до крупности 92–95 % класса –0,044 мм; основную медно-пиритную флотацию [18]. Схема селекции коллективного медно-цинкового концентрата представлена на рис. 2.

По схеме селективной флотации (рис. 2) полученный коллективный концентрат подвергался десорбции с использованием сернистого натрия (2000 г/т) и активированного угля (300 г/т). После десорбции осуществлялось сгущение пульпы до 60 %-ного содержания твердых частиц с добавлением сульфида натрия (500 г/т) и доизмельчение до 95 % класса –0,044 мм с введением извести (800 г/т) [19]. Следующим этапом являлось направление доизмельченного продукта на основную медно-пиритную флотацию.

На практике селекция минералов меди и цинка чаще всего осуществляется по схеме, основанной на подавлении сфалерита [20–22]. В процессе основной медно-пиритной флотации депрессия сфалерита достигается за счет использования сернистого натрия (300 г/т) и цинкового купороса (4000 г/т). Данная операция проводилась в щелочной среде, обеспеченной добавлением извести 350 г/т, что поддерживало значение pH в диапазоне 8,5–9,0. По окончании флотационных опытов продукты обогащения высушивались и массовые

дели меди, цинка и железа анализировались на рентгенофлуоресцентном спектрометре «ElvaX».

Результаты исследований и их обсуждение

Влияние композиций реагентов-модификаторов на эффективность селективной флотации коллективного концентрата

Результаты селективной флотации коллективного медно-цинкового концентрата при дозировании композиций реагентов-модификаторов во флотацию II представлены на рис. 3 и 4.

Исходя из данных рис. 3 можно отметить, что применение композиций изучаемых модификаторов во флотации II оказывает значительное влияние на технологические показатели селективной флотации коллективного концентрата. Так, композиции железного и медного купоросов (0,5FeSO₄ + 0,5CuSO₄), а также железного купороса с сернистым натрием (0,5FeSO₄ + 0,5Na₂S) дали наилучшие результаты по извлечению меди в концентрат (рис. 3, a). В первом случае медно-пиритный концентрат содержал 13 % меди при ее извлечении 69,87 %, а во втором – 12 % меди при извлечении 75,45 %. В сравнении с нулевым опытом без использования модификаторов (при котором содержание меди составило 11,32 % при извлече-

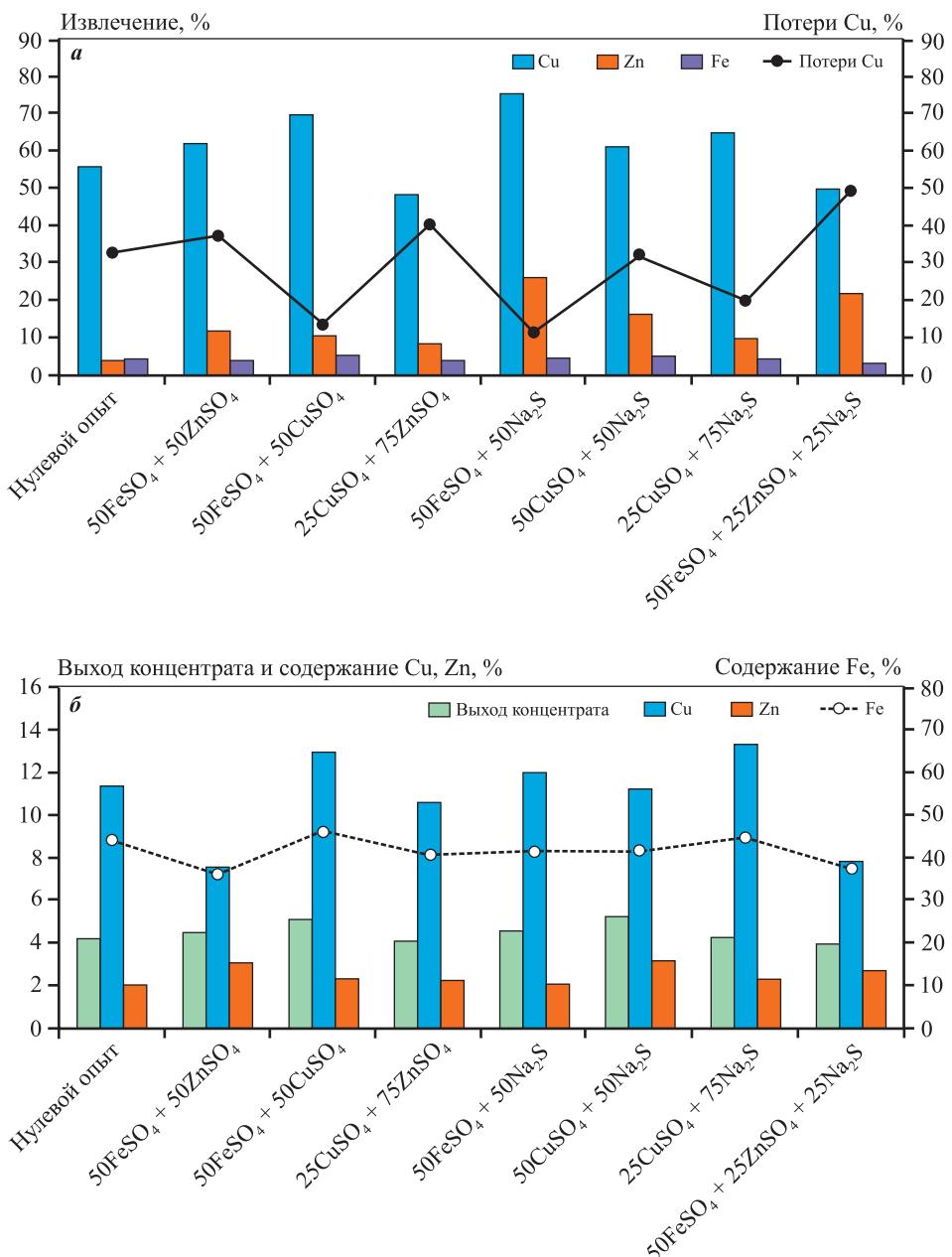


Рис. 3. Извлечение меди, цинка и железа в медно-пиритный концентрат и потери меди с камерным продуктом (а), а также выход концентрата и содержание меди, цинка и железа в нем (б) при расходе композиций модификаторов во флотацию II

Fig. 3. Recovery of copper, zinc, and iron into the copper–pyrite concentrate and copper losses with the scavenger product (а), as well as the concentrate yield and copper, zinc, and iron contents (б) depending on the reagent–modifier compositions introduced into Flotation II

нии 55,72 %) применение смесей указанных модификаторов позволило достичь прироста извлечения меди на 14,15 и 19,73 % соответственно.

Следует отметить, что в случае смеси $0,5\text{FeSO}_4 + 0,5\text{Na}_2\text{S}$ потеря меди с камерным продуктом характеризуется минимальным уровнем извлечения, составившим 11,54 %. Несмотря на это медно-пиритный концентрат с наибольшим содержанием

меди (13,32 %) достигается при введении во флотацию II смеси реагентов $0,25\text{CuSO}_4 + 0,75\text{Na}_2\text{S}$, при этом содержание цинка в нем сохраняется на уровне 2,29 % (рис. 3, б).

Как показано на рис. 4, в данном случае также происходит повышение селективного разделения меди и цинка в цинковый (камерный) концентрат. Установлено, что дозирование во флотацию II сме-

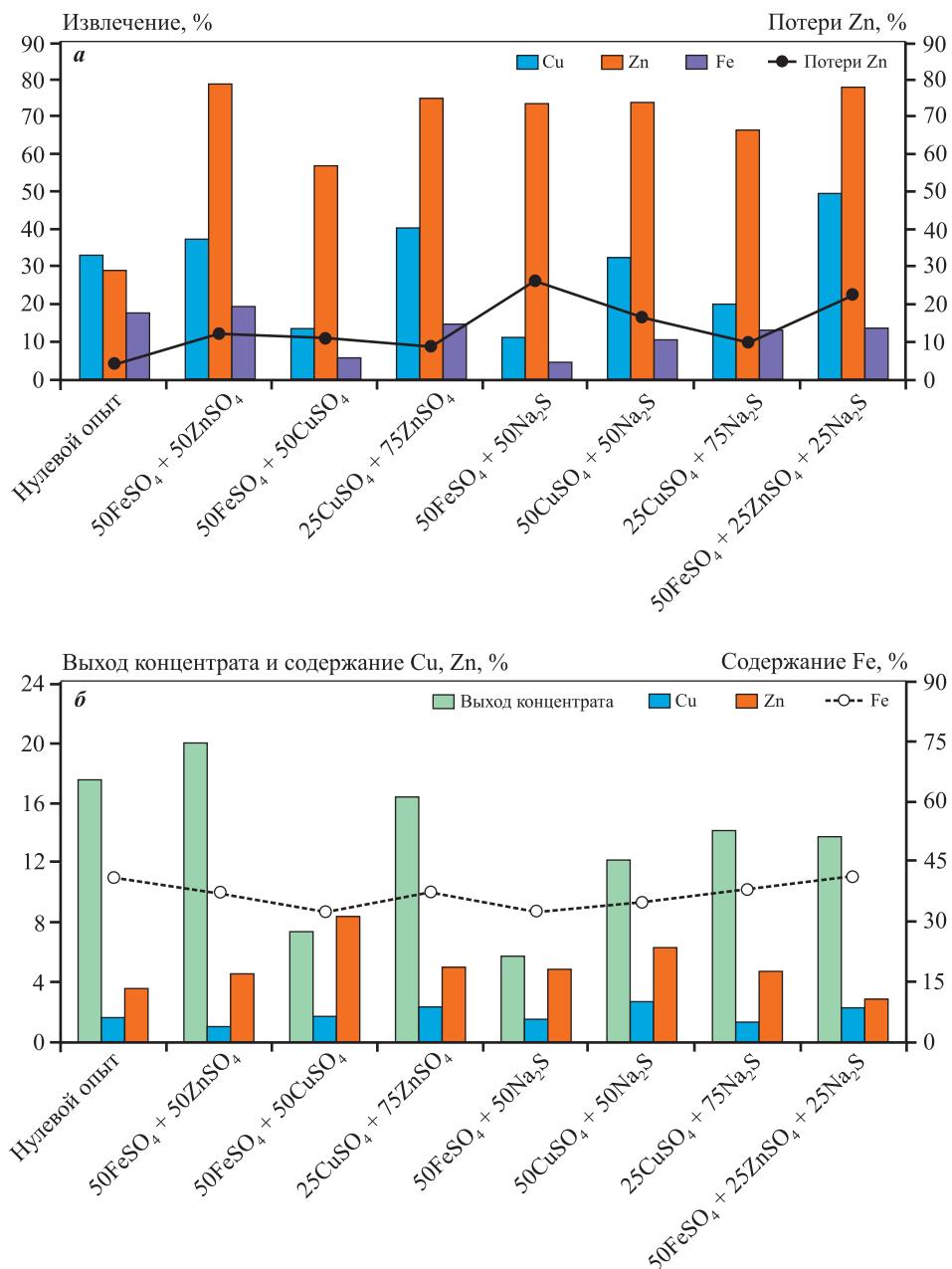


Рис. 4. Извлечение меди, цинка и железа в цинковый концентрат и потери цинка с пенным продуктом (а), а также выход концентрата и содержание меди, цинка и железа в нем (б) при расходе композиций модификаторов во флотацию II

Fig. 4. Recovery of copper, zinc, and iron into the zinc concentrate and zinc losses with the froth product (a), as well as the concentrate yield and copper, zinc, and iron contents (b) depending on the reagent-modifier compositions introduced into Flotation II

си железного и цинкового купоросов ($0,5\text{FeSO}_4 + 0,5\text{ZnSO}_4$), а также железного купороса, цинкового купороса и сернистого натрия ($0,5\text{FeSO}_4 + 0,25\text{ZnSO}_4 + 0,25\text{Na}_2\text{S}$) обеспечивает наивысший уровень извлечения цинка в концентрат (рис. 4, а): в первом случае — 78,86 %, а во втором — 77,93 %. Это позволило достичь прироста извлечения на 49,67 и 48,71 % соответственно по сравнению с ну-

левым режимом без применения модификаторов (29,19 %).

Примечательно, что при использовании смеси железного и медного купоросов ($0,5\text{FeSO}_4 + 0,5\text{CuSO}_4$) качество полученного концентрата по содержанию цинка оказалось наибольшим (рис. 4, б): доля цинка в концентрате составила 8,3 %, при этом количество меди оставалось на

уровне 1,72 %. Этот факт позволяет повысить содержание цинка в получаемом цинковом концентрате на 4,83 % по сравнению с нулевым опытом без применения модификаторов (3,47 %).

Кинетика селективной флотации коллективного концентрата и фракционный анализ флотируемости минералов меди, цинка и железа

Методика изучения кинетики селективной флотации коллективного концентрата предусматривала фракционный съем пенного продукта через интервалы времени флотации: 0,21 (3 гребка), 0,43 (6 гребков), 0,64 (9 гребков), 1, 2 и 5 мин. При исследовании кинетики селективной флотации коллективного концентрата проводился анализ распределения веществ по фракциям, которые отличаются по флотируемости указанных минералов в пенный продукт основной медно-пиритной флотации. С использованием программы SPECTR, разработанной проф. Д.В. Шехиревым, была выполнена оценка спектра флотируемости минералов меди и цинка в концентрат [15; 23; 24].

Фракционный анализ селективной флотации включает разделение флотируемого вещества на 6 различных фракций, основываясь на их способности к флотируемости. Каждая из фракций характеризуется определенным диапазоном скоростей флотации, а ее кинетические характеристики опи-

сяются уравнением, предложенным К.Ф. Бело-глазовым. Для каждой фракции устанавливаются соответствующие константы скорости флотации, мин^{-1} : для первой фракции $0 < K < 0,0001$, второй — $0,0001 < K < 0,001$, третьей — $0,001 < K < 0,01$, четвертой — $0,1 < K < 1$, пятой — $1 < K < 10$, шестой — $10 < K < 100$ [15; 25–28].

На рис. 5 приведены результаты по кинетике флотации меди в медно-пиритный продукт при дозировании композиций реагентов-модификаторов во флотацию II.

Из рис. 5, а видно, что введение композиций реагентов-модификаторов во флотацию II привело к значительному увеличению скорости флотации меди по сравнению с нулевым опытом, проведенным без их применения. Наибольшую скорость флотации меди продемонстрировали смеси реагентов, содержащие сочетания железного и медного купоросов, а также железного купороса с сернистым натрием. Уже на ранних стадиях флотации (0,21 мин) извлечение меди в этих вариантах достигало 32,39–32,98 %, что более чем в 7 раз превышает показатель контрольного опыта (4,3 %). При увеличении времени флотации до 2 мин извлечение меди достигало 80,46 % в присутствии реагентов $0,5\text{FeSO}_4 + 0,5\text{CuSO}_4$ и $0,5\text{FeSO}_4 + 0,5\text{Na}_2\text{S}$, тогда как в нулевом опыте этот показатель составил лишь 22,98 %. Максимальное извлечение меди в пенный продукт (86,74 %) было зафиксировано при использовании $0,5\text{FeSO}_4 + 0,5\text{Na}_2\text{S}$ при $\tau = 5$ мин.

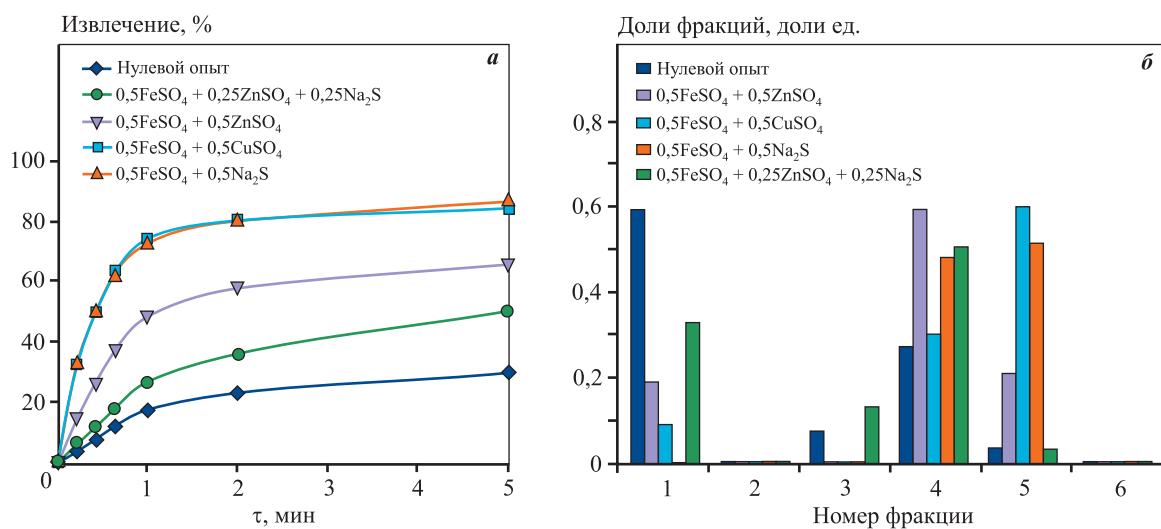


Рис. 5. Кинетика флотации меди в медно-пиритный продукт (а) и ее распределение по фракциям (б) при дозировании композиций реагентов-модификаторов во флотацию II

Fig. 5. Kinetics of copper flotation into the copper-pyrite product (a) and its distribution by fractions (b) upon addition of reagent-modifier compositions into Flotation II

Результаты фракционного анализа (рис. 5, б) показали, что минералы меди сосредоточены в 1-й (труднофлотируемой), 3-й и 4-й (среднефлотируемых) и 5-й (легкофлотируемой) фракциях. В контролльном опыте доля труднофлотируемых фракций составляет 0,61, среднефлотируемых — 0,35, легкофлотируемых — 0,04 отн. ед. Наибольший эффект на флотируемость минералов меди оказывает применение композиции, состоящей из железного и медного купоросов, а также железного купороса и сернистого натрия в равных долях. В первом случае ($0,5\text{FeSO}_4 + 0,5\text{CuSO}_4$) доля труднофлотируемых фракций снизилась до 0,098, среднефлотируемых — составила 0,301, а легкофлотируемых — увеличилась до 0,601 отн. ед. Во втором случае ($0,5\text{FeSO}_4 + 0,5\text{Na}_2\text{S}$) доля труднофлотируемых фракций уменьшилась до 0,009, среднефлотируемых — повысилась до 0,481, а легкофлотируемых — возросла до 0,51 отн. ед. При этом извлечение меди в медно-пиритный концентрат достигло максимального значения.

На рис. 6 приведены результаты по кинетике флотации цинка в медно-пиритный продукт при дозировании композиций реагентов-модификаторов во флотацию II.

Анализ данных рис. 6, а показывает, что добавление композиций реагентов-модификаторов во флотацию II привело к незначительному росту скорости флотации цинка по сравнению с нулевым опытом. Так, применение смеси реагентов $0,5\text{FeSO}_4 + 0,5\text{CuSO}_4$ и $0,5\text{FeSO}_4 + 0,5\text{Na}_2\text{S}$ приводит к наибольшей скорости флотации цинка, достигая извлечения в пенный продукт соответственно 29,98 и 26,32 % за 5 мин, что превышает

значение контрольного опыта (12,59 %). Из всех вариантов реагентов наименьшее влияние на скорость флотации цинка оказывает композиция $0,5\text{FeSO}_4 + 0,5\text{ZnSO}_4$, обеспечивая всего 15,46 % извлечения цинка. Таким образом, несмотря на подавление флотации сфалерита в известковой среде при использовании сернистого натрия и цинкового купороса, рассматриваемые смеси реагентов-модификаторов слегка ускоряют флотацию цинка.

Из анализа данных рис. 6, б видно, что минералы цинка сосредоточены в 1-й и 2-й (труднофлотируемых), в 3-й и 4-й (среднефлотируемых), а также 5-й (легкофлотируемой) фракциях. В нулевом опыте без применения модификаторов доля труднофлотируемых фракций составляет 0,742, среднефлотируемых — 0,257, а легкофлотируемых — 0,001 отн. ед. В случае использования смеси $0,5\text{FeSO}_4 + 0,5\text{CuSO}_4$ доля легкофлотируемой фракции составляет всего 0,012 отн. ед. Добавление смесей $0,5\text{FeSO}_4 + 0,5\text{Na}_2\text{S}$ и $0,5\text{FeSO}_4 + 0,25\text{ZnSO}_4 + 0,25\text{Na}_2\text{S}$ во флотацию II приводит к значительному сокращению доли труднофлотируемых фракций до 0,42 и 0,38 отн. ед. соответственно. При этом доля среднефлотируемых фракций достигает 0,58 и 0,62 отн. ед., а легкофлотируемые фракции полностью отсутствуют. Именно этим объясняется влияние данных смесей реагентов на труднофлотируемые фракции минералов цинка в медно-пиритный концентрат.

На рис. 7 приведены результаты по кинетике флотации железа в медно-пиритный продукт при дозировании композиций реагентов-модификаторов во флотацию II.

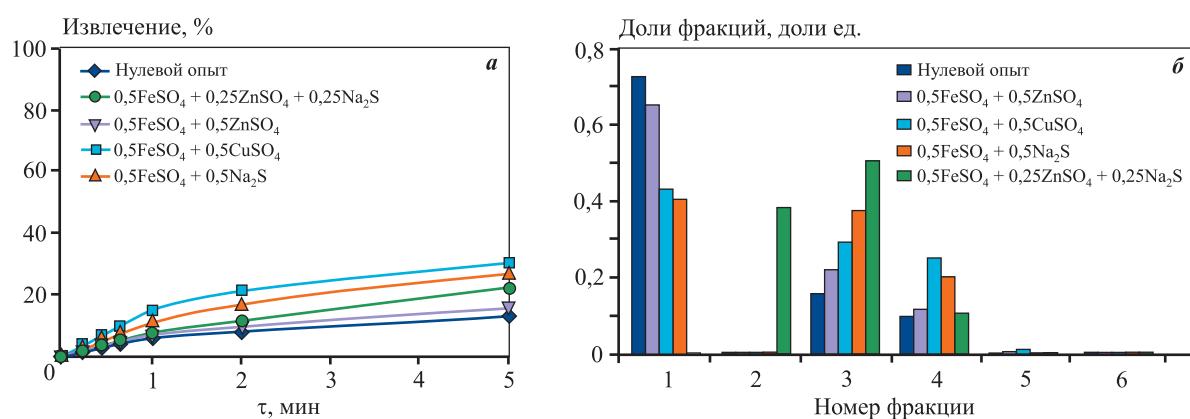


Рис. 6. Кинетика флотации цинка в медно-пиритный продукт (а) и его распределение по фракциям (б) при дозировании композиций реагентов-модификаторов во флотацию II

Fig. 6. Kinetics of zinc flotation into the copper-pyrite product (a) and its distribution by fractions (b) upon addition of reagent-modifier compositions into Flotation II

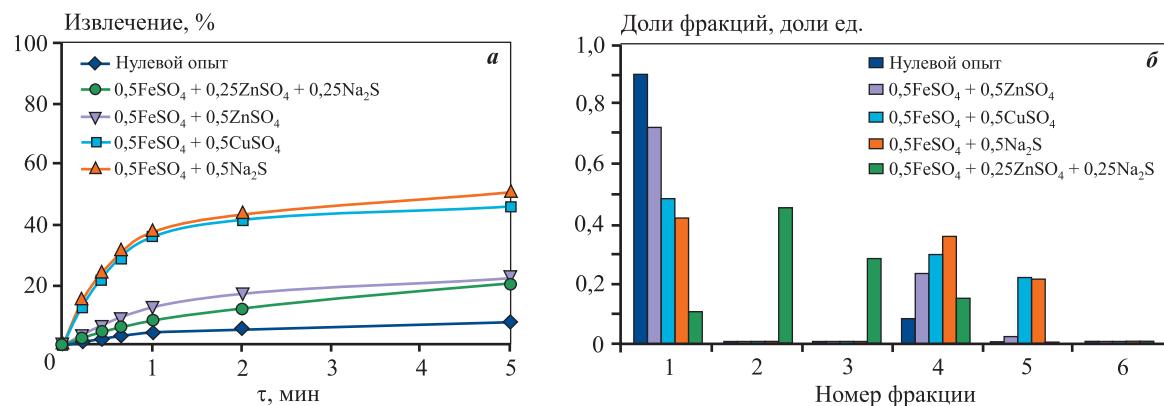


Рис. 7. Кинетика флотации железа в медно-пиритный продукт (а) и его распределение по фракциям (б) при добавлении композиций реагентов-модификаторов во флотацию II

Fig. 7. Kinetics of iron flotation into the copper-pyrite product (a) and its distribution by fractions (b) when upon addition of reagent-modifier compositions into Flotation II

Кинетические кривые флотации железа (рис. 7, а) показывают значительное ускорение процесса при добавлении композиций модификаторов во флотацию II по сравнению с контрольным опытом без их применения. Наибольшую скорость флотации железа обеспечивает композиция $0,5\text{FeSO}_4 + 0,5\text{Na}_2\text{S}$ — 50,88 % за 5 мин флотации. Аналогичная тенденция наблюдается при использовании смеси $0,5\text{FeSO}_4 + 0,5\text{CuSO}_4$, при этом извлечение железа достигает 46,06 % за то же время. Минимальный прирост скорости флотации железа отмечен при введении во флотацию II смесей $0,5\text{FeSO}_4 + 0,5\text{ZnSO}_4$ и $0,5\text{FeSO}_4 + 0,25\text{ZnSO}_4 + 0,25\text{Na}_2\text{S}$.

Их данных, представленных на рис. 7, б, видно, что во всех вариантах эксперимента наблюдается высокая доля труднофлотируемой фракции, особенно в нулевом опыте (0,912 отн. ед.). Однако при добавлении смесей $0,5\text{FeSO}_4 + 0,5\text{Na}_2\text{S}$ и $0,5\text{FeSO}_4 + 0,5\text{CuSO}_4$ ее доля значительно снижается до 0,428 и 0,48 отн. ед. соответственно. В то же время доля легкофлотируемой фракции остается наибольшей, достигая 0,221 и 0,211 отн. ед. Наибольший переход минералов железа в среднефлотируемые фракции (3 и 4) отмечается при использовании композиции $0,5\text{FeSO}_4 + 0,5\text{Na}_2\text{S}$, тогда как при введении $0,5\text{FeSO}_4 + 0,5\text{ZnSO}_4$ возрастает доля этих фракций, но сохраняется высокая доля труднофлотируемых.

Таким образом, анализ кинетики селективной флотации показал, что введение композиций реагентов-модификаторов во флотацию II позволяет оценить флотируемость минералов меди, цинка и железа в пенный (медно-пиритный) продукт, что критично для повышения селективности про-

цесса. При этом минералы меди преимущественно представлены средне- и легкофлотируемыми фракциями, сфалерит — трудно- и среднефлотируемыми, а пирит — трудно-, средне- и частично легкофлотируемыми фракциями.

Выходы

1. Проведена разработка селективного реагентного режима для коллективно-селективной флотации медно-цинковой колчеданной руды одного из месторождений Урала на основе применения композиций металлосодержащих реагентов-модификаторов с сернистым натрием в коллективном цикле флотации.

2. При анализе результатов флотации медно-цинковой колчеданной руды было определено оптимальное сочетание реагентов-модификаторов — железного, медного и цинкового купоросов с сернистым натрием, которое не только снизило извлечение пирита в коллективный концентрат, но и обеспечило повышение селективности разделения минералов меди и цинка в отдельные концентраты.

3. На основе проведенных флотационных исследований установлено, что среди исследуемых составов реагентов-модификаторов сочетание железного купороса и сернистого натрия в равном соотношении ($0,5\text{FeSO}_4 + 0,5\text{Na}_2\text{S}$) значительно повышает селективность разделения медных и цинковых минералов, что способствует увеличению извлечения меди в пенный (медно-пиритный) продукт при минимальных потерях в камерном (цинковом) продукте.

4. В результате предложенного реагентного состава был получен медно-пиритный концентрат с содержанием меди 12 % при ее извлечении 75,45 % от руды, а также цинковый концентрат с содержанием цинка 4,76 % при извлечении 73,68 %. Смесь реагентов (0,5FeSO₄ + 0,5CuSO₄) также показала положительные результаты селективной флотации, однако извлечение меди в этом случае оставалось ниже, чем при использовании вышеуказанной смеси реагентов.

5. Анализ кинетики флотации показал, что введение смеси железного купороса и сернистого натрия (0,5FeSO₄ + 0,5Na₂S) во флотацию II оказывает значительное влияние на скорость флотации меди, обеспечивая максимальное извлечение меди — 86,74 % — в пенный продукт. При этом доля труднофлотируемых фракций снизилась до 0,009, среднефлотируемых — увеличилась до 0,481, а легкофлотируемых — возросла до 0,51 отн. ед. Сфалерит практически отсутствует в легкофлотируемых фракциях при применении данной композиции модификаторов.

6. Проведенные исследования влияния композиций реагентов-модификаторов с сернистым натрием, используемых в коллективном цикле флотации медно-цинковых руд, на селективность разделения сульфидов меди и цинка позволяют сделать вывод о целесообразности применения смеси железного купороса и сернистого натрия в равных дозах (по 50 г/т) в аналогичных процессах флотации на обогатительных фабриках, обрабатывающих медно-цинковые колчеданные руды того же месторождения.

Список литературы/References

- Чантурия В.А., Шадрунова И.В. Технология обогащения медных и медно-цинковых руд Урала. М.: Наука, 2016, 386 с.
- Kyaw Z.Y., Tiagalieva Z.A., Htet Z.O., Phyto K.K. Improvement of reagent flotation modes of sphalerite and pyrite from deposits of copper-zinc pyrite, polymetallic copper-zinc pyrite and polymetallic ores. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. XXI Conference of PhD Students and Young Scientists (CPSYS 2021)* (Wroclaw, Poland, 23–25 June 2021). 2021;942(1):1–8. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/942/1/012004>
- Herrera-Urbina R., Hanson J.S., Harris G.H., Fuertenau D.W. Principles and practice of sulphide mineral flotation. In: P.M.J. Gray, G.J. Bowyer, J.F. Castle, D.J. Vaughan, N.A. Warner (Eds.). *Sulphide deposits — their origin and processing*. Dordrecht: Springer, 1990. P. 87–101. https://doi.org/10.1007/978-94-009-0809-3_6
- Ndoro T.O., Witika L.K. A review of the flotation of copper minerals. *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research (IJSBAR)*. 2017;34(2):145–165. <https://www.gssrr.org/index.php/JournalOfBasicAndApplied/article/view/7590>
- 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;145(1-2): 97–110. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cis.2008.09.001>
- Yang B., Tong X., Lan Z., Cui Y., Xie X. Influence of the interaction between sphalerite and pyrite on the copper activation of sphalerite. *Minerals*. 2018;8(1):16. <http://dx.doi.org/10.3390/min8010016>
- Бочаров В.А., Рыскин М.Я., Пospelov Н.Д. Развитие технологии переработки медно-цинковых руд Урала. *Цветные металлы*. 1979;(10):105–107. <https://doi.org/10.17580/tsm.2018.04.03>
- Bocharov V.A., Ryskin M.Ya., Pospelov N.D. Development of technology for processing copper-zinc ores of the Urals. *Tsvetnye Metally*. 1979;(10):105–107. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2018.04.03>
- Bocharov V., Ignatkina V., Kayumov A., Viduetsky M., Maltsev V. Complex processing of refractory pyrite copper, copper-zinc and polymetallic ores on the basis of flotation and combined technologies. *Progress in Materials Science and Engineering*. 2018;(12):89–96. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-75340-9_12
- Мамонов С.В., Дресвянкина Т.П., Зиятдинов С.В., Ершов А.А. Технологические решения переработки медных и медно-цинковых руд колчеданного месторождения Урала. *Глобус: геология и бизнес*. 2020;(3):140–144. <https://www.vnedra.ru/globus/zhurnal-globus-62/>
- Мамонов S.V., Dresvyankina T.P., Ziyatdinov S.V., Ershov A.A. Technological solutions for processing copper and copper-zinc ores of the pyrite deposit of the Urals. *Globus: geology and business*. 2020;(3):140–144. (In Russ.). <https://www.vnedra.ru/globus/zhurnal-globus-62/>
- Заварухина Е.А., Орехова Н.Н. Влияние дополнительного собирателя на селективность флотационного разделения сульфидов меди и цинка. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2017;(3):305–311. <https://giab-online.ru/catalog/11943>
- Zavarukhina E.A., Orekhova N.N. Effects of additional collecting agent on selectivity of flotation of copper and zinc sulfide. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten*. 2017;(3):305–311. (In Russ.). <https://giab-online.ru/catalog/11943>

11. Zhao Cao, Xumeng Chen, Yongjun Peng. The role of sodium sulfide in the flotation of pyrite depressed in chalcopyrite flotation. *Minerals Engineering*. 2018;119: 93–98. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2018.01.029>
12. Yufan Mu, Yongjun Peng, Lauten R.A. The depression of pyrite in selective flotation by different reagent systems — A literature review. *Minerals Engineering*. 2016;(96): 143–156. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2016.06.018>
13. Aikawa K., Ito M., Orii N., Jeon S., Park I., Haga K., Kamiya T., Takahashi T., Sunada K., Sakakibara T., Ono T., Magwaneng R.S., Hiroyoshi N. Flotation of copper ores with high Cu/Zn ratio: Effects of pyrite on Cu/Zn separation and an efficient method to enhance sphalerite depression. *Minerals*. 2022;12(9):1103. <http://dx.doi.org/10.3390/min12091103>
14. Горячев Б.Е., Наинг Лин У, Николаев А.А., Полякова Ю.Н. Особенности влияния катионов меди, цинка и железа на флотируемость пирита одного из медно-цинковых месторождений Урала. *Цветные металлы*. 2015;(1):12–18. <https://www.rudmet.ru/journal/1381/article/23748/>
Goryachev B.E., Naing Lin Oo, Nikolaev A.A., Polyakova Yu.N. Features of the influence of copper, zinc, and iron cations on the flotation capacity of pyrite from one of the copper-zinc deposits in the Urals. *Tsvetnye Metally*. 2015;(1):12–18. (In Russ.). <https://www.rudmet.ru/journal/1381/article/23748/>
15. Хтет Зо У, Чжо Зай Яа, Горячев Б.Е. Действие композиций из железного, цинкового купоросов и сернистого натрия на флотацию медно-цинковых колчеданных руд. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(12):139–151. https://giab-online.ru/files/Data/2023/12/12_2023_139-151.pdf
Htet Zaw Oo, Kyaw Zay Ya, Goryachev B.E. Effect of iron, zinc sulfate and sodium sulfide compositions on flotation of copper-zinc pyrite ores. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten*. 2023;(12):139–151. (In Russ.). https://giab-online.ru/files/Data/2023/12/12_2023_139-151.pdf
16. Хтет Зо У, Чжо Зай Яа, Горячев Б.Е. Роль симплексного планирования эксперимента в совершенствовании прогнозирования и оптимизации составов многокомпонентных систем реагентов-модификаторов при флотации медно-цинковых руд. *Проблемы недропользования*. 2024;(3):87–98. <https://trud.igduran.ru/index.php/psu/article/view/642>
Htet Zaw Oo, Kyaw Zay Ya, Goryachev B.E. Role of simplex experimental planning in enhancing the prediction and optimization of multicomponent system compositions of reagent-modifiers in the flotation of copper-zinc ores. *Problems of subsurface use*. 2024;(3):87–98. (In Russ.). <https://trud.igduran.ru/index.php/psu/article/view/642>
17. Хтет Зо У, Чжо Зай Яа, Горячев Б.Е. Моделирование и оптимизация составов трехкомпонентных смесей модификаторов методом симплексного планирования для анализа их влияния на флотацию медно-цинковых колчеданных руд. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2024;(8):141–152. https://giab-online.ru/files/Data/2024/8/08_2024_141-152.pdf
Htet Zaw Oo, Kyaw Zay Ya, Goryachev B. E. Modeling and optimization of compositions of three-component modifier mixtures by simplex planning method to analyze their effect on the flotation of copper-zinc pyrite ores. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten*. 2024;(8):141–152. (In Russ.). https://giab-online.ru/files/Data/2024/8/08_2024_141-152.pdf
18. Бочаров В.А., Агафонова Г.С., Херсонская И.И., Лапшина Г.А., Херсонский М.И., Касьянова Е.Ф., Серебрянников Б.Л., Иванов Н.Ф., Морозов Б.А., Карбовская А.В. Способ флотационного разделения сульфидных медно-цинково-пиритных концентратов, содержащих активированные катионами меди и кальция сульфиды цинка: Патент 2054971 (РФ). 1996. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38031592>
19. Кокорин А.М., Лучков Н.В., Смирнов А.О. Способ селективного выделения медных минералов в концентраты при обогащении медно-цинковых пиритосодержащих руд: Патент 242570 (РФ). 2011. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37475002>
20. Зимбовский И.Г. Современные реагенты-собиратели для флотации медно-цинковых сульфидных руд. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2013;(5):117–122. <https://giab-online.ru/catalog/11943>
Zimbovsky I.G. Modern reagents-collectors for flotation of copper-zinc sulphide ores. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten*. 2013;(5):117–122. (In Russ.). <https://giab-online.ru/catalog/11943>
21. Мамонов С.В., Волкова С.В., Чинова Н.Б., Хисамова А.С., Горайчук П.К. Совершенствование технологии обогащения медно-цинковой руды колчеданного месторождения Уральского типа. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2023;(3):86–96. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2023-3-86-96>
Mamonov S.V., Volkova S.V., Chinova N.B., Khisamova A.S., Goraichuk P.K. Improving the technology of enrichment of copper-zinc ore from the pyrite deposit of the Ural type. *Minerals and Mining Engineering*. 2023;(3):86–96. (In Russ.). <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2023-3-86-96>
22. Зимин А.В., Арутюнян М.А., Калинин Е.П., Соловьева Л.М., Немчинова Л.А. Классификация технологических схем флотационного обогащения колчеданного медно-цинкового руды. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2023;(3):86–96. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2023-3-86-96>

- чеданных медных и медно-цинковых руд. *Горный журнал*. 2012;(11):28–33.
<https://www.rudmet.ru/journal/964/article/15148/>
- Zimin A.V., Arustamyan M.A., Kalinin E.P., Solov'eva L.M., Nemchinova L.A. Classification of technological schemes for flotation enrichment of pyrite copper and copper-zinc ores. *Mining Journal*. 2012;(11):28–33. (In Russ.).
<https://www.rudmet.ru/journal/964/article/15148/>
23. Шехирев Д.В. Методика расчета распределения материала по флотируемости. *Обогащение руд*. 2022;(4):27–34. <https://doi.org/10.17580/or.2022.04.05>
Shekhirev D.V. Method for calculating material distribution by floatability. *Obogashchenie Rud*. 2022;(4):27–34. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17580/or.2022.04.05>
24. Li Y., Zhao W., Gui X., Zhang X. Flotation kinetics and separation selectivity of coal size fractions. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2013;49(2):387–395.
<http://dx.doi.org/10.5277/ppmp130201>
25. Goryachev B.E., Nikolaev A.A., Ils'ina E.Yu. Analysis of flotation kinetics of particles with the controllable hydrophobic behavior. *Journal of Mining Science*. 2010;46:72–77.
<https://doi.org/10.1007/s10913-010-0010-0>
26. Goryachev B.E., Nikolaev A.A. Principles of kinetic “ion” modeling of adsorptive collector layer at the surface of nonferrous heavy metal sulfides. *Journal of Mining Science*. 2013;49:499–506.
<https://doi.org/10.1134/S1062739149030180>
27. Saroj K.S., Nikkam S., Atul K.V. Performance evaluation of basic flotation kinetic models using advanced statistical techniques. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. 2019;39(2):65–87.
<http://dx.doi.org/10.1080/19392699.2017.1302436>
28. Xiangning Bu, Liang Ge, Yale Peng, Cao Ni. Kinetics of flotation. Order of process, rate constant distribution and ultimate recovery. *Journal of Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2017;53(1):342–365.
<http://dx.doi.org/10.5277/ppmp170128>

Информация об авторах

Хтет Зо У – аспирант кафедры обогащения полезных ископаемых (ОПИ), НИТУ МИСИС.
<https://orcid.org/0000-0003-2040-2552>
E-mail: htetzawoo68099@gmail.com

Чжо Зай Яя – к.т.н., стажер-докторант кафедры ОПИ, НИТУ МИСИС.
<https://orcid.org/0000-0003-4364-9574>
E-mail: kokyawgyi49@gmail.com

Борис Евгеньевич Горячев – д.т.н., профессор кафедры ОПИ, НИТУ МИСИС.
<https://orcid.org/0000-0002-5164-5920>
E-mail: beg@misiss.ru

Вклад авторов

Хтет Зо У – сбор и анализ литературы, подготовка пробы руды для исследований, проведение экспериментов по флотации, анализ результатов экспериментов, написание статьи.

Чжо Зай Яя – сбор и анализ литературы, анализ экспериментальных данных, участие в обсуждении результатов, проведение теоретических расчетов.

Б.Е. Горячев – формулировка концепции работы, определение цели работы, обсуждение методики экспериментов и полученных результатов, выполнение расчетов, написание статьи.

Information about the authors

Htet Zaw Oo – Postgraduate Student of the Department of Mineral Processing, National University of Science and Technology “MISIS” (NUST MISIS).
<https://orcid.org/0000-0003-2040-2552>
E-mail: htetzawoo68099@gmail.com

Kyaw Zay Ya – Cand. Sci. (Eng.), Intern-Doctoral Student of the Department of Mineral Processing, NUST MISIS.
<https://orcid.org/0000-0003-4364-9574>
E-mail: kokyawgyi49@gmail.com

Boris E. Goryachev – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Mineral Processing, NUST MISIS.
<https://orcid.org/0000-0002-5164-5920>
E-mail: beg@misiss.ru

Contribution of the authors

Htet Zaw Oo – literature review and analysis, preparation of ore samples for research, performance of flotation experiments, analysis of experimental results, and writing of the manuscript.

Kyaw Zay Ya – literature review and analysis, evaluation of experimental data, participation in the discussion of results, and performance of theoretical calculations.

B.E. Goryachev – formulation of the study concept, definition of research objectives, discussion of experimental methods and obtained results, performance of calculations, and writing of the manuscript.