ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2023;(11):128-142
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.765 DOI: 10.25018/0236_1493_2023_11_0_128

ДЕЙСТВИЕ КОМПОЗИЦИИ МЕТАЛЛОСОДЕРЖАЩИХ МОДИФИКАТОРОВ ПОВЕРХНОСТИ СУЛЬФИДНЫХ МИНЕРАЛОВ ЦВЕТНЫХ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ ПРИ ФЛОТАЦИИ МЕДНО-ЦИНКОВЫХ РУД

Пье Чжо Чжо[1], Чжо Зай Яа[1], Б.Е. Горячев[1]

[1] Горный институт, НИТУ «МИСиС», Москва, Россия,
e-mail: bophyo1831993@gmail.com, beg@misis.ru

Аннотация: Спрос на медь значительно увеличивается из года в год, в основном за счет зарождения возобновляемых источников энергии и электромобилей. Россия занимает четвертое, после Чили, Австралии и Перу, место в мире по количеству запасов меди. Благодаря своим свойствам и количеству медь широко используется как самостоятельный продукт и в виде сплавов. По этой причине горная промышленность вынуждена перерабатывать труднообогатимую руду для производства большего количества меди. Для переработки такой руды необходимо разработать новые модификаторы, собиратели, пенообразователи и схемы режимов флотации. Представлены результаты исследований влияния металлосодержащих модификаторов на флотацию сульфидов меди, цинка и пирита, входящих в медно-цинковую колчеданную руду одного из месторождений Урала. В качестве реагентов-модификаторов флотации сульфидов меди, цинка и пирита использовались железный, цинковый и медный купоросы и их двойные и тройные смеси. Дозирование смесей во флотацию осуществлялось с применением симплекс-плана четвертого порядка. По результатам кинетики флотации рассчитывалось распределение материала в концентрате флотации по фракциям флотируемости. Показано, что применение при флотации смеси железного и медного купоросов приводит к росту извлечения меди и цинка. Доказано, что в случае применения смеси указанных реагентов-модификаторов активируется флотация сфалерита.

Ключевые слова: медно-цинковые колчеданные руды, модификатор, флотация, реагенты, сульфат меди, сульфат цинка, сульфат железа, извлечение, медь, цинк.

Для цитирования: *Пье Чжо Чжо, Чжо Зай Яа, Горячев Б. Е.* Действие композиции металлосодержащих модификаторов поверхности сульфидных минералов цветных тяжелых металлов при флотации медно-цинковых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 11. – С. 128–142. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_11_0_128.

Effect of composition of metal-bearing surface modifiers for sulfide minerals of base heavy metals in copper–zinc ore flotation

Phyoe Kyaw Kyaw[1], Kyaw Zaya Ya[1], B.E. Goryachev[1]

[1] Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia,
e-mail: bophyo1831993@gmail.com, beg@misis.ru

© Пье Чжо Чжо, Чжо Зай Яа, Б.Е. Горячев. 2023.

Abstract: Copper demand increases substantially yearly mainly owing to the appearance of renewable energy sources and electromobiles. Russia holds the world's fourth resources of copper after Chile, Australia and Peru. Thanks to the properties and quantity, copper is widely used as an independent product and in alloys. Therefore, the mining industry has to process rebellious ore to produce increasingly more copper. Rebellious ore processing requires new modifiers, collectors, frothers and flowsheets of flotation. This article presents the research results on the influence of metal-bearing modifiers on flotation of copper, zinc and pyrite sulfides present in the composition of coper–zinc–pyrite ore from a Ural deposit. The modifying agents in flotation of copper, zinc and pyrite sulfides were iron, zinc and copper vitriols, and their binary and ternary mixtures. Dosing of the mixtures in flotation was performed using a 4-simplex. From the results on the kinetics of flotation, the patterns of materials in the concentrate were calculated per fractions of floatability. It is shown that the use of the mixture of iron and copper vitriols in flotation allows the increased recovery of copper and zinc. It is also proved that the use of this mixture of the modifiers activates flotation of sphalerite.

Key words: copper–zinc–pyrite ore, modifier, flotation, reagents, copper sulfate, zinc sulfate, iron sulfate, recovery, copper, zinc.

For citation: Phyoe Kyaw Kyaw, Kyaw Zaya Ya, Goryachev B. E. Effect of composition of metal-bearing surface modifiers for sulfide minerals of base heavy metals in copper–zinc ore flotation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(11):128-142. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_11_0_128.

Введение

В настоящее время к процессам добычи и переработки полезных ископаемых предъявляются все более строгие требования. Они проистекают из концепции устойчивого развития любого производства [1]. Это и эффективность переработки, в плане выхода полезного продукта [2], и энергоэффективность производства [3, 4], так как в себестоимости конечной продукции она составляет существенную часть. Это и экологические требования в плане безопасности технологических процессов [5, 6].

Все эти требования невозможно выполнить без тщательной проработки технологического процесса добычи и переработки [7]. В частности, перед процессом обогащения руды необходимо выполнить ряд анализов продукта [8, 9]. Существует множество методов и алгоритмов исследования состава вещества [10]. Одним из важных этапов рудоподготовки является процесс измельчения руды. А также, по возможности, мероприятия по ее разупрочнению, то есть по ослаблению связей составляющих ее элементов [11]. Существует и множество других технологий и мероприятий, способствующих проведению более эффективного процесса обогащения и, соответственно, получению более качественного концентрата на выходе [12, 13].

Поэтому в настоящее время большое число специалистов-обогатителей заняты поиском решения задачи, заключающейся в непрерывном поиске способов совершенствования технологии комплексного использования минерального сырья и, вместе с тем, возможностей максимально извлекать из него ценные компоненты [14 – 16].

Медно-цинковые руды Российской Федерации являются колчеданными и труднообогатимыми. Труднообогатимость руд объясняется тем, что в них содер-

жится высокий процент пирита, который может достигать 90%. Руды характеризуются взаимопрорастанием минералов цинка, меди, пирита и тонкой вкрапленностью. Вышеперечисленные свойства колчеданных медно-цинковых руд служат причиной выбора практически единственного из наиболее эффективных метода обогащения, а именно флотацию. Трудность обогащения руды также требует солидную номенклатуру флотационных реагентов и, что крайне важно, развитые технологические схемы переработки руд.

В данном исследовании использовалась медно-цинковая колчеданная руда одного из месторождений Урала, которая характеризуется сложностью вещественного состава, тонкой вкрапленностью минералов меди, цинка, пирита, что предопределяет ее труднообогатимость. В РФ медно-цинковые колчеданные руды в основном обогащаются на Гайской, Учалинской, Сибайской, Среднеуральской обогатительных фабриках [17 — 20].

В работе изучалось влияние металлосодержащих модификаторов поверхности сульфидных минералов тяжелых цветных металлов, таких как железный, цинковый и медный купоросы, и их двойных и тройных смесей на флотацию медно-цинковой колчеданной руды [21, 22].

Методика исследований

Оборудование, используемое в работе

В работе использовалось следующее оборудование: лабораторная щековая дробилка ДЩ 80×150, лабораторная шаровая мельница МШЛ-1, лабораторная механическая флотационная машина ФЛ 189 с объемом камеры 500 см^3 и рентгено-флюоресцентный анализатор ElvaX для анализа продуктов обогащения.

Подготовка руды к флотации

Проба медно-цинковой колчеданной руды дробилась в лабораторной щековой дробилке до крупности –3 мм. После усреднения пробы формировались частные пробы массой 250 г, которые измельчались в лабораторной шаровой мельнице до крупности 80% класса –0,074 мм и подвергались флотации. Средние мас-

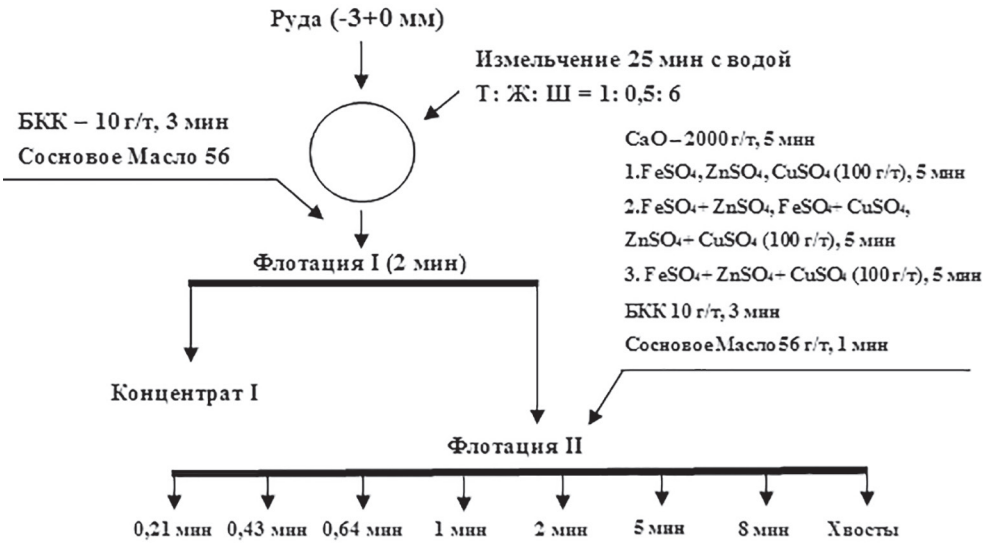


Рис. 1. Схема флотации медно-цинковой руды
Fig. 1. Scheme of flotation of copper-zinc ore

совые доли меди и цинка в частных пробах руды составили 0,69±0,09% и 1,30± ±0,18%.

Реагенты, используемые в исследовании

Реагенты, используемые для флотации: бутиловый ксантогенат калия в качестве собирателя; железный, цинковый и медный купоросы и их смеси — модификаторы флотации минералов меди, цинка и пирита; известь как регулятор среды и сосновое масло — пенообразователь.

Методика проведения флотационных опытов

Флотационные опыты проводили в механической флотомашине ФЛ 189 с объемом камеры 500 см^3. Измельченные руды перерабатываются на первом этапе флотации (флотация I), а после этого образовавшиеся в результате хвосты продолжают флотироваться на втором этапе (флотация II). Схема эксперимента представлена на рис. 1.

Планирование и проведение экспериментов

Симплексное планирование эксперимента, как правило, применяется для исследования многокомпонентных систем, например, для изучения зависимостей свойств различных сплавов от их состава. В данной работе этот метод применяется для нахождения связи технологических показателей флотации с соотношением реагентов-модификаторов в их смеси, подаваемой во флотацию.

План Шеффе (рис. 2) был применен для установления зависимости между функцией отклика (выход, содержание и извлечение) и тремя переменными (расход железного купороса x_1, расход цинкового купороса x_2 и расход медного купороса x_3) во флотации II.

План эксперимента для проведения флотационных опытов представлен в таблице.

Индексы у значений параметра оптимизации у указывают на относительное содержание каждого компонента в смеси. Например, смесь № 1 состоит только из компонента x_1, свойство этой смеси обозначается y_1, смесь № 4 состоит из (1/2) x_1 и (1/2) x_2, свойство смеси обозначается y_{12} и т.д. Опыт 16 не входит в симплекс. Он является контрольным, без добавления во флотацию II реагентов-модификаторов.

В первой серии опытов во флотации I дозируется собиратель — бутиловый

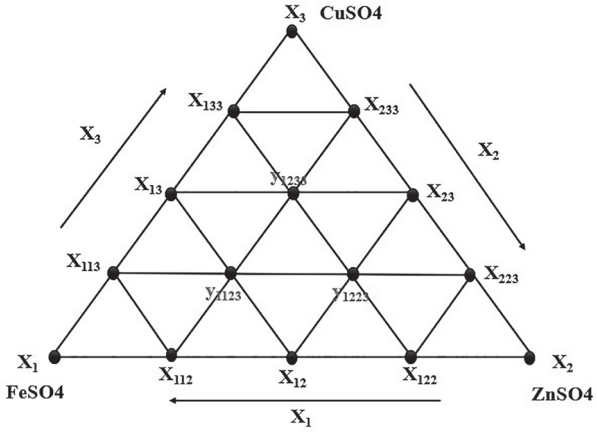


Рис. 2. {4}-решетчатый план Шеффе
Fig. 2. {4}-lattice Scheffe design

Симплекс-решетчатый план Шеффе для {3,4}-решетки
Simplex-lattice Scheffe plan for {3,4}-lattice

Номер опыта	Значения факторов			Параметр оптимизации
	x_1	x_2	x_3	
1	1	0	0	y_1
2	0	1	0	y_2
3	0	0	1	y_3
4	1/2	1/2	0	y_{12}
5	1/2	0	1/2	y_{12}
6	0	1/2	1/2	y_{23}
7	3/4	1/4	0	y_{1112}
8	1/4	3/4	0	y_{1222}
9	3/4	0	1/4	y_{1113}
10	1/4	0	3/4	y_{1333}
11	0	3/4	1/4	y_{2223}
12	0	1/4	3/4	y_{2333}
13	1/2	1/4	1/4	y_{1123}
14	1/4	1/2	1/4	y_{1223}
15	1/4	1/4	1/2	y_{1233}
16	0	0	0	контрольный

ксантогенат калия, БКК 10 г/т (3 мин агитации), пенообразователь — сосновое масло, 56 г/т (1 минута агитации), после чего ведется флотации I в течение 2 мин. Затем во флотацию II дозируется регулятор среды — известь 2000 г/т (5 мин агитации), и один из купоросов железа, цинка или меди с расходом 100 г/т каждого (5 мин агитация). После этого дозируется собиратель — БКК 10 г/т (3 мин агитации), и пенообразователь — сосновое масло 56 г/т (1 мин агитации), и ведется флотация II.

Во второй серии опытов при том же реагентном режиме флотации I во флотацию II дозируются смеси купоросов железа и цинка, железа и меди, меди и цинка при их общем расходе в смеси 100 г/т. Данная серия опытов соответствует точкам на сторонах симплекс-треугольника (см. рис. 2).

В третьей серии опытов во флотацию II дозируются тройные смеси купоросов железа, цинка и меди при том же общем расходе 100 г/т (точки внутри симплекс-треугольника). Конечные продукты флотаций после сушки и взвешивания анализировались на содержание в них меди и железа рентгенофлюоресцентным методом на анализаторе ElvaX.

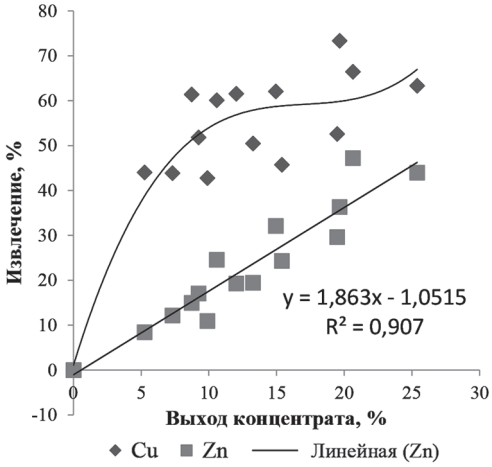
Результаты исследований и их обсуждение

Во всех трех сериях флотационных опытов, в соответствии со схемой флотации (см. рис. 2), флотация руды проводилась в «голодном режиме» по собирателю с расходом ксантогената калия 10 г/т в каждую операцию флотации. Расход пенообразователя — соснового масла — в каждой операции флотации составлял 56 г/т.

Исходя из реагентного режима флотации I, ее можно рассматривать как коллективную медно-цинковую флотацию с частичной флотацией пирита в концентрат флотации I. Голодный режим флотации по собирателю (10 г/т БКК) предполагает флотацию наиболее флотоактивных фракций каждого из сульфидных минералов.

На рис. 3 представлены кривые обогатимости меди, цинка и пирита в концентрат флотации I. Необходимо отметить, что если массовые доли меди и цинка в концентрате флотации I определялись инструментально, рентгенофлюоресцентным анализом, то массовая доля пирита рассчитывалась исходя из значений выхода концентрата и массовых долей меди и цинка в нем. Последнее следует из того, что анализ проб на железо на рентгенофлюоресцентном анализаторе дает завышенное содержание железа в продуктах флотации, превышающее его содержание в пирите.

Из рис. 3 следует, что при равных выходах концентрата флотации I извле-



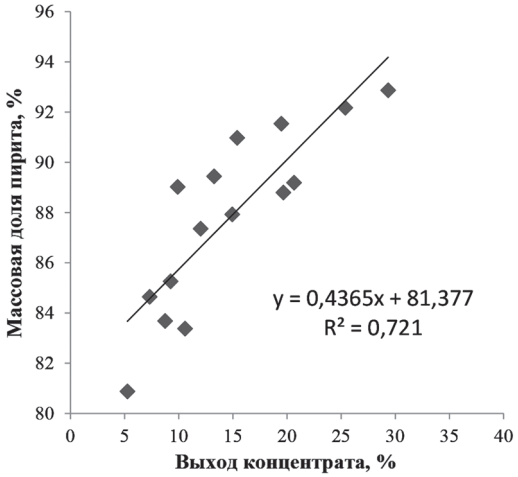
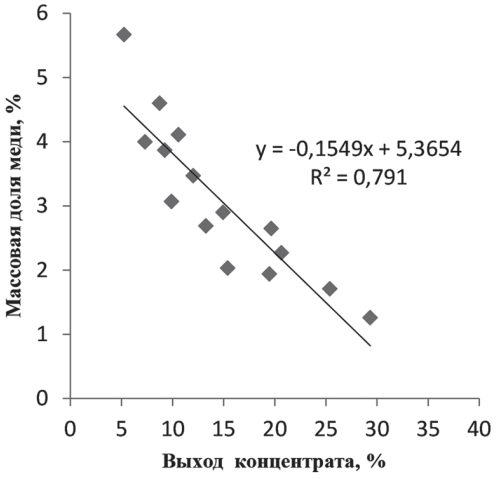


Рис. 3. Кривые обогатимости меди, цинка и пирита в концентрат флотации I
Fig. 3. Concentration curves for copper, zinc and pyrite in flotation concentrate I

чение меди в концентрат существенно больше извлечения цинка. Это особенно проявляется при выходах концентрата менее 10%. При этом прослеживается практически функциональная линейная связь между извлечением цинка в концентрат и выходом концентрата.

На рис. 4 представлена кривая обогатимости меди в концентрат флотации I, в координатах «выход концентрата — массовая доля меди». Из сравнения кривых обогатимости для меди и пирита, построенных в одних и тех же координатах «$\beta-\gamma$», следует, что если массовая доля меди в концентрате флотации I уменьшается с ростом выхода концентрата (см. рис. 4), то для пирита наблюдается обратная картина (см. рис. 3).



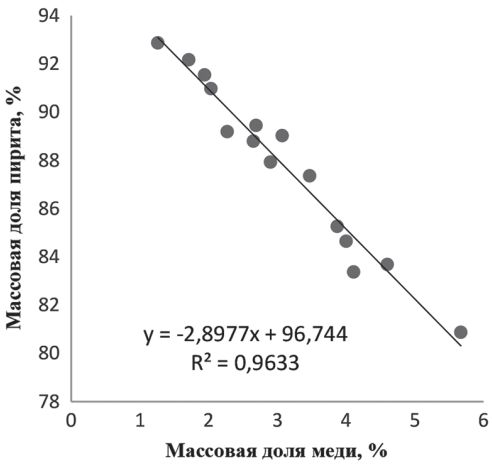


Рис. 4. Кривая обогатимости меди в концентрат флотации I
Fig. 4. Concentrtion curve for copper in flotation concentrate I

Рис. 5. Взаимосвязь между массовыми долями меди и пирита в концентрате флотации I
Fig. 5. The relationship between the mass fractions of copper and pyrite in the flotation concentrate I

С учетом зависимости между массовыми долями меди и пирита в концентрате флотации I (рис. 5) можно сделать вывод о том, что именно пирит препятствует извлечению меди в концентрат флотации I.

Дальнейший анализ анализа полученных результатов во флотации I показал, что минералы меди характеризуются большей обогатимостью по сравнению со сфалеритом. Об этом свидетельствуют значения извлечений меди и цинка, представленные на рис. 3.

Флотация II также проводилась в «голодном режиме» по собирателю (расход БКК 10 г/т) в известковой среде (расход извести 2000 г/т) с использованием реагентов-модификаторов. Расход соснового масла во флотацию II составлял 56 г/т. Порядок подачи реагентов во флотацию II приведен на рис. 1. Результаты флотации представлены на рис. 6 и 7. Время флотации составляло 1 мин.

Анализ рис. 6 показывает, что наибольшая активация флотации меди и цинка наблюдается при дозировании во флотацию II смеси железного и медного купоросов. Так, при относительной доле железного и медного купоросов в их смеси 0,25$FeSO_4$ + 0,75$CuSO_4$ извлечение меди в концентрат флотации II составляет 90,1%, а цинка — 46,6%, или суммарное извлечение меди и цинка в концентрат достигает 136,7%, что на 24% больше по сравнению с суммарным извлечением тех же металлов в концентрат, полученный без добавки указанных модификаторов во флотацию II. Однако максимальное извлечение меди в концентрат наблюдается при дозировании той же смеси модификаторов, но при ее составе 0,5$FeSO_4$ + 0,5$CuSO_4$. В этом случае извлечение меди в концентрат составило 93,2%, а цинка 36,7% (суммарно — 129,9%). Две другие смеси хотя и активируют флотацию минералов меди и цинка, но с меньшим эффектом.

На рис. 7 показано, как меняется качество концентрата флотации II в зависимости от состава смеси модификаторов, состоящих из двух купоросов — железного и цинкового, железного и медного, цинкового и медного.

Данные рис. 7 подтверждают вывод о том, что наибольшее активирующее действие на флотацию хвостов флотации I оказывает смесь железного и медного купоросов, содержащая 0,25$FeSO_4$ +

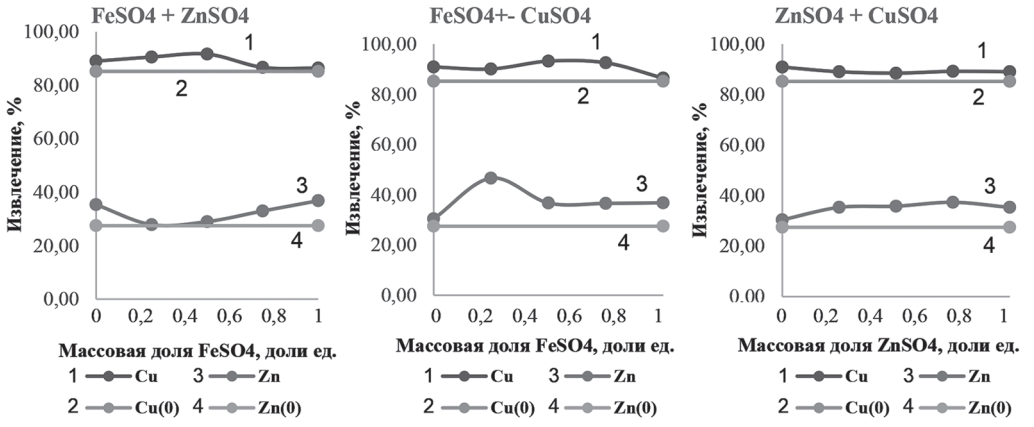


Рис. 6. Зависимость извлечения меди и цинка в концентрат флотации II от соотношения расходов модификаторов, дозируемых во флотацию II

Fig. 6. Dependence of the extraction of copper and zinc in the flotation concentrate II on the ratio of the consumptions of modifiers dosed into flotation II

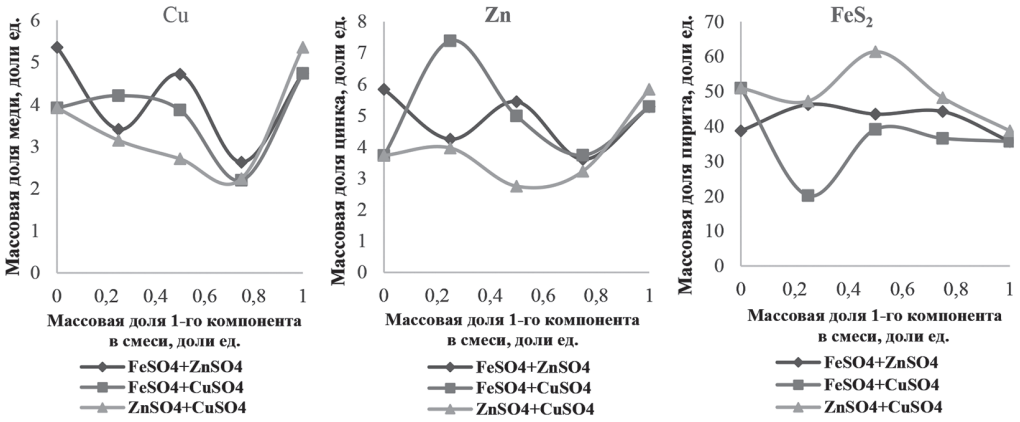


Рис. 7. Зависимость массовой доли меди, цинка и пирита в концентрате флотации II от соотношения расходов модификаторов, дозируемых во флотацию II

Fig. 7. Dependence of the mass fraction of copper, zinc and pyrite in the concentration of flotation II on the ratio of the consumptions of modifiers dosed into floatation II

+ 0,75$CuSO_4$. Полученный в этом случае концентрат флотации II характеризуется минимальным содержанием в нем пирита (20%) и максимальным содержанием цинка (7,4%) при содержании в нем меди 3,2%.

На рис. 8 представлено извлечение, а на рис. 9 — массовая доля меди, цинка и пирита, достигнутые в опытах, соответствующих внутренней области симплекс-треугольника.

Из рис. 8 и 9 следует, что дозирование во флотацию II трехкомпонентных смесей железного, цинкового и медного купоросов при расходе смеси 100 г/т является менее эффективным по сравнению с дозированием в ту же флотацию двухкомпонентных смесей тех же купоросов. Особенно это проявляется для извлечения меди. Введение в рецептуру флотации смеси трех купоросов практически не приводит к росту извлечения меди по сравнению с контрольным опытом № 16, в котором во флотацию не дозируются указанные купоросы металлов. Однако флотация цинка заметно акти-

Рис. 8. Извлечение меди и цинка в концентрат флотации II, полученное при дозировании тройных смесей купоросов железа, цинка и меди с разными массовыми долями купоросов в смеси

Fig. 8. Extraction of copper and zinc in the concentration of flotation II, obtained by dosing ternary mixtures of vitriols of iron, zinc and copper with different mass fractions of vitriols in the mixture

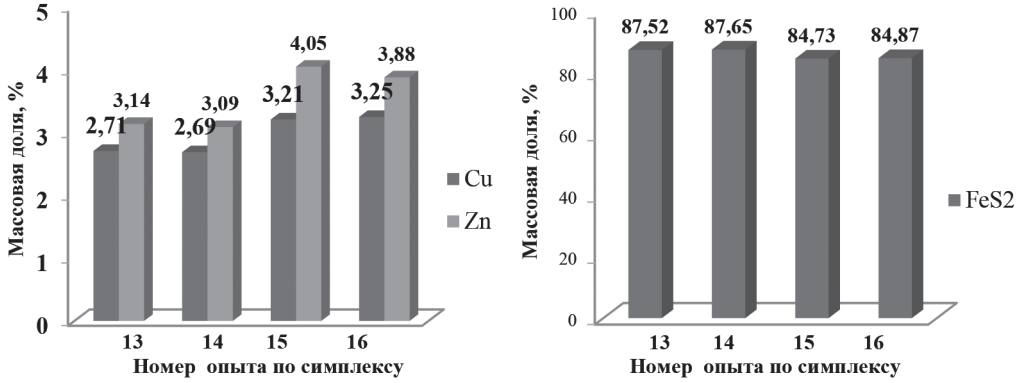


Рис. 9. Массовая доля меди, цинка и пирита в концентрате флотации II, полученная при дозировании тройных смесей купоросов железа, цинка и меди с разными массовыми долями купоросов в смеси
Fig. 9. Mass fraction of copper, zinc and pyrite in the concentration of flotation II, obtained by dosing ternary mixtures of iron, zinc and copper vitriol with different mass fractions of vitriols in the mixture

вируется при дозировании трехкомпонентной смеси во флотацию II. Наилучшие показатели флотации в данной серии опытов по качеству концентрата были достигнуты в опыте № 15.

Таким образом, максимальное извлечение меди из хвостов флотации I в концентрат флотации II наблюдается при применении смеси реагентов-модификаторов железного и медного купоросов состава $0{,}5FeSO_4 + 0{,}5CuSO_4$ и достигает 91,6%. Наибольшее извлечение цинка в концентрат флотации II получено при применении смеси тех же реагентов, но состава $0{,}25FeSO_4 + 0{,}75CuSO_4$, при массовой доле цинка в концентрате 7,1%. В этом случае извлечение цинка в концентрат составило 46,6% за время флотации 1 мин.

Кинетика флотации II при дозировании во флотацию II смеси сульфата железа (II), цинка и меди

При изучении кинетики флотации меди и цинка во флотации II рассчитывался фракционный состав концентрата по фракциям флотируемости минералов меди и цинка в концентрат флотации II из хвостов флотации I в опытах, где получен вышеуказанный прирост извлечения меди и цинка в концентрат флотации II. Расчет спектра флотируемости минералов меди и цинка в концентрат флотации II проводился по программе SPECTR, разработанной Д.В. Шехиревым [23, 24] и примененной в [25–27].

На рис. 10 приведены кинетические кривые флотации меди и цинка для флотации II.

Из рис. 10 следует, что наибольшее влияние вводимая смесь модификаторов оказывает на кинетику флотации минералов цинка. Так, скорость флотации минералов цинка в концентрат флотации II примерно одинакова в опыте как без добавления реагентов-модификаторов, так и при введении во флотацию II смеси железного и медного купоросов состава $0{,}5FeSO_4 + 0{,}5CuSO_4$. Уменьшение относительной доли железного купороса в смеси до 0,25 при росте доли медного купороса до 0,75 ($0{,}25FeSO_4 + 0{,}75CuSO_4$) скорость флотации цинка резко возрастает.

Действие тех же смесей модификаторов на флотацию минералов меди примерно одинаково, и при времени флотации 8 мин извлечение меди в концентрат достигает практически 100%.

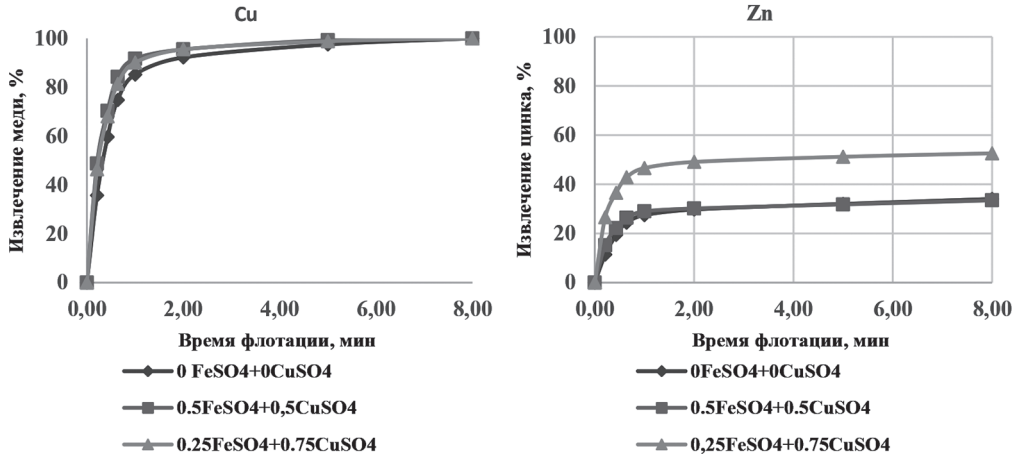


Рис. 10. Кинетика флотации меди и цинка во флотации II при различных соотношениях купоросов железа и меди.

Fig.10. Kinetics of copper and zinc flotation in flotation II at various ratios of iron and copper vitriol.

Результаты более подробного фракционного анализа кинетики флотации меди и цинка в концентрат флотации II представлены на рис. 11.

Выполненный фракционный анализ предполагает наличие во флотируемом материале шести фракций по флотируемости. Каждая фракция характеризуется вполне определенным диапазоном значений константы скорости флотации, и ее кинетика подчиняется уравнению К.Ф. Белоглазова. Каждый номер фракции на рис. 11 соответствует следующим значениям константы скорости флотации:

1 — $0 < K < 0{,}0001$ мин$^{-1}$,

2 — $0{,}0001 < K < 0{,}001$ мин$^{-1}$,

3 — $0{,}001 < K < 0{,}01$ мин$^{-1}$,

4 — $0{,}1 < K < 1$ мин$^{-1}$,

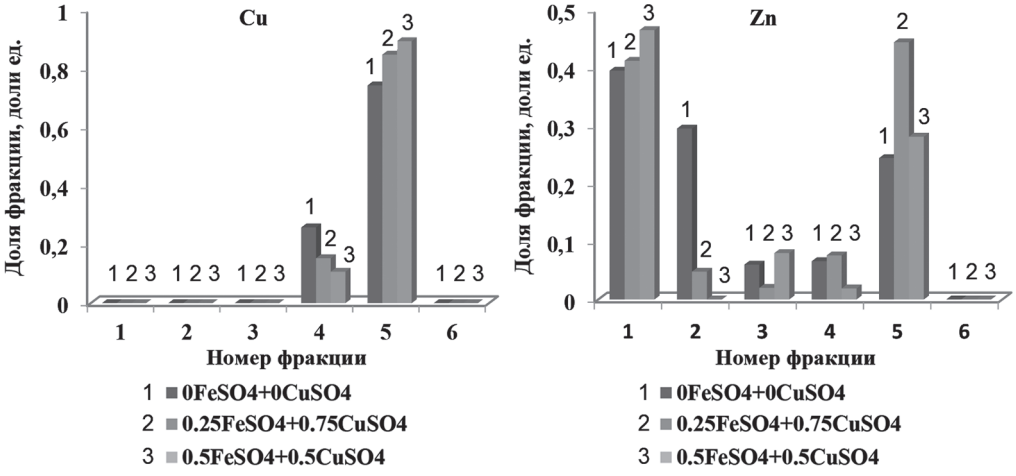


Рис. 11. Распределение меди и цинка по фракциям их флотируемости из хвостов флотации I в концентрат флотации II

Fig. 11. Distribution of copper and zinc according to their floatability fractions from flotation tailings I to flotation concentrate II

5 — $1 < K < 10$ мин$^{-1}$,

6 — $10 < K < 100$ мин$^{-1}$.

Из рассмотрения рис. 11 следует, что минералы меди сосредоточены в четвертой, среднефлотируемой, и пятой, легко флотируемой, фракциях. Именно этим объясняется высокая скорость флотации меди, представленная на рис. 10. При этом в отсутствие реагентов-модификаторов во флотации II доля среднефлотируемых фракций составляет 0,26 о.е., а легкофлотируемых — 0,74 о.е. Максимальная активация флотации минералов меди наблюдается при введении в операцию смеси $0{,}5FeSO_4 + 0{,}5CuSO_4$. В этом случае доля среднефлотируемых фракций минералов меди уменьшилась до 0,11 о.е., а доля легкофлотируемых — возросла до 0,89 о.е. Это свидетельствует о том, что данная смесь модификаторов, действуя на среднефлотируемые фракции хвостов флотации I, перевела их в легкофлотируемые, тем самым сократив время их флотации.

Другое распределение фракций по флотируемости установлено для флотации цинка (рис. 11, правая часть рисунка). В отсутствие реагентов-модификаторов 0,63 относительных доли минералов цинка сосредоточены в труднофлотируемых фракциях *1* и *2* с константой скорости флотации меньше 0,001 мин$^{-1}$. В этом случае на долю легкофлотируемых фракций приходится всего 0,24 относительной доли во флотируемом материале. При действии на минералы цинка в хвостах флотации I смеси реагентов-модификаторов состава $0{,}25FeSO_4 + 0{,}75CuSO_4$ происходит уменьшение суммы труднофлотируемых фракций с 0,63 о.е. до 0,46 о.е., а доля средне- и легкофлотируемых фракций возрастает с 0,31 до 0,52 о.е. При применении во флотации II смеси $0{,}5FeSO_4 + 0{,}5CuSO_4$ наблюдается рост доли труднофлотируемых фракций сфалерита до 0,47 о.е. за счет уменьшения доли средне- и легкофлотируемых фракций до 0,3 о.е.

Заключение

1. Авторами установлено, что применение смеси железного и медного купоросов во флотации II приводит к росту извлечения меди и особенно цинка в концентрат флотации. Максимальное извлечение меди достигается при составе смеси $0{,}5FeSO_4 + 0{,}5CuSO_4$ и общем расходе смеси 100 г/т. Максимальное извлечение цинка достигается при составе смеси $0{,}25FeSO_4 + 0{,}75CuSO_4$ и том же общем расходе смеси 100 г/т.

2. Изучение кинетики флотации меди и цинка во флотации II показало, что медь в концентрате флотации в случае применения смеси указанных реагентов-модификаторов представлена ее легкофлотируемыми фракциями. Применение смеси реагентов-модификаторов состава $0{,}25FeSO_4 + 0{,}75CuSO_4$ активирует флотацию сфалерита, что отражается в росте его легкофлотируемых фракций в концентрате флотации II. В обоих случаях общий расход смеси составлял 100 г/т.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Litvinenko V. S., Tsvetkov P. S., Molodtsov K. V.* The social and market mechanism of sustainable development of public companies in the mineral resource sector // Eurasian Mining. 2020, vol. 1, pp. 36—41. DOI: 10.17580/em.2020.01.07.

2. *Aleksandrova T., Nikolaeva N., Afanasova A., Romashev A., Kuznetsov V.* Selective disintegration justification based on the mineralogical and technological features of the polymetallic ores // Minerals. 2021, vol. 11, no. 8, article 851. DOI: 10.3390/min11080851.

3. *Lisin E., Kurdiukova G.* Energy supply system development management mechanisms from the standpoint of efficient use of energy resources // IOP Conference Series. Earth and Environmental Science. 2021, vol. 666, no. 6, article 062090. DOI: 10.1088/1755-1315/666/6/062090.

4. *Rogalev N., Sukhareva Y., Mentel G., Broz˙yna J.* Economic approaches for improving electricity market // Terra Economicus. 2018, vol. 16, no. 2, pp. 140 — 149. DOI: 10.23683/2073-6606-2018-16-2-140-149.

5. *Rybak J., Adigamov A., Kongar-Syuryun Ch., Khayrutdinov M., Tyulyaeva Y.* Renewable resource technologies in mining and metallurgical enterprises providing environmental safety // Minerals. 2021, vol. 11, no. 10, article 1145. DOI 10.3390/min11101145.

6. *Хайрутдинов М. М., Каунг П. А., Чжо З. Я., Тюляева Ю. С.* Обеспечение экологической безопасности при внедрении ресурсовозобновляемых технологий // Безопасность труда в промышленности. — 2022. — № 5. — С. 57 — 62. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-5-57-62.

7. *Александрова Т. Н., Чантурия А. В.* Выбор процесса рудоподготовки железистых кварцитов на основе имитационного моделирования // Обогащение руд. — 2023. — № 1. — С. 3 — 9. DOI: 10.17580/or.2023.01.01.

8. *Ivannikov A., Chumakov A., Prischepov V., Melekhina K.* Express determination of the grain size of nickel-containing minerals in ore material // Materials Today: Proceedings. 2021, vol. 38, part 4, pp. 2059 — 2062. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.141.

9. *Clout J. M. F., Manuel J. R.* Mineralogical, chemical, and physical metallurgical characteristics of iron ore / Iron Ore: Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability. Chapter 2. 2021, pp. 59 — 108. DOI: 10.1016/B978-0-12-820226-5.00012-4.

10. *Chumakov A., Prischepov V., Melekhina K., Ivannikov A.* Improving the control system of concentration plants based on express control of dissemination of magnetic minerals // IOP Conference Series. Earth and Environmental Science. 2021, vol. 684, no. 1, article 012005. DOI: 10.1088/1755-1315/684/1/012005.

11. *Мелехина К. А., Ананьев П. П., Плотникова А. В., Тимофеев А. С., Шестак С. А.* Моделирование и оптимизация процесса рудоподготовки комплексных руд при их дезинтеграции в мельнице самоизмельчения // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 10. — С. 95 — 105. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-95-105.

12. *Kuskov V. B., Lvov V. V., Yushina T. I.* Increasing the recovery ratio of iron ores in the course of preparation and processing // CIS Iron and Steel Review. 2021, vol. 21, no. 1, pp. 4 — 8. DOI: 10.17580/cisisr.2021.01.01.

13. *Пелевин А. Е.* Использование результатов фазового состава магнетитовой руды для прогнозирования выхода концентрата // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 5-1. — С. 131 — 144. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_51_0_131.

14. *Кузнецов В. В., Александрова Т. Н.* Разработка методов определения флотируемости минералов для эффективного проектирования технологии флотации // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 10-1. — С. 145 — 154. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_101_0_145.

15. *Юшина Т. И., Чантурия Е. Л., Думов А. М., Мясков А. В.* Современные тенденции технического прогресса в переработке железных руд // Горный журнал. — 2021. — № 11. — С. 75 — 83. DOI: 10.17580/gzh.2021.11.10.

16. *Jankovic A.* Comminution and classification technologies of iron ore / Iron Ore: Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability. Chapter 8. 2021, pp. 269 — 308. DOI: 10.1016/B978-0-12-820226-5.00013-6.

17. *Митрофанов С. И.* Обогащение медно-цинково-пиритных руд Урала // Цветные металлы. — 1977. — № 1. — С. 53 — 56.

18. *Бочаров В. А., Игнаткина В. А.* Технология обогащения полезных ископаемых. Т. 1. Минерально-сырьевая база полезных ископаемых. Обогащение руд цветных металлов, руд и россыпей редких металлов. — М.: Руда и металлы, 2007. — С. 156 — 170.

19. *Бочаров В. А.*, *Рыскин М. Я.*, *Поспелов Н. Д.* Развитие технологии переработки медно-цинковых руд Урала // Цветные металлы. — 1979. — № 10. — С. 105—107.

20. *Бочаров В. А.*, *Игнаткина В. А.*, *Абрютин Д. В.*, *Каюмов А. А.*, *Каюмова В. Р. (Корж)* Влияние модификаторов класса сульфоксидов на флотируемость 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.

21. *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.

22. *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.

23. *Шехирев Д. В.* Методика расчета распределения материала по флотируемости // Обогащение руд. — 2022. — № 4. — С. 27—34. DOI: 10.17580/or.2022.04.05.

24. *Шехирев Д. В.*, *Смайлов Б. Б.* Кинетика извлечения частиц различного минерального состава в ходе флотации свинцово-цинковой руды // Обогащение руд. — 2016. — № 2. — С. 20—26. DOI: 10.17580/or.2016.02.04.

25. *Наинг Лин У.* Повышение селективности флотации колчеданных медно-цинковых руд с использованием модификаторов флотации пирита на основе соединений железа (II). Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. — М.: МИСиС, 2015. — С. 27. https://misis.ru/files/3192/Naing_avtoreferat.doc.

26. *Чжо Зай Яа* Повышение селективности флотации колчеданных медно-цинковых руд с использованием модификаторов флотации сфалерита на основе соединений железа (II), меди (II) и цинка. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. — М.: МИСиС, 2018. — С. 26. https://misis.ru/files/9461/Chgo_AR.pdf.

27. *Чжо З. Я.*, *Горячев Б. Е.*, *Николаев А. А.* Кинетика флотации сфалерита флотационной крупности бутиловым дитиофосфатом натрия // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья. — М.: ИПКОН РАН, 2015. — С. 336—338. ГИАБ

REFERENCES

1. Litvinenko V. S., Tsvetkov P. S., Molodtsov K. V. The social and market mechanism of sustainable development of public companies in the mineral resource sector. *Eurasian Mining*. 2020, vol. 1, pp. 36—41. DOI: 10.17580/em.2020.01.07.

2. Aleksandrova T., Nikolaeva N., Afanasova A., Romashev A., Kuznetsov V. Selective disintegration justification based on the mineralogical and technological features of the polymetallic ores. *Minerals*. 2021, vol. 11, no. 8, article 851. DOI: 10.3390/min11080851.

3. Lisin E., Kurdiukova G. Energy supply system development management mechanisms from the standpoint of efficient use of energy resources. *IOP Conference Series. Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 666, no. 6, article 062090. DOI: 10.1088/1755-1315/666/6/062090.

4. Rogalev N., Sukhareva Y., Mentel G., Broz˙yna J. Economic approaches for improving electricity market. *Terra Economicus*. 2018, vol. 16, no. 2, pp. 140—149. DOI: 10.23683/2073-6606-2018-16-2-140-149.

5. Rybak J., Adigamov A., Kongar-Syuryun Ch., Khayrutdinov M., Tyulyaeva Y. Renewable resource technologies in mining and metallurgical enterprises providing environmental safety. *Minerals*. 2021, vol. 11, no. 10, article 1145. DOI 10.3390/min11101145.

6. Khayrutdinov M. M., Kaung P. A., Chzho Z. Ya., Tyulyaeva Yu. S. Ensuring environmental safety in the implementation of the resource-renewable technologies. *Occupational Safety in Industry*. 2022, no. 5, pp. 57—62. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-5-57-62.

7. Aleksandrova T. N., Chanturiya A. V. Ore preparation process selection for ferruginous quartzites based on simulation modeling. *Obogashchenie Rud*. 2023, no. 1, pp. 3—9. DOI: 10.17580/or.2023.01.01.

8. Ivannikov A., Chumakov A., Prischepov V., Melekhina K. Express determination of the grain size of nickel-containing minerals in ore material. *Materials Today: Proceedings*. 2021, vol. 38, part 4, pp. 2059—2062. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.141.

9. Clout J. M. F., Manuel J. R. Mineralogical, chemical, and physical metallurgical characteristics of iron ore. *Iron Ore: Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability*. Chapter 2. 2021, pp. 59—108. DOI: 10.1016/B978-0-12-820226-5.00012-4.

10. Chumakov A., Prischepov V., Melekhina K., Ivannikov A. Improving the control system of concentration plants based on express control of dissemination of magnetic minerals. I*OP Conference Series. Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 684, no. 1, article 012005. DOI: 10.1088/1755-1315/684/1/012005.

11. Melekhina K. A., Ananyev P. P., Plotnikova A. V., Timofeev A. S., Shestak S. A. Modeling and optimization of complex ore pretreatment by disintegration in autogenous mills. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 10, pp. 95—105. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-95-105.

12. Kuskov V. B., Lvov V. V., Yushina T. I. Increasing the recovery ratio of iron ores in the course of preparation and processing. *CIS Iron and Steel Review*. 2021, vol. 21, no. 1, pp. 4—8. DOI: 10.17580/cisisr.2021.01.01.

13. Pelevin A. E. Using the results of the phase composition of magnetite ore to predict the output of the concentrate. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 5-1, pp. 131—144. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_51_0_131.

14. Kuznetsov V. V., Aleksandrova T. N. Development of methods for determining the floatability of minerals for effective design of flotation technology. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 10-1, pp. 145—154. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_101_0_145.

15. Yushina T. I., Chanturia E. L., Dumov A. M., Myaskov A. V. Modern trends in technical progress in the processing of iron ores. *Gornyi Zhurnal*. 2021, no. 11, pp. 75—83. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2021.11.10.

16. Jankovic A. Comminution and classification technologies of iron ore. *Iron Ore: Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability*. Chapter 8. 2021, pp. 269—308. DOI: 10.1016/B978-0-12-820226-5.00013-6.

17. Mitrofanov S. I. Enrichment of copper-zinc-pyrite ores of the Urals. *Tsvetnye Metally*. 1977, no. 1, pp. 53—56. [In Russ].

18. Bocharov V. A., Ignatkina V. A. *Tekhnologiya obogascheniya poleznykh iskopaemykh. T. 1. Mineral'no-syr'evaya baza poleznykh iskopaemykh. Obogaschenie rud tsvetnykh metallov, rud i rossypey redkikh metallov* [Technology of mineral processing. Vol. 1. Mineral resource base of minerals. Enrichment of ores of non-ferrous metals, ores and placers of rare metals], Moscow, Ruda i metally, 2007, pp. 156—170. [In Russ].

19. Bocharov V. A., Ryskin M. Ya., Pospelov N. D. Development of technology for processing copper-zinc ores of the Urals. *Tsvetnye Metally*. 1979, no. 10, pp. 105—107. [In Russ].

20. 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, no. 12, pp. 20—33. [In Russ]. DOI: 10.25 018/0236_1493_2022_12_0_20.

21. 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.

22. 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.

23. Shekhirev D. V. Method for calculating the distribution of material by floatability. *Obogashchenie Rud*. 2022, no. 4, pp. 27—34. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2022.04.05.

24. Shekhirev D. V., Smailov B. B. Kinetics of extraction of particles of different mineral composition during flotation of lead-zinc ore. *Obogashchenie Rud*. 2016, no. 2, pp. 20—26. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2016.02.04.

25. Naing Lin Oo. *Povyshenie selektivnosti flotatsii kolchedannykh medno-tsinkovykh rud s ispol'zovaniem modifikatorov flotatsii pirita na osnove soedineniy zheleza (II)* [Increase in the selectivity of flotation of pyrite copper-zinc ores using pyrite flotation modifiers based on iron (II) compounds], Candidate's thesis, Moscow, MISiS, 2015, p. 27, available at: https://misis.ru/files/3192/Naing_avtoreferat.doc.

26. Kyaw Zay Ya *Povyshenie selektivnosti flotatsii kolchedannykh medno-tsinkovykh rud s ispol'zovaniem modifikatorov flotatsii sfalerita na osnove soedineniy zheleza (II), medi (II) i tsinka* [Improving the selectivity of flotation of pyrite copper-zinc ores using sphalerite flotation modifiers based on iron (II), copper (II) and zinc compounds], Candidate's thesis, Moscow, MISiS, 2018, p. 26, available at: https://misis.ru/files/9461/Chgo_AR.pdf.

27. Kyaw Zay Ya, Goryachev B. E., Nikolaev A. A. *Kinetika flotatsii sfalerita flotatsionnoy krupnosti butilovym ditiofosfatom natriya. Nauchnye osnovy i praktika pererabotki rud i tekhnogennogo syr'ya* [Kinetics of flotation of sphalerite of flotation size with sodium butyl dithiophosphate. Scientific foundations and practice of processing ores and technogenic raw materials], Moscow, IPKON RAN, 2015, pp. 336—338.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пье Чжо Чжо[1] — аспирант,
e-mail: bophyo1831993@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0003-3084-6771,
Чжо Зай Яа[1] — канд. техн. наук,
стажер кафедры ОПИ,
e-mail: kokyawgyi49@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0003-4364-9574,
Горячев Борис Евгеньевич[1] — д-р техн. наук,
профессор, e-mail: beg@misis.ru,
[1] Горный институт, НИТУ «МИСиС».
Для контактов: Пье Чжо Чжо, e-mail: bophyo1831993@gmail.com;
Горячев Б.Е., e-mail: beg@misis.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Phyoe Kyaw Kyaw[1], Graduate Student,
e-mail: bophyo1831993@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0003-3084-6771,
Kyaw Zay Ya[1], Cand. Sci. (Eng.), Internship,
Department of Mineral Processing,
e-mail: kokyawgyi49@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0003-4364-9574,
B.E. Goryachev[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor,
e-mail: beg@misis.ru,
[1] Mining Institute, National University of Science
and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.
Corresponding author: Phyoe Kyaw Kyaw, e-mail: bophyo1831993@gmail.com;
B.E. Goryachev, e-mail: beg@misis.ru.

Получена редакцией 12.04.2023; получена после рецензии 27.07.2023; принята к печати 10.10.2023.
Received by the editors 12.04.2023; received after the review 27.07.2023; accepted for printing 10.10.2023.