

УДК 622.765.061

**ПОВТОРНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТОЧНЫХ ВОД
ПРИ ФЛОТАЦИИ ПОЛИСУЛЬФИДНЫХ РУД**

А. Абиди¹, Х. Бужуне², Х. Эль-Амари³, А. Бакае¹, А. Якуби¹

¹Марракешский горный институт, В. Р. 2402, 40000, г. Марракеш, Марокко

²Факультет наук, отделение химии, В. Р. 2390, 40000, г. Марракеш, Марокко

³Лаборатория георесурсов, факультет науки и техники,
E-mail: k.elamari@uca.ma, В. Р. 549, 40000, г. Марракеш, Марокко

Марокканская горная компания, производящая три вида концентрата, испытывает проблему дефицита воды и вынуждена принять меры по снижению ее потребления путем повторного применения сточных вод. В результате замены амилового ксантогената калия на Aerophine 3418A в схеме переработки цинка получается отработанная вода с некоторым содержанием собирателя, который можно легко контролировать и повторно использовать на предприятии. Показано, что целевая замена амилового ксантогената калия на фабрике возможна при следующих условиях: время флотации 5 мин; 40 г/т реагента; 200 г/т CuSO₄ и pH 12. К тому же Aerophine 3418A более селективен в отношении железа, чем амиловый ксантогенат калия. Извлечение цинка достигало 72 %.

Aerophine 3418A, флотация, оптимизация, амиловый ксантогенат калия (PAX), полусушильный климат, замена флотореагента, повторное использование воды

DOI: 10.15372/FTPRPI20190417

Переработка комплексных руд, содержащих Pb-Cu-Zn сульфиды, начинается с выделения Cu-Pb, затем сфалерита, который не флотируется традиционным образом при малом времени обработки и требует активизации ионами Cu², Ag⁺, Pb² [1]. Ионы Cu² могут активировать сфалерит и пирит в зависимости от концентрации меди, pH, поверхностного заряда, степени предварительного окисления, качества воды и загрязнений [2–7]. Поверхностная активация вызывает реакцию замещения цинка активирующим ионом, а образование гидроксильных комплексов блокирует этот механизм в щелочной среде [7]. Пирротит — минерал сульфида железа, влияющий на степень концентрации Cu, Pb и Zn. Его естественная флотируемость зависит от степени окисления и pH среды [8, 9]. Ионы Cu²⁺ улучшают переработку пирротита путем образования на его поверхности CuS в кислой среде и Cu(OH)₂ в щелочной [8, 10].

Пенная флотация сульфидных минералов может происходить естественным способом, т. е. стимулировать их окисление с формированием гидрофобной пленки на поверхности, или с помощью адсорбции собирателя [11]. Гидроокись металла и сульфаты являются гидрофилами и приводят к дисперсии флотации минералов. Дополнительные активация и обработка минералов означают строгий контроль качества технологической воды, так как это влияет на работу обогатительной фабрики [11–16]. Кроме того, существуют трудности повторного использования остаточной воды при флотации, например, цинка и для обработки Cu и Pb.

Марокканская горная компания, производящая полиметаллическое месторождение в Марокко (пирротит, ассоциированный с сульфидами Cu, Pb и Zn), столкнулась с проблемой повторного использования воды. Первым на обогатительной фабрике получают галенитовый концентрат, применяя Aerophine 3418A и NaCN при pH 11.3, затем халькопирит A3418 при pH 8.9 и сфалеритовый концентрат амилового ксантогената калия при pH 12.0–12.5.

Оборотная вода используется в соответствии с поверхностными реакциями определенных минералов, т. е. для Pb и Cu берется вода от их переработки, то же самое и для цинка. По экономическим причинам и из-за дефицита воды в полусухом климате страны проблема обработки технологической воды весьма значима. Отметим, что ее суточное потребление на обогатительной фабрике составляет 4700 м³, из которых 25% поступает из прудов-отстойников, остальной объем добывается из водоотлива рудников и дамбы, расположенных в нескольких километрах [17]. Несмотря на имеющуюся эффективность флотации и большой расход воды, замена амилового ксантогената калия на Aerophine 3418A в схеме переработки цинка может быть альтернативным решением, когда один собиратель используется во всей цепочке производства. Такая технология улучшит степень применения и контроль отработанной воды. Результаты подтверждено, что Aerophine 3418A более эффективен при извлечении цинка, чем амиловый ксантогенат калия, а остаточную концентрацию последнего необходимо контролировать в оборотной воде, прежде чем употреблять при флотации галенита [18, 19].

Цель настоящей работы — уменьшение объема использования чистой воды при флотации на обогатительной фабрике с возможностью замены амилового ксантогената калия на Aerophine 3418A в лабораторных условиях. Выполнено сравнение эффективности этих собирателей при извлечении цинка и их селективности относительно железа. Так как механизм пенной флотации сульфидов с этими реагентами хорошо изучен, основное внимание уделено экспериментальным результатам, показывающим, насколько Aerophine 3418A продуктивнее амилового ксантогената калия.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Лабораторные тесты проводились на характерных образцах в виде пульпы, взятых на обогатительной фабрике. Образец d80 (70 мкм) перевозился в пластиковом контейнере и хранился при температуре ~4 °C. Флотореагенты — амиловый ксантогенат калия, Aerophine 3418A, метилизобутилкарбинол (MIBC), NaOH, CuSO₄. Aerophine 3418A является собирателем, сочетающим способность выделять сульфиды Pb, Cu, Zn, и обладает селективностью дитиофосфатов в отношении сульфидов железа [20–22].

Для экспериментов применялась флотомашинка Denver емкостью 1.5 л. Объем пульпы сохранялся постоянным, а ее масса измерялась при плотности ~1.54 (концентрация по твердому веществу 45%). Время флотации 10 мин при съеме пены через каждые 30 с. Скорость перемешивания достигала 1000 об./мин. Последовательность добавления реагентов и время кондиционирования до проведения каждого теста приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Время кондиционирования и назначение реагентов

| Последовательность добавления реагента | Реагент | Назначение | Время кондиционирования, мин |
|--|--|----------------------|------------------------------|
| 1 | CuSO ₄ | Активация сфалерита | 2.0 |
| 2 | NaOH | Регулирование pH | — |
| 3 | Aerophine 3418A или амиловый ксантогенат калия | Собиратель сфалерита | 1.5 |
| 4 | Метилизобутилкарбинол | Пенообразователь | 0.5 |

После каждого эксперимента концентрат и отходы взвешивались, высушивались и химически анализировались методом атомно-адсорбционной спектроскопии. Извлечение цинка и железа из полученных образцов рассчитывалось в соответствии с уравнением $R = 100(Ct_c / At_f)$, где R — извлечение металла, %; t_c, t_f — содержание металла в концентрате и исходном продукте, %; C, A — вес концентрата и исходного продукта.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для сравнения эффективности извлечения сфалерита и его селективности из сульфидов железа на обогатительной фабрике проведена серия промышленных испытаний для флотоагентов Aerophine 3418A и амилового ксантогената калия (табл. 2). Время обработки в каждом эксперименте составляло 2, 3, 4, 5, 6 мин, общая продолжительность флотации — 20 мин.

ТАБЛИЦА 2. Параметры экспериментов по флотации с применением Aerophine 3418A и амилового ксантогената калия, г/т

| Собиратель | Потребление | CuSO ₄ | Метилизобутилкарбинол | pH |
|----------------------------|-------------|-------------------|-----------------------|----|
| Aerophine 3418A | 60 | | | 10 |
| Aerophine 3418A | 60 | | | 11 |
| Aerophine 3418A | 60 | 450 | 20 | 12 |
| Амиловый ксантогенат калия | 250 | | | 12 |

Для вычисления извлечения цинка и железа в математической модели использовалось кинетическое уравнение первого порядка:

$$R_t = R_u(1 - e^{-kt}), \tag{1}$$

здесь R_t — извлечение цинка или железа за время t , %; R_u — конечное суммарное извлечение металла, %; k — константа скорости, мин⁻¹.

Параметры R и K в математической модели соответствуют экспериментальному графику. Для упрощения оценки влияния различных факторов на флотацию введена модифицированная константа скорости K_{mod} , учитывающая R_u и k . Таким образом, можно найти индекс селективности на основе K_{mod} между сфалеритом и пирротитом в системе флотации [17]. Это позволит сравнить рассматриваемые собиратели: $K_{mod} = [\partial R(t) / \partial t]_{t=0} = R_u k$, $SI_{Zn/Fe} = K_{modZn} / K_{modFe}$.

ТАБЛИЦА 3. Показатели извлечения Zn, Fe и коэффициент селективности при использовании амилового ксантогената калия и Aerophine 3418A с расходом 450 г/т CuSO₄

| Параметр | Aerophine 3418A, 60 г/т | | | | | | Амиловый ксантогенат калия, 250 г/т | |
|--------------|-------------------------|---------|---------|---------|---------|--------|-------------------------------------|---------|
| | pH 10 | | pH 11 | | pH 12 | | pH 12 | |
| | Zn | Fe | Zn | Fe | Zn | Fe | Zn | Fe |
| R_u | 91.130 | 100.000 | 100.000 | 100.000 | 100.000 | 88.180 | 99.040 | 100.000 |
| k | 0.521 | 0.377 | 0.233 | 0.064 | 0.736 | 0.296 | 0.845 | 0.194 |
| R^2 | 0.999 | 0.998 | 0.999 | 0.984 | 0.999 | 0.981 | 0.999 | 0.996 |
| K_{mod} | 47.488 | 37.740 | 23.310 | 6.374 | 73.610 | 26.137 | 83.659 | 19.380 |
| $SI_{Zn/Fe}$ | 1.258 | | 3.657 | | 2.816 | | 4.317 | |

Полученные при моделировании результаты представлены в табл. 3 и на рис. 1. Высокие коэффициенты корреляции R^2 подтверждают выбранную кинетическую модель. Используя экспериментально-проектную методологию для обоснования возможности замены амилового ксантогената калия на Aerophine 3418A, исследовано влияние pH, CuSO_4 и расхода реагента Aerophine 3418A с целью повышения извлечения и качества концентрата цинка.

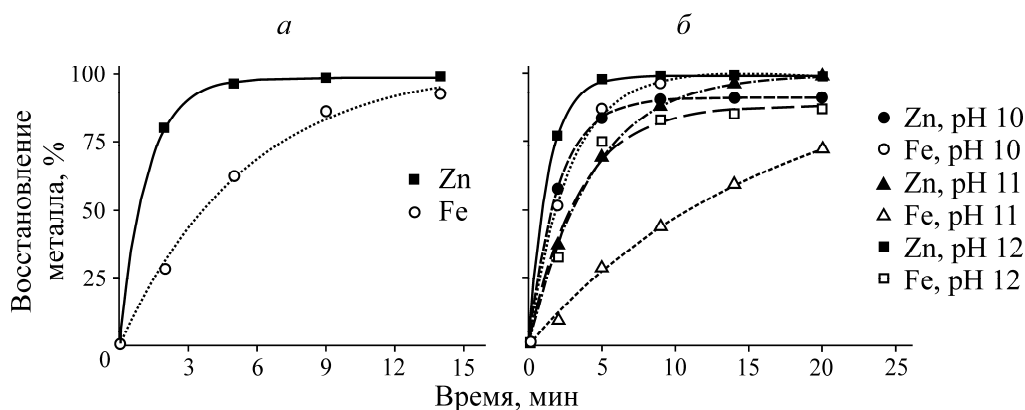


Рис. 1. Кинетика извлечения Zn и Fe при использовании: *a* — амилового ксантогената калия (pH 12); *б* — Aerophine 3418A (pH 10, 11, 12)

Оптимизация параметров флотации цинка для реагента Aerophine 3418A и его селективности по железу проводилась с применением статистического метода поверхности отклика Бокса–Бенкена. Он позволяет оценить основные взаимодействия более трех параметров флотации (pH пульпы (X_3) и дозировку Aerophine 3418A в качестве собирателя цинка (X_2), CuSO_4 как активатор сфалерита (X_1)) на изучаемые характеристики: извлечение Zn (Y_1) и Fe (Y_2), содержание Zn (Y_3) и Fe (Y_4).

По методу Бокса–Бенкена, используя программное обеспечение Newrodw Software [23], выполнили 17 тестов, 5 из которых являются центральными точками в соответствии с уравнением $N = K^2 + K + C_p$, где K — количество факторов; C_p — репликативный количество центральных точек [24].

ТАБЛИЦА 4. Факторы и экспериментальные области для расчета по методу Бокса–Бенкена при времени флотации 10 мин

| Фактор | Обозначение | Уровень фактора | | |
|-----------------------|-------------|-----------------|---------|---------|
| | | Низкий | Средний | Высокий |
| CuSO_4 , г/т | X_1 | 200 | 325 | 450 |
| Aerophine 3418A, г/т | X_2 | 40 | 65 | 90 |
| pH | X_3 | 10 | 11 | 12 |

Тесты с центральными точками проведены для вычисления расхождений экспериментальной погрешности и воспроизводимости данных. Для описания исследуемых характеристик Y использовалась полиномиальная модель второго порядка:

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_{11}X_1^2 + a_{22}X_2^2 + a_{33}X_3^2 + a_{12}X_1X_2 + a_{13}X_1X_3 + a_{23}X_2X_3,$$

где $X_1 - X_3$ — кодированные исследуемые факторы; $a_0, a_1, a_2, a_3, a_{11}, a_{22}, a_{33}, a_{12}, a_{13}, a_{23}$ — коэффициенты регрессии модели; a_i — основной влияющий коэффициент фактора i ; a_{ij} — коэффициент взаимосвязи между факторами i и j .

Для минимизации влияния неизвестных и неконтролируемых условий экспериментальная последовательность расчета была случайной. Данные расчета, экспериментальные результаты и полученные характеристики приведены в табл. 4 и 5.

Обоснование расчетных моделей проводилось с помощью анализа отклонений и проверялось по коэффициенту корреляции R^2 . Скорректированный коэффициент детерминации R_A^2 использовался для оценки соотношений общей наблюдаемой изменчивости описываемой моделью. После проверки установленные модели применялись для построения контурных кривых, включающих два фактора одновременно, и для графического отображения поверхности отклика в интересующей области.

ТАБЛИЦА 5. Результаты экспериментальных расчетов по методу Бокса–Бенкена

| Порядок выполнения | Фактор | | | Экспериментальные результаты, % | | | |
|--------------------|-------------------------|------------|----|---------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| | CuSO ₄ , г/г | A3418, г/г | pH | Y ₁ | Y ₂ | Y ₃ | Y ₄ |
| 1 | 200 | 40 | 11 | 54.59 | 11.80 | 15.14 | 28.09 |
| 2 | 450 | 40 | 11 | 46.79 | 16.52 | 8.50 | 27.56 |
| 3 | 200 | 90 | 11 | 27.28 | 9.81 | 7.58 | 25.59 |
| 4 | 450 | 90 | 11 | 31.94 | 13.98 | 6.67 | 27.04 |
| 5 | 200 | 65 | 10 | 24.42 | 11.04 | 6.47 | 26.62 |
| 6 | 450 | 65 | 10 | 12.25 | 1.17 | 16.39 | 16.47 |
| 7 | 200 | 65 | 12 | 27.17 | 16.49 | 4.95 | 28.11 |
| 8 | 450 | 65 | 12 | 12.34 | 5.89 | 6.44 | 26.95 |
| 9 | 325 | 40 | 10 | 30.46 | 19.26 | 4.84 | 28.38 |
| 10 | 325 | 90 | 10 | 22.25 | 13.50 | 4.94 | 26.22 |
| 11 | 325 | 40 | 12 | 33.62 | 14.86 | 6.93 | 26.35 |
| 12 | 325 | 90 | 12 | 21.38 | 9.71 | 6.47 | 25.99 |
| 13 | 325 | 65 | 11 | 21.54 | 8.60 | 7.22 | 26.07 |
| 14 | 325 | 65 | 11 | 16.69 | 9.84 | 4.94 | 27.14 |
| 15 | 325 | 65 | 11 | 17.06 | 7.82 | 6.12 | 26.09 |
| 16 | 325 | 65 | 11 | 19.71 | 10.88 | 5.16 | 26.86 |
| 17 | 325 | 65 | 11 | 19.44 | 14.84 | 3.98 | 28.49 |

Факторы Zn (Y_1), Fe (Y_2) и (Y_3), (Y_4) изменяются с 12 до 55 %, с 1.17 до 16.40 % и с 16.5 до 28.4 % соответственно (табл. 3). Уравнения моделей, выраженные как функции CuSO₄ (X_1), pH (X_3) и Aegorphine 3418A (X_2), с учетом коэффициентов регрессии (табл. 6) запишем как:

$$Y_1 = 18.750 - 2.242X_1 - 7.826X_2 - 0.884X_3 + 5.233X_1^2 + 16.167X_2^2 - 7.989X_3^2 + 3.115X_1X_2 + 2.386X_1X_3 - 1.007X_2X_3,$$

$$Y_2 = 9.285 + 1.535X_1 - 1.930X_2 - 2.735X_3 - 3.954X_1^2 + 7.696X_2^2 - 2.649X_3^2 - 0.137X_1X_2 + 5.783X_1X_3 + 0.153X_2X_3,$$

$$Y_3 = 5.860 - 1.646X_1 - 1.219X_2 + 1.147X_3 + 5.318X_1^2 - 1.706X_2^2 + 1.641X_3^2 + 1.433X_1X_2 - 6.364X_1X_3 - 0.140X_2X_3,$$

$$Y_4 = 26.540 + 0.355X_1 - 0.693X_2 - 0.440X_3 - 2.488X_1^2 + 3.018X_2^2 - 2.822X_3^2 + 0.495X_1X_2 + 5.555X_1X_3 + 0.450X_2X_3.$$

В соответствии со значением критерия Фишера, R^2 и R_A^2 , отклонение исследуемых экспериментальных характеристик весьма показательно при предложенной полиномиальной модели второй степени (табл. 6).

ТАБЛИЦА 6. Коэффициенты регрессии, R^2 , R_A^2 и критерий Фишера для показателей извлечения и содержания Zn и Fe в концентрате

| Коэффициент | Экспериментальные результаты | | | |
|-------------|------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| | Y_1 | Y_2 | Y_3 | Y_4 |
| a_0 | 18.750 | 9.285 | 5.860 | 26.540 |
| a_1 | -2.242 | 1.535 | -1.646 | 0.355 |
| a_2 | -7.826 | -1.930 | -1.219 | -0.693 |
| a_3 | -0.884 | -2.735 | 1.147 | -0.440 |
| a_{11} | 5.233 | -3.954 | 5.318 | -2.488 |
| a_{22} | 16.167 | 7.696 | -1.706 | 3.018 |
| a_{33} | -7.989 | -2.649 | 1.641 | -2.822 |
| a_{12} | 3.115 | -0.137 | 1.433 | 0.495 |
| a_{13} | 2.386 | 5.783 | -6.364 | 5.555 |
| a_{23} | -1.007 | 0.153 | -0.140 | 0.450 |
| | $R^2=0.946$ | $R^2=0.933$ | $R^2=0.915$ | $R^2=0.989$ |
| | $R_A^2=0.848$ | $R_A^2=0.814$ | $R_A^2=0.763$ | $R_A^2=0.970$ |
| | $F=9.6872$ | $F=7.7976$ | $F=6.0187$ | $F=50.8144$ |

Область средних значений таких факторов, как pH 11, 65 г/т флотоагента, 325 г/т активатора, наиболее неблагоприятна при извлечении сфалерита (рис. 2а). При этих условиях содержание железа в цинковом концентрате является наивысшим (рис. 2б). Изменение pH и концентрации CuSO_4 в противоположных направлениях угнетает высвобождение пирротита, показывая их сильное взаимодействие. Две области неблагоприятны при флотации пирротита: pH 10 и 200 г/т активатора (рис. 2в). Они соответствуют низкому содержанию Fe (рис. 2г) и наибольшему Zn в концентрате (рис. 2д). Оптимальные условия максимизации извлечения ZnS и его селективность в отношении пирротита достигается при расходе 200 г/т CuSO_4 , 40 г/т Aerophine 3418A и pH ~ 12.

Для оценки необходимости замены амилового ксантогената калия на Aerophine 3418A проведены два дополнительных кинетических теста при 40 г/т собирателя, 200 г/т активатора CuSO_4 и pH 12. Общее время флотации 5 мин (табл. 7). Кинетическая модель извлечения Zn и Fe обоими флотоагентами, в соответствии с (1), подтверждается максимальными значениями R^2 Aerophine 3418A, показывая высокую селективность при флотации сфалерита, т. е. коэффициент $SI_{\text{Zn/Fe}}$ в 8 раз выше, чем у амилового ксантогената калия.

ТАБЛИЦА 7. Извлечение Zn и Fe с помощью Aerophine 3418A и амилового ксантогената калия

| Параметр | Aerophine 3418A | | Амиловый ксантогенат калия | |
|---------------------|-----------------|---------|----------------------------|--------|
| | Zn | Fe | Zn | Fe |
| R^2 | 0.983 | 0.934 | 0.960 | 0.966 |
| R_u | 66.920 | 100.000 | 94.770 | 87.410 |
| k | 0.819 | 0.012 | 0.872 | 0.164 |
| K_{mod} | 54.781 | 1.198 | 82.630 | 14.344 |
| $SI_{\text{Zn/Fe}}$ | 45.650 | | 5.760 | |

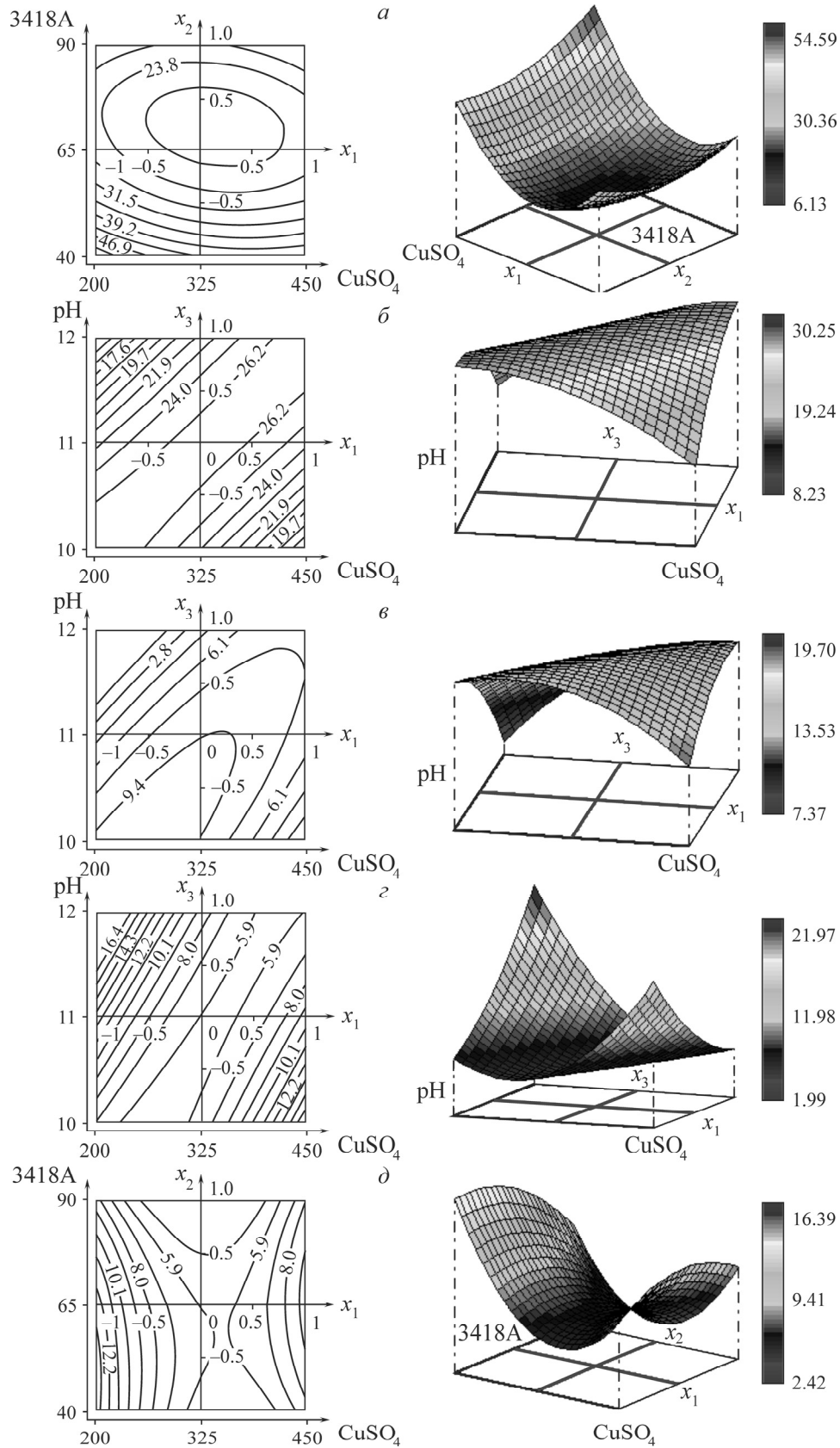


Рис. 2. Ожидаемое извлечение Zn (а) и содержание Zn (д) в зависимости от расхода Aerophine 3418A и CuSO_4 при pH 11; ожидаемое содержание Fe (б), Zn (з) и извлечение Fe (г) в зависимости от расхода CuSO_4 и pH при использовании 65 г/т Aerophine 3418A

ТАБЛИЦА 8. Извлечение Zn и Fe с помощью Aerophine 3418A, %

| Время флотации, мин | Кумулятивный вес | Содержание | | Кумулятивное извлечение | | Кумулятивное содержание | |
|---------------------|------------------|------------|-------|-------------------------|-------|-------------------------|-------|
| | | Fe | Zn | Fe | Zn | Fe | Zn |
| 1 | 4.72 | 26.56 | 23.30 | 4.17 | 19.42 | 26.56 | 23.30 |
| 2 | 9.33 | 29.54 | 20.27 | 8.69 | 35.92 | 28.03 | 21.80 |
| 3 | 13.17 | 33.83 | 16.80 | 13.00 | 47.29 | 29.72 | 20.35 |
| 4 | 15.00 | 32.98 | 15.14 | 15.01 | 52.18 | 30.12 | 19.71 |
| 5 | 16.39 | 32.91 | 12.46 | 16.53 | 55.25 | 30.36 | 19.09 |
| 7 | 18.74 | 33.60 | 8.88 | 19.16 | 58.93 | 30.76 | 17.81 |
| 9 | 22.71 | 37.87 | 6.93 | 24.14 | 63.78 | 32.00 | 15.91 |
| 11 | 25.60 | 41.60 | 6.10 | 28.14 | 66.90 | 33.09 | 14.80 |
| 13 | 28.49 | 39.94 | 5.23 | 31.97 | 69.56 | 33.78 | 13.83 |
| 15 | 31.51 | 37.73 | 4.70 | 35.76 | 72.07 | 34.16 | 12.96 |
| Остаток | 68.49 | 28.23 | 2.31 | — | — | — | — |
| Всего | 100.00 | 30.10 | 5.66 | — | — | — | — |

Следующий тест проводился при тех же условиях, но общее время флотации увеличили с 10 до 15 мин. Извлечение цинка повысилось с 56 до 72 % (табл. 8), но осталось ниже, чем в промышленных условиях при использовании амилового ксантогената калия (~90%). Однако применение Aerophine 3418A в производстве позволит улучшить концентрацию цинка, уменьшить объемы водопотребления и повысить извлечение металла.

ВЫВОДЫ

Сравнительное изучение эффективности флотации цинка показало возможность замены флотореагентов на Aerophine 3418A в схеме обработки цинка на обогатительной фабрике. Благоприятные условия для обогащения руды обнаружены при pH 12, расходе 200 г/т CuSO₄ и 40 г/т Aerophine 3418A. Замещение улучшает качество цинкового концентрата и позволяет повторно использовать оборотные воды, снижая водорасход свежей воды и уменьшая риск потенциального загрязнения окружающей среды.

Авторы выражают благодарность руководству и техническому составу Марокканской горной компании, а также исследовательскому центру Reminex за поддержку и помощь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Mingli Cao and Qi Liu.** Reexamining the functions of zinc sulfate as a selective depressant in differential sulfide flotation — the role of coagulation, *J. Colloid and Interface Sci.*, 2006, Vol. 301. — P. 523–531.
2. **Boulton A., Fonasiero D., and Ralston J.** Effect of iron content in sphalerite on flotation, *J. Min. Eng.*, 2005, Vol. 18. — P. 1120–1122.
3. **Chandra A. P. and 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 Colloidal and Interface Science*, 2009, Vol. 145, No. 1–2. — P. 97–110.
4. **Fornasiero D. and Ralston J.** Effect of surface oxide/hydroxide products on the collectorless flotation of copper-activated sphalerite, *J. Min. Process.*, 2006, Vol. 78. — P. 231–237.
5. **Chen Jian-Hua, Chen Ye, and Li Yu-Qiong.** Effect of vacancy defects on electronic properties and activation of sphalerite (110) surface by first-principles, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2010, Vol. 20, No. 3. — P. 502–506.

6. **Rao S. R., Nasset J. E., and Finch J. A.** Activation of sphalerite by Cu ions produced by cyanide action on chalcopyrite, *J. Min. Eng.*, 2011, Vol. 24. — P. 1025–1027.
7. **Rashchi F., Sui C., and Finch J. A.** Sphalerite activation and surface Pb ion concentration, *J. Min. Process.*, 2002, Vol. 67. — P. 43–58.
8. **Buswell A. M. and Nicol M. J.** Some aspects of the electrochemistry of the flotation of pyrrhotite, *J. Applied Electrochemistry*, 2011, Vol. 32, No. 12. — P. 1321–1329.
9. **Miller J. D., Li J., Davidtz J. C., and Vos F.** A review of pyrrhotite flotation chemistry in the processing of PGM ores, 2005, Vol. 18. — P. 855–865.
10. **Allison S. A. and O'Connor C. T.** An investigation into the flotation behaviour of pyrrhotite, *J. Min. Process.*, 2011, Vol. 98. — P. 202–207.
11. **Fuersteneau M. C.** Froth flotation: the first ninety years. In *Advances in Flotation Technology* (eds.), B. K. Parekh and J. D. Miller, SME, 1999. — P. XI–XXXIII.
12. **Allison S. A.** Interactions between sulphide minerals and metal ions in the activation, deactivation and depression of mixed sulphide ores, *Mintekreport*, 1982, No. M29. — P. 1–31.
13. **Finkelstein N. P.** The activation of sulphide minerals for flotation: a review, *J. Min. Process.*, 1997, Vol. 52. — P. 81–120.
14. **Kirjavainen V., Scherithofer N., and Heiskanen K.** Effect of calcium and thiosulfate ions on flotation selectivity of nickel-copper ores, *J. Min. Eng.*, 2002, Vol. 15, No. 1–2. — P. 1–5.
15. **Levay G., R. St., Smart C., and Skinner W. M.** The impact of water quality on flotation performance, *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.*, 2001, Vol. 101, No. 2. — P. 69–75.
16. **Lui L., Rao S. R., and Finch J. A.** Laboratory study effect of recycle water on flotation of a Cu/Zn Sulphide ore, *J. Min. Eng.*, 1993, Vol. 6, No. 11. — P. 1183–1190.
17. **Boujounoui K.** Etude de l'effet de la composition chimique de l'eau sur la flottation des minerais sulfurés complexes: cas de Draa lasfar sud (Maroc), Thesis, Université cadi Ayyad, Marrakech, Maroc, 2017.
18. **Abidi A., El Amari K., Bacaoui A., and Yacoubi A.** Entrainment and true flotation of a natural complex ore sulfide, *J. Min. Sci.*, 2014, Vol. 50, No. 6. — P. 1061–1068.
19. **Boujounoui K., Abidi A., Bacaoui A., El Amari K., and Yacoubi A.** Flotation process water recycling using doehlert experimental design: case of draa sfar complex sulphide ore, Morocco, *J. Mine Water and the Environment*, 2017. DOI: 10.1007/s10230-017-0471-3.
20. **Chanturia V. A., Ivanova T. A., and Koporulina E. V.** Interaction of sodium diisobutyl dithiophosphate and platinum in aqueous solutions and on sulphide surface, *J. Min. Sci.*, 2009, Vol. 45, No. 2. — P. 164–172.
21. **Hope G. A., Woods R., Boyd S., and Watting K.** A spectroelectrochemical investigation of the interaction of diisobutyldithiophosphate with copper, silver and gold surfaces: I. Raman and NMR spectra of diisobutyldithiophosphate compounds, *Colloids and Surfaces, A Physicochem. Eng. Aspects*, 2003, Vol. 214, No. 1–3. — P. 77–85.
22. **Pecina-Treviño E. T., Uribe Salas A., Nava-Alonso F., and Pérez-Garibay R.** On the sodium-diisobutyl dithiophosphate (Aerophine 3418A) interaction with activated and unactivated galena and pyrite, *J. Min. Process.*, 2003, Vol. 71, No. 1–4. — P. 201–217.
23. **Mathieu D., Nony J., and Phan Tan Luu R.** Software Nemrodw, LPRAI-Marseille, France.
24. **Aslan N. and Fidan R.** Optimization of Pb flotation using statistical technique and quadratic programming, *J. Separation and Purification Tech.*, 2008, Vol. 62. — P. 160–165.

Поступила в редакцию 23/VII 2018

После доработки 03/VI 2019

Принята к публикации 03/VII 2019