

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ФЛОТАЦИОННЫХ РЕАГЕНТОВ ПО ИХ ВЛИЯНИЮ НА ПОТЕРИ МЕТАЛЛОВ И СЕЛЕКТИВНОСТЬ ФЛОТАЦИИ

© 2021 г. **В.И. Брагин**^{1,2}, **Е.А. Бурдакова**^{1,2}, **Н.Ф. Усманова**^{2,1}, **А.И. Кинякин**¹

¹ Сибирский федеральный университет (СФУ), г. Красноярск, Россия

² Институт химии и химической технологии (ИХХТ) СО РАН
Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр» (ФИЦ КНЦ) СО РАН,
г. Красноярск, Россия

Статья поступила в редакцию 01.07.21 г., доработана 26.07.21 г., подписана в печать 09.08.21 г.

Аннотация: Предложен метод быстрой оценки средней флотуемости минералов по данным кинетического опыта, без нахождения спектра флотуемости, при котором первые моменты распределения вычисляются по коэффициентам полиномиальной аппроксимации логарифмической формы кинетики. На примере медно-никелевой руды показано, что применение этого метода эффективно в многопараметрической задаче сравнительной оценки реагентов. Оцениваемые параметры (их 10) включали среднюю флотуемость целевых минералов (халькопирита и пентландита), пирротина и породы; коэффициенты селективности флотации целевых минералов относительно пирротина и породы; уровни потерь меди и никеля с хвостами коллективной флотации. Наглядное представление взаимозависимостей параметров достигается использованием диаграмм, отображающих влияние флотационных реагентов на группы параметров: среднюю флотуемость, коэффициенты селективности, потери металлов и селективность относительно породы. Определено влияние бутилового ксантогената, аэрофлота, дизельного топлива, а также депрессоров пустой породы — карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ) и подкисленного жидкого стекла (при суммарном расходе собирателей — 130 г/т, дизельного топлива — 5–10 г/т, КМЦ — 200 г/т, жидкого стекла — 500 г/т) на оцениваемые параметры в условиях коллективной флотации. Установлено, что добавки аэрофлота и дизельного топлива к основному реагенту-собирателю — ксантогенату — повышают селективность флотации пентландита и халькопирита относительно пирротина и породообразующей составляющей. Введение в реагентный режим подкисленного жидкого стекла увеличивает селективность флотации сульфидов никеля и меди относительно породы. Добавки КМЦ ухудшают селективность флотации меди. Количественные эффекты каждого отдельного параметра учтены в интегральной рейтинговой оценке перспективности применения сочетаний реагентов для медно-никелевой руды по совокупности 10 параметров. Предложенный метод может быть в дальнейшем использован при массовой сравнительной оценке флотационных реагентов.

Ключевые слова: кинетика флотации, спектр флотуемости, моменты распределения, преобразование Лапласа, полиномиальная аппроксимация, коэффициенты селективности флотации, медно-никелевые руды.

Брагин В.И. — докт. техн. наук, проф., зав. кафедрой обогащения полезных ископаемых Института цветных металлов и металловедения (ИЦМиМ), СФУ (660025, г. Красноярск, пр. Красноярский рабочий, 95);
вед. науч. сотр. Института химии и химической технологии (ИХХТ) СО РАН (660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/24)
Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр» (ФИЦ КНЦ) СО РАН.
E-mail: vic.bragin@gmail.com.

Бурдакова Е.А. — канд. техн. наук, доцент кафедры обогащения полезных ископаемых ИЦМиМ, СФУ;
науч. сотр. ИХХТ СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН. E-mail: kate-groo@yandex.ru.

Усманова Н.Ф. — канд. техн. наук, науч. сотр. ИХХТ СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН; доцент кафедры обогащения полезных ископаемых ИЦМиМ, СФУ. E-mail: usmanowa.natalia@yandex.ru.

Кинякин А.И. — аспирант кафедры обогащения полезных ископаемых ИЦМиМ, СФУ.
E-mail: mrak81083@mail.ru.

Для цитирования: Брагин В.И., Бурдакова Е.А., Усманова Н.Ф., Кинякин А.И. Комплексная оценка флотационных реагентов по их влиянию на потери металлов и селективность флотации. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2021. Т. 27. No. 5. С. 4–12. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2021-5-4-12.

Comprehensive assessment of flotation reagents by their influence on metal losses and flotation selectivity

V.I. Bragin^{1,2}, E.A. Burdakova^{1,2}, N.F. Usmanova^{2,1}, A.I. Kinyakin¹

¹ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

² Institute of Chemistry and Chemical Technology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences of Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center» of the SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

Received 01.07.2021, revised 26.07.2021, accepted for publication 09.08.2021

Abstract: The paper proposes a method for quick estimation of the average floatability of minerals according to the kinetic experiment, without finding the flotation spectrum where first moments of distribution are calculated by the coefficients of the polynomial approximation of the kinetic curve in the logarithmic form. An example of copper-nickel ore demonstrated that this method is effective in the multiparameter problem of comparative assessment of reagents. The ten parameters assessed included the average floatability of target minerals (chalcopyrite and pentlandite), pyrrhotite and rock; flotation selectivity coefficients of target minerals relative to pyrrhotite and rock; levels of copper and nickel losses with bulk flotation tailings. Interdependencies of parameters were visualized using diagrams showing the effect of flotation reagents on the groups of parameters: average floatability, selectivity coefficients, metal losses and selectivity relative to rock. The influence of butyl xanthate, aerofloat, diesel fuel, as well as gangue depressants — carboxymethyl cellulose (CMC) and acidified water glass (with a total consumption of collectors, diesel fuel, acidified water glass and CMC of 130 g/t, 5–10 g/t, 200 g/t, and 500 g/t, respectively) on the estimated parameters under collective flotation conditions was determined. It was found that the addition of aerofloat and diesel fuel to the main reagent collector — xanthate — increases the flotation selectivity of pentlandite and chalcopyrite relative to pyrrhotite and rock-forming component. The introduction of acidified water glass into the reagent scheme increases the flotation selectivity of nickel and copper sulfides relative to the rock. CMC additives impair the selectivity of copper flotation. The quantitative effects of each individual parameter were taken into account in the integral rating assessment of the prospects of using reagent combinations for copper-nickel ore by a set of ten parameters. The method proposed can be further used for the mass comparative evaluation of flotation reagents.

Keywords: flotation kinetics, flotation spectrum, moments of distribution, Laplace transformation, polynomial approximation, flotation selectivity coefficients, copper-nickel ores.

Bragin V.I. — Dr. Sci. (Eng.), prof., head of the Department of mineral processing of the School of Non-Ferrous Metals and Material Science of the Siberian Federal University (SNFMMS, SibFU) (660025, Russia, Krasnoyarsk, pr. Krasnoyarskii rabochii, 95); leading researcher of the Institute of Chemistry and Chemical Technology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ICCT SB RAS) (660036, Russia, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50/24), Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center» of the SB RAS. E-mail: vic.bragin@gmail.com.

Burdakova E.A. — Cand. Sci. (Eng.), associate prof. of the Department of mineral processing, SNFMMS, SibFU; researcher of the ICCT SB RAS, Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center» of the SB RAS. E-mail: kate-groo@yandex.ru.

Usmanova N.F. — Cand. Sci. (Eng.), researcher of the ICCT SB RAS, Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center» of the SB RAS; associate prof. of the Department of mineral processing, SNFMMS, SibFU. E-mail: usmanowa.natalia@yandex.ru.

Kinyakin A.I. — postgraduate student of the Department of mineral processing, SNFMMS, SibFU. E-mail: mrak81083@mail.ru.

For citation: Bragin V.I., Burdakova E.A., Usmanova N.F., Kinyakin A.I. Comprehensive assessment of flotation reagents by their influence on metal losses and flotation selectivity. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy)*. 2021. Vol. 27. No. 5. P. 4–12 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2021-5-4-12.

Введение

При оптимизации флотационной технологии возникает проблема компромисса между желанием максимально снизить потери металла с хвостами и получить в простой схеме флотации богатый концентрат, так как определяющая качество концентрата селективность флотации и собирательная способность реагентного режима в известной степени противоположны. Для руд, содержащих несколько полезных компонентов, которые перерабатываются по развитым селективным и коллективно-селективным схемам,

задача особенно сложна, если оценивать селективность реагентов непосредственно по качеству пенных продуктов.

В настоящей работе предлагается проводить комплексную оценку действия реагентов одновременно по уровню потерь ценного компонента с хвостами и по кинетическим характеристикам флотации различных минералов руды. Кинетика флотации — многофакторный процесс, на который влияют много составляющих: крупность флотируемых зерен [1–5], форма частиц [6, 7], размер

пузырька [8], гидрофобность минеральной поверхности [9], реагентный режим [10–12].

Впервые идея моделирования на основе использования распределения минеральных частиц по константе скорости флотации первого порядка (спектра флотиремости) была предложена в работе [13]. В дальнейшем подход получил широкое развитие. Методика исследования спектра флотиремости, примененная в данной работе, базируется на зависимости кинетики флотации от фракционного состава [14, 15]:

$$\bar{\gamma}(t) = (1 - \int_0^{\infty} e^{-kt} \gamma(k) dk)(1 - \gamma_0) = (1 - L[\gamma(k)])(1 - \gamma_0), \quad (1)$$

или

$$L[\gamma(k)] = 1 - \bar{\gamma}(t)/(1 - \gamma_0), \quad (2)$$

$$\gamma_u(k) = \gamma_0 \delta(k) + (1 - \gamma_0) \gamma(k), \quad (3)$$

где k — константа скорости флотации (флотиремость), 1/мин; $\gamma_u(k)$ — спектр флотиремости материала; $\gamma(k)$ — регулярная составляющая спектра флотиремости; γ_0 — сингулярная составляющая спектра флотиремости (нефлотиремый остаток); $L[\gamma(k)]$ — преобразование Лапласа функции $\gamma(k)$; $\bar{\gamma}(t)$ — кинетика флотации (извлечение или выход компонента в пену); $\gamma(k)$ — дельта-функция Дирака.

Методика экспериментального исследования

Исследование проведено на медно-никелевой руде, основные рудные минералы представлены халькопиритом, пентландитом, пирротинном. В породообразующей составляющей преобладают кварц, амфиболы, слоистые силикаты, оливин, гидроксиды железа. Моделировалась основная операция коллективной флотации. Крупность помола перед флотацией — 58–60 % класса –0,044 мм. Флотационные опыты проведены на лабораторной флотомашине 237 ФЛ с объемом камеры 0,75 л. Для снятия кинетических характеристик осуществлялся фракционный съём пены в моменты времени от 15 с до 40 мин. Пенные и камерный продукты анализировались рентгенофлуоресцентным методом с определением массовой доли меди, никеля, серы. Содержание минералов (халькопирита, пентландита, пирротина) определялось пересчетом данных элементного анализа с исполь-

зованием содержаний элементов в минералах, установленных микронзондовым анализом. Содержание породы было определено как остаточное от указанных трех минералов.

Исследовалось влияние на флотацию добавок к ксантогенату реагентов — собирателей аэрофлота и дизельного топлива, а также депрессоров — карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ) и подкисленного жидкого стекла (ЖС). В качестве базового реагентного режима принят флотационный режим коллективной флотации, включающий следующие расходы реагентов: бутиловый ксантогенат калия — 85 г/т, аэрофлот НБА — 45 г/т. Дозировались к базовому режиму дополнительно аполярный собиратель (дизельное топливо) в количестве 5 и 10 г/т и депрессоры — КМЦ [16] и ЖС [17] в количестве 200 и 500 г/т соответственно. Проведено сравнение с флотацией одним бутиловым ксантогенатом калия в присутствии вспенивателя Т-92 с расходом 60 г/т.

Обработка и анализ экспериментальных данных

Математическая обработка экспериментальной кинетики флотации проводилась двумя методами, отличающимися по сложности и объему получаемых данных. Задача нахождения распределения флотиремости k (спектра флотиремости) по кинетике флотации представляет собой задачу обращения преобразования Лапласа этого распределения [18]. Методы обращения преобразования Лапласа детально разработаны в работе [19]. Как и многие обратные задачи, обращение преобразования Лапласа относится к некорректным [20]. На практике это означает, что при реально достижимой точности и воспроизводимости флотационного эксперимента обычные методы обращения будут давать неустойчивое решение. Необходимо использование в той или иной форме методов регуляризации. В общей форме такой алгоритм применен, например, в [21]. Обзор методов обращения преобразования Лапласа при исследовании флотационной кинетики и решение задачи методом разложения по полиномам Лагерра даны в работе [22].

Существуют более простые методы получения устойчивого решения уравнения (1), основанные на аппроксимации ожидаемого распределения какой-либо удобной функцией, на основе априорных предположений о виде спектра флотиремо-

сти. Часто используют аппроксимацию гамма-функцией, которая удовлетворительно аппроксимирует распределения многих свойств минеральных частиц [13, 23]. Использовались также другие аппроксимирующие функции. Решение уравнения в этом случае сводится к нахождению параметров соответствующего распределения.

Так как предшествующие исследования показали наличие в медно-никелевой руде двух существенно различающихся по скорости флотации составляющих, то в качестве модельного было принято бимодальное гамма-распределение [24]. Спектр флотиремости и кинетика флотации в этой модели представлены следующими выражениями:

$$\gamma_u(k) = \gamma_0 \delta(k) + (1 - \gamma_0) \times \left[\gamma_1 \frac{k^{p_1-1}}{\Gamma(p_1)} a_1^{-p_1} e^{-k/a_1} + \gamma_2 \frac{k^{p_2-1}}{\Gamma(p_2)} a_2^{-p_2} e^{-k/a_2} \right], \quad (4)$$

$$\bar{\gamma}(t) = (1 - \gamma_0) \left[\gamma_1 \left(1 - \left(\frac{1}{1 + a_1 t} \right)^{p_1} \right) + \gamma_2 \left(1 - \left(\frac{1}{1 + a_2 t} \right)^{p_2} \right) \right], \quad (5)$$

где Γ — гамма-функция Эйлера.

Подгонка модели выполнялась подбором параметров a_1 , a_2 , p_1 , p_2 , γ_1 . Индексы при параметрах соответствуют номерам фракций: фракция 1 — материал с более высокой скоростью флотации, фракция 2 — с более низкой. Нефлотиремый остаток определялся экспериментально при максимальном времени флотации 40 мин.

На рис. 1 и 2 приведены результаты расчетов: спектры флотиремости и фракционный состав минералов для одного из опытов, иллюстрирующие возможности метода. Среднее отклонение модельной кинетики от экспериментальных данных не превышает 2 отн.%. Наиболее значительные отклонения (до 10 %) наблюдаются при времени флотации 15 с, т.е. в самом начале процесса, когда уровень и скорость выхода пены неустойчивы.

Таким образом, аппроксимация спектра флотиремости адекватной моделью, которой в данном случае являлось бимодальное гамма-распределение, позволяет получить развернутую и подробную информацию о фракционном составе материала. Однако в случае массового исследования такой состав информации представляется избыточным. Он затрудняет анализ результатов и увеличивает трудоемкость расчетов.

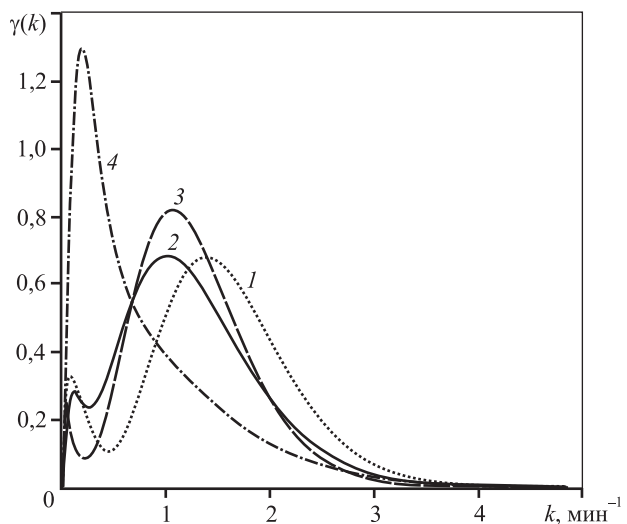


Рис. 1. Спектры флотиремости минералов

1 — халькопирит; 2 — пентландит; 3 — пирротин; 4 — порода

Fig. 1. Flotation spectra of minerals

1 — chalcopyrite; 2 — pentlandite; 3 — pyrrhotite; 4 — rock

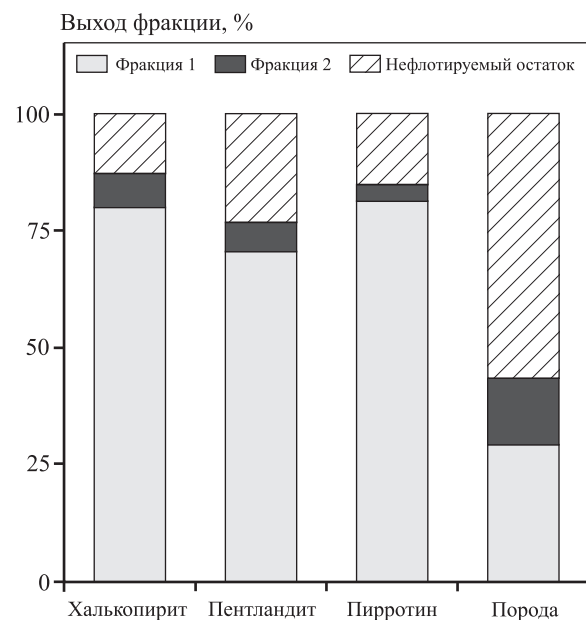


Рис. 2. Фракционный состав питания флотации

Fig. 2. Particle size distribution of flotation feed

При постановке исследований о влиянии реагентного режима на кинетику флотации сведения о законе распределения флотиремости в большинстве случаев избыточны. Для укрупненной оценки, как будет показано далее, достаточно определения средней флотиремости минерала

(первого момента спектра флотуемости). Эта задача, в отличие от общей, является корректно поставленной, что позволяет получать устойчивую оценку без использования модельного спектра даже в условиях значительных погрешностей флотационного кинетического опыта.

Использованная методика вычисления моментов спектра флотуемости основывается на взаимосвязи преобразования Лапласа $L[\gamma(k)]$ и производящей функции моментов $M(t)$ спектра флотуемости [25]:

$$M(t) = \int_0^{\infty} e^{kt} \gamma(k) dk, \quad (6)$$

$$L[\gamma(k)] = M(-t). \quad (7)$$

Логарифм производящей функции моментов раскладывается в степенной ряд:

$$\ln[M(t)] = \sum_{i=1}^{\infty} \chi_i t^i / i!, \quad (8)$$

где χ_i — i -й семиинвариант распределения $\gamma(k)$.

Таким образом, учитывая (2), получаем

$$\ln\left(1 - \frac{\bar{\gamma}(t)}{1 - \gamma_0}\right) = \sum_{i=1}^{\infty} \chi_i \frac{(-t)^i}{i!}, \quad (9)$$

или

$$\ln\left(\frac{1 - \gamma_0}{1 - \gamma_0 - \bar{\gamma}(t)}\right) = -\sum_{i=1}^{\infty} \chi_i \frac{(-t)^i}{i!}. \quad (10)$$

Полученное выражение соответствует принятой в обогащении традиции представления кинетики флотации в логарифмической форме и делает прозрачным физический смысл коэффициентов разложения. Используя определения семиинвариантов, можно записать:

$$\ln\left(\frac{1 - \gamma_0}{1 - \gamma_0 - \bar{\gamma}(t)}\right) = \bar{k}t - \sigma^2 \frac{t^2}{2} + g_1 \sigma^2 \sqrt{\sigma^2} \frac{t^3}{6}, \quad (11)$$

где $\bar{k}$ — математическое ожидание флотуемости k (средняя флотуемость); σ^2 — дисперсия флотуемости k ; g_1 — коэффициент асимметрии распределения $\gamma(k)$.

Таким образом, предложенная формула позволяет находить математическое ожидание, дисперсию, коэффициент асимметрии и другие характеристики спектра флотуемости по коэффициентам полинома, аппроксимирующего кривую кинетики флотации в логарифмической форме.

В качестве показателей селективности далее использовано отношение средней флотуемости минералов в парах:

— халькопирит (пентландит)/пирротин — селективность по пирротину;

— халькопирит (пентландит)/порода — селективность по породе

Обсуждение результатов

По полученной в эксперименте кинетике флотации в каждом реагентном режиме рассчитаны средние флотуемости минералов, коэффициенты селективности флотации халькопирита и пентландита относительно пирротина и породы, определены содержания в камерном продукте меди и никеля.

На рис. 3–5 отображена средняя флотуемость минералов, коэффициенты селективности и потери металлов с хвостами соответственно. Каждая точка на диаграмме представляет кинетический флотационный опыт. В качестве начальной точки выбран флотационный режим на основе ксантогената и пенообразователя (ButX + T-92). Модификация этого режима — замена пенообразователя и части ксантогената аэрофлотом (ButX + Аэрофлот). Остальные опыты — добавки подкисленного жидкого стекла, КМЦ или дизельного топлива (ДТ) к этой собирательной смеси. Развитие реагентного режима от ксантогената и вспенивателя к более сложным составам представлено соединительными стрелками. Ход каждой линии

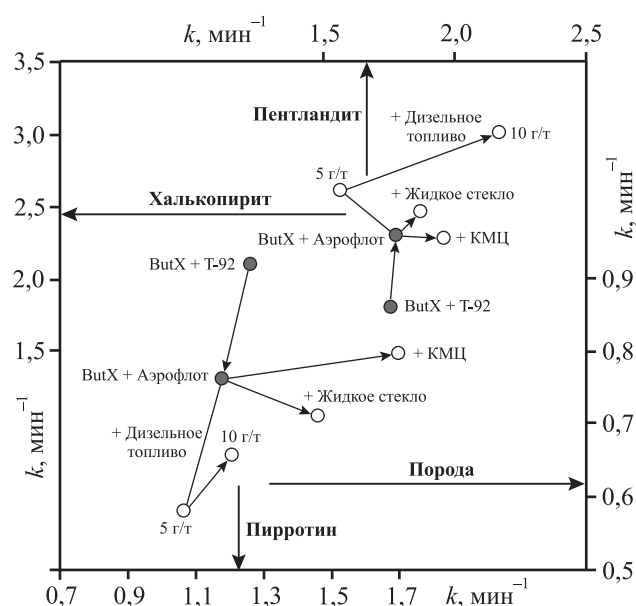


Рис. 3. Влияние реагентов на флотуемость минералов

Fig. 3. Influence of reagents on the floatability of minerals

показывает изменение одновременно двух параметров: средней флотуемости двух минералов (рис. 3), селективности по породе и пирротину (рис. 4) или селективности по породе и потерь металлов в хвостах (рис. 5). Для удобства также стрелками указаны числовые оси, на которых отображены соответствующие параметры.

Данные рис. 3 показывают, что добавки всех исследованных реагентов увеличивают флотуемость халькопирита. Флотуемость пентландита при изменении расхода аполярного собирателя изменяется неоднозначно, а добавка депрессоров несколько увеличивает скорость его флотации. Флотуемость породы при добавлении как собирателей, так и депрессоров снижается. Добавки аполярного собирателя неоднозначно влияют на флотуемость пирротина. Добавки депрессоров повышают флотуемость пирротина и пентландита.

Данные об изменении флотуемости минерала еще не позволяют сделать выводы о селективности процесса или уровне потерь металлов. Дополнительную информацию предоставляют коэффициенты селективности, определяемые как отношение флотуемостей целевых минералов и породы либо пирротина (рис. 4).

Данные рис. 4 показывают, что добавки всех исследованных собирателей (аэрофлота и дизельного топлива) увеличивают селективность флотации как пентландита, так и халькопирита относительно как пирротина, так и породы. В целом, наилучшие результаты по селективности демонстрирует совместное использование ксантогената, аэрофлота и дизельного топлива. Селективность аэрофлота может быть интерпретирована известным механизмом совместного действия собирателей с различными функциональными группами. Селективность дизельного топлива объясняется традиционным механизмом действия аполярных собирателей — закрепление на гидрофобных зернах и ускорение их флотации.

Действие депрессоров на селективность флотации неоднозначно. Жидкое стекло увеличивает селективность по породе для обоих металлов. КМЦ ухудшает селективность флотации в случае халькопирита и несколько улучшает в случае пентландита. Оба депрессора значительно ухудшают селективность флотации по отношению к пирротину. В сопоставлении с рис. 3 это связывается со значительным повышением флотуемости пирротина.

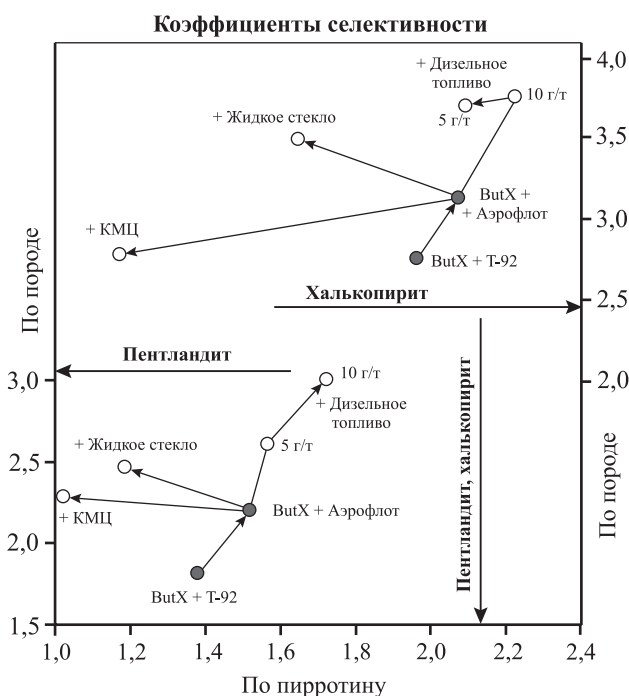


Рис. 4. Влияние реагентов на коэффициенты селективности флотации халькопирита и пентландита относительно пирротина и породы

Fig. 4. Influence of reagents on chalcopyrite and pentlandite flotation selectivity coefficients with respect to pyrrhotite and rock

Дополнительную информацию дает сопоставление селективности по породе и уровню потерь с хвостами (рис. 5). Данные этой диаграммы демонстрируют снижение потерь при использовании сочетаний собирателей, причем наибольший вклад вносит применение аэрофлота. Действие жидкого стекла на потери металлов различно для меди и никеля: потери меди существенно снижаются, а потери никеля остаются на прежнем уровне, что свидетельствует о различном характере потерь этих двух минералов. Действие КМЦ на потери металлов незначительно.

Выводы о выявленном многоплановом действии флотационных реагентов при коллективной флотации медно-никелевой руды удобно суммировать в виде рейтинговой оценки (см. таблицу). Оценка выполнена по следующим характеристикам действия реагентов: повышение скорости флотации минерала, увеличение селективности флотации металлов к пирротину и породе, снижение потерь металлов с хвостами. Рейтинговые оценки варьируют от уровня «— — —» (сильный

Рейтинговая оценка исследованных реагентов

Rating of reagents studied

Реагент	Повышение скорости флотации				Повышение селективности				Снижение потерь с хвостами	
					к пирротину		к породе			
	Cu	Ni	пирротина	породы	Cu	Ni	Cu	Ni	Cu	Ni
Аэрофлот	++	0 +	—	— — —	++	++	++	++	+++	+++
ДТ	+++	++	—	— — —	++	++	++	+++	0 —	0
КМЦ	0	+	+++	+	— — —	— —	—	0 +	0	0
ЖС	+	+	++	— —	— —	— —	++	+	++	0 —

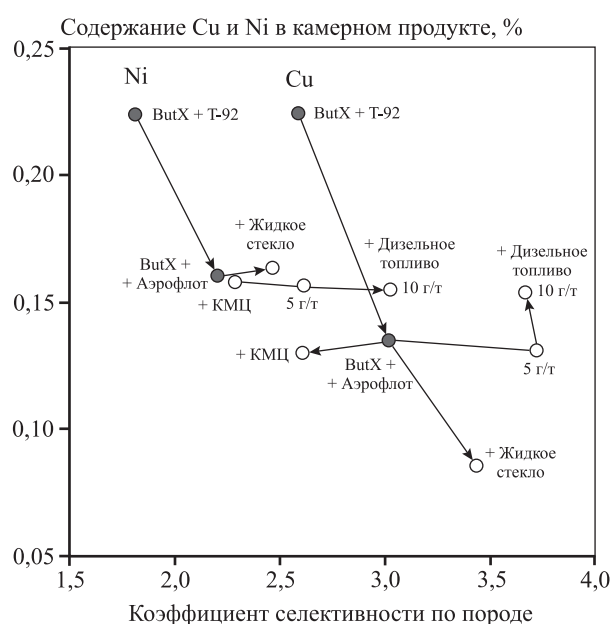


Рис. 5. Влияние реагентов на коэффициенты селективности флотации халькопирита и пентландита относительно породы и на потери металлов с хвостами

Fig. 5. Influence of reagents on chalcopyrite and pentlandite flotation selectivity coefficients with respect to rock and on metal losses with tailings

отрицательный эффект) до уровня «+++» (сильный положительный эффект). Оценка «+—» означает небольшое разнонаправленное влияние при разных расходах, оценки «0 +» и «0 —» — отсутствие действия или слабое положительное или отрицательное действие соответственно. Для удобного сопоставления показателей учтено, что в рамках использованной модели вещественного состава, где медь представлена полностью халькопиритом, а никель — пентландитом, скорость флотации меди равна скорости флотации халько-

пирита, а скорость флотации никеля равна скорости флотации пентландита. Поэтому скорость флотации и селективность отнесены к соответствующему металлу.

Выполненная рейтинговая оценка позволяет оценить перспективы различных реагентных режимов применительно к последующим исследованиям и разработке промышленной схемы. Однозначный вывод можно сделать относительно перспективы использования карбоксиметилцеллюлозы. Действие КМЦ на селективность по породе при незначительном количестве слоистых силикатов в руде незначительно, но существенно повышается скорость флотации пирротина и падают соответствующие индексы селективности. Дальнейшие работы с этим реагентом нецелесообразны.

Наиболее универсальным реагентом в этой связи представляется аэрофлот. Он повышает селективность флотации как халькопирита, так и пентландита по отношению как к пирротину, так и к породе. При этом он значительно снижает потери металлов с хвостами. Использование добавок дизельного топлива к смеси ксантогената и аэрофлота с расходом 5–10 г/т обеспечивает существенный прирост селективности при сохранении уровня потерь с хвостами. Однако применение этого реагента может оказать отрицательное влияние на последующую селекцию коллективного концентрата, если она будет проводиться. Не исключено, что одновременное применение подкисленного жидкого стекла дополнительно улучшит показатели селективности и потерь меди.

Для полного использования возможностей повышения селективности флотации необходимо изменение конфигурации схемы коллективного цикла.

Выводы и рекомендации

На примере исследований в коллективной флотации медно-никелевой руды предложен метод быстрой оценки средней флотуемости минералов по данным кинетического опыта, при котором первые моменты распределения вычисляются по коэффициентам полиномиальной аппроксимации логарифмической формы кинетики.

Оценены 10 параметров: средняя флотуемость целевых минералов (халькопирита и пентландита), пирротина и породы; коэффициенты селективности флотации целевых минералов относительно пирротина и породы; уровни потерь меди и никеля с хвостами коллективной флотации. По результатам проведенных исследований ранжированы эффекты испытанных реагентов — аэрофлота, дизельного топлива, жидкого стекла и КМЦ. Установлено, что селективность флотации пентландита и халькопирита относительно пирротина и породообразующей составляющей достигается за счет введения в реагентный режим к основному реагенту-собирателю (ксантогенату) аэрофлота и дизельного топлива. Добавки в реагентный режим депрессоров пустой породы, в частности подкисленного жидкого стекла, увеличивают селективность флотации сульфидов никеля и меди относительно минералов породы, в то время как введение КМЦ снижает селективность флотации меди.

Проведенная комплексная оценка флотационных реагентов с одновременным использованием характеристик потерь металлов в камерном продукте и индексов селективности флотации ценных минералов относительно пирротина и породы позволила систематизировать сведения о потенциале применения флотационных реагентов. Невысокая трудоемкость и надежность предложенного метода, относительно известного метода вычисления полного спектра флотуемости с последующим расчетом средней флотуемости, позволяют рекомендовать его для массовых сравнительных испытаний реагентов.

Исследование выявило возможности повышения селективности коллективной флотации медно-никелевой руды. В условиях простейшего коллективного цикла, включающего одну—две операции, реализовать потенциальную селективность невозможно. В этой связи можно рекомендовать постановку исследований более развитой флотационной схемы, предполагающей возможность выделения

потока материала, концентрирующего нераскрытые сростки минералов для последующего доизмельчения и перефлотации. Такая схема позволит реализовать выявленные возможности реагентов и повысить качество коллективного концентрата.

Работа выполнена в рамках проекта № 0287-2021-0014.

Acknowledgments: *The research was conducted under Project № 0287-2021-0014.*

Литература/References

1. Ai G., Yang X., Li X. Flotation characteristics and flotation kinetics of fine wolframite. *Powder Technol.* 2017. Vol. 305. P. 377—381. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2016.09.068>.
2. Yalcin E., Kelebek S. Flotation kinetics of a pyritic gold ore. *Int. J. Miner. Process.* 2011. Vol. 98. P. 48—54. DOI: 10.1016/j.minpro.2010.10.005.
3. Zhang J., Subasinghe N. Development of a flotation model incorporating liberation characteristics. *Miner. Eng.* 2016. Vol. 98. P. 1—8. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2016.05.021>.
4. Rahman R.M., Ata S., Jameson G.J. The effect of flotation variables on the recovery of different particle size fractions in the froth and the pulp. *Int. J. Miner. Process.* 2012. Vol. 106—109. P. 70—77. DOI: 10.1016/j.minpro.2012.03.001.
5. Vinnett L., Marion C., Grammatikopoulos T., Waters K.E. Analysis of flotation rate distributions to assess erratic performances from size-by-size kinetic tests. *Miner. Eng.* 2020. Vol. 149. Art. 106229. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106229>.
6. Szczerkowska S., Wiertel-Pochopien A., Zawala J., Larsen E., Kowalczyk P.B. Kinetics of froth flotation of naturally hydrophobic solids with different shapes. *Miner. Eng.* 2018. Vol. 121. P. 90—99. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.03.006>.
7. Ma G., Xia W., Xie G. Effect of particle shape on the flotation kinetics of fine coking coal. *J. Cleaner Product.* 2018. Vol. 195. P. 470—475. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.230>.
8. Eskanolou A., Huang Q., Chegeni M. H., Khalesi M. R., Abdollahy M. Determination of the mass transfer rate constant in a laboratory column flotation using the bubble active surface coefficient. *Miner. Eng.* 2020. Vol. 156. Art. 106521. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106521>.
9. Kowalczyk P.B., Zawala J. A relationship between time of three-phase contact formation and flotation kinetics of naturally hydrophobic solids. *Colloids Surf., A.* 2016. Vol. 506. P. 371—377. <http://dx.doi.org/10.1016/j.colsurfa.2016.07.005>.

10. Николаев А.А., Со Ту, Горячев Б.Е. Исследование закономерностей кинетики флотации неактивированного сфалерита композициями сульфгидрильных собирателей флотометрическим методом. *ГИАБ*. 2015. No. 9. С. 86—95.
Nikolaev A.A., So Tu, Goryachev B.E. Investigation of the regularities of the kinetics of flotation of non-activated sphalerite with compositions of sulfhydryl collectors by the flotation method. *GIAB*. 2015. No. 9. P. 86—95 (In Russ.).
11. Zhu H., Li Y., Lartey C., Li W., Qian G. Flotation kinetics of molybdenite in common sulfate salt solution. *Miner. Eng.* 2020. Vol. 148. Art. 106182. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106182>.
12. Wang Z., Si J., Song Z., Zhang P., Wang J., Hao Y., Li W., Zhang P., Miao S. Precise and instrumental measurement of thermodynamics and kinetics of froth flotation by langmuir-blodgett technique. *Colloids Surf., A*. 2020. Vol. 605. Art. 125337. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.125337>.
13. Imaizumi T., Inoue T. Kinetic considerations of froth flotation. In: *Proc. 6th Int. Mineral Processing Congress (Cannes)*. 1963. P. 581—593.
14. Тихонов О.Н. Закономерности эффективного разделения минералов в процессах обогащения полезных ископаемых. М.: Недра, 1984.
Tikhonov O.N. Regularities of the effective separation of minerals in the processes of mineral processing. Moscow: Nedra, 1984 (In Russ.).
15. Рубинштейн Ю.Б., Филиппов Ю.А. Кинетика флотации. М.: Недра, 1980.
Rubinshtein Yu.B., Filippov Yu.A. Flotation kinetics. Moscow: Nedra, 1980 (In Russ.).
16. Sibanda V., Khan R., Danha G. The effect of chemical reagents on flotation performance of a pentlandite ore: An attainable region approach. *Powder Technol.* 2019. Vol. 352. P. 462—469. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.04.062>.
17. Feng B., Zhang W., Guo Y., Peng J., Ning X., Wang H. Synergistic effect of acidified water glass and locust bean gum in the flotation of a refractory copper sulfide ore. *J. Cleaner Product.* 2018. Vol. 202. P. 1077—1084. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.214>.
18. Kapur P.C., Mehrotra S.P. Estimation of the flotation rate distributions by numerical inversion of the Laplace transform. *Chem. Eng. Sci.* 1974. Vol. 29. P. 411—415.
19. Рябов В.М. Численное обращение преобразования Лапласа. СПб.: Изд-во СПбУ, 2013.
Ryabov V.M. Numerical inversion of the Laplace transform. St. Petersburg: St. Petersburg University Press, 2013 (In Russ.).
20. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. 3-е изд. М.: Наука, 1986.
Tikhonov A.N., Arsenin V.Ya. Methods for solving ill-posed problems. 3rd ed. Moscow: Nauka, 1986 (In Russ.).
21. Коновалов С.А., Тихонов О.Н. Флотометрический анализ с применением вариационного принципа в методе регуляризации. *Цветная металлургия*. 1982. No. 1. С. 100—105.
Kononov S.A., Tikhonov O.N. Flotometric analysis using the variational principle in the regularization method. *Tsvetnaya metallurgiya*. 1982. No. 1. P. 100—105 (In Russ.).
22. Pascual R.L., Whiten W.J. The determination of floatability distribution from laboratory batch cell tests. *Miner. Eng.* 2015. Vol. 83. P. 1—12. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.08.007>.
23. Harris C.C., Chakravarti A. Semi-batch froth flotation kinetics: species distribution analysis. *Trans.-Soc. Min. Eng., AIME*. 1970. Vol. 247. P. 162—172.
24. Bu Xiangning, Xie Guangyuan, Peng Yaoli, Ge Linhan, Ni Chao. Kinetics of flotation. Order of process, rate constant distribution and ultimate recovery. *Physicochem. Probl. Miner. Process.* 2016. Vol. 53. P. 342—365.
25. Королюк В.С., Портенко Н.И., Скороход А.В., Турбин А.Ф. Справочник по теории вероятностей и математической статистике. М.: Наука, 1985.
Korolyuk V.S., Portenko N.I., Skorokhod A.V., Turbin A.F. Handbook of probability and mathematical statistics. Moscow: Nauka, 1985 (In Russ.).