

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВОВ ТРЕХКОМПОНЕНТНЫХ СМЕСЕЙ МОДИФИКАТОРОВ МЕТОДОМ СИМПЛЕКСНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ИХ ВЛИЯНИЯ НА ФЛОТАЦИЮ МЕДНО-ЦИНКОВЫХ КОЛЧЕДАНЫХ РУД

Хтет Зо У¹, Чжо Зай Яа¹, Б.Е. Горячев¹

¹ НИТУ МИСИС, Москва, Россия, e-mail: htetzawoo68099@gmail.com

Аннотация: Рассмотрена возможность проведения математического моделирования в задаче оптимизации составов трехкомпонентных смесей реагентов-модификаторов, применяемых в процессе флотации медно-цинковых колчеданных руд. Для достижения данной цели использован метод симплексного планирования эксперимента. Особое внимание уделено изучению перспектив совершенствования технологии флотации медно-цинковых колчеданных руд с применением смесей металлосодержащих модификаторов с сернистым натрием. В результате анализа экспериментальных данных по флотации было выявлено влияние рассматриваемых реагентов-модификаторов на технологические показатели флотации. Полученные результаты исследования представляют ценную информацию о потенциале оптимизации процессов флотации данных руд через систематическое изучение комбинаций этих реагентов. В результате были определены оптимальные расходы реагентов и разработаны математические модели для расчета извлечения меди, цинка и железа в концентрат. С помощью разработанных моделей установлено влияние трех факторов: расхода железного купороса, цинкового купороса и сернистого натрия на извлечение ценных металлов из медно-цинковой руды во флотационный концентрат. На основе полученных моделей выделены четыре основных состава смесей используемых модификаторов. Оптимизация составов модификаторов важна для достижения максимального извлечения минералов меди и цинка при одновременной минимизации извлечения пирита в концентрат.

Ключевые слова: медно-цинковые руды, оптимизация, извлечение, математическая модель, модификаторы, симплекс-метод, флотация, медь, цинк

Для цитирования: Хтет Зо У, Чжо Зай Яа, Горячев Б. Е. Моделирование и оптимизация составов трехкомпонентных смесей модификаторов методом симплексного планирования для анализа их влияния на флотацию медно-цинковых колчеданных руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 8. – С. 141–152. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_8_0_141.

Modeling and optimization of compositions of three-component modifier mixtures by simplex planning method to analyze their effect on the flotation of copper-zinc pyrite ores

Htet Zaw Oo¹, Kyaw Zay Ya¹, B.E. Goryachev¹

¹ NUST MISIS, Moscow, Russia, e-mail: htetzawoo68099@gmail.com

Abstract: In this paper, we explore the potential of mathematical modeling for optimizing the compositions of three-component mixtures of reagent modifiers employed in the flotation of copper-zinc pyrite ores. To attain this objective, the simplex experiment planning method is employed. Significantly, our focus is directed towards investigating the prospects for enhancing the flotation technology of copper-zinc pyrite ores by employing mixtures of metal-containing modifiers with sodium sulfide. The experimental data obtained from the flotation process reveals the impact of the modifier reagents considered in this study on the technological parameters of flotation. The results of our research furnish valuable insights into the potential for optimizing the flotation processes of these ores through a systematic examination of combinations of these reagents. Consequently, optimal reagent costs were determined, and mathematical models were developed to calculate the extraction of copper, zinc, and iron into concentrate. Utilizing these models, we identified the influence of three key factors: the consumption of iron sulfate, zinc sulfate, and sodium sulfide on the extraction of valuable metals from copper-zinc ore into flotation concentrate. Based on the established models, we identify four primary compositions of mixtures of modifiers that contribute to the optimization of modifier compositions, aiming to achieve the maximum extraction of copper and zinc minerals while minimizing the extraction of pyrite into the concentrate.

Key words: copper-zinc ores, optimization, extraction, mathematical model, modifiers, simplex method, flotation, copper, zinc.

For citation: Htet Zaw Oo, Kyaw Zay Ya, Goryachev B. E. Modeling and optimization of compositions of three-component modifier mixtures by simplex planning method to analyze their effect on the flotation of copper-zinc pyrite ores. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(8):141-152. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_8_0_141.

Введение

Медно-цинковые руды, добываемые на одном из месторождений Урала, характеризуются высокой степенью сложности в процессе обогащения [1 – 3]. Данную руду следует отнести к категории труднообогатимых [4, 5]. Медно-цинковые руды обладают сложным минеральным составом, в котором, помимо халькопирита, присутствуют вторичные медные минералы, а также сфалерит и пирит [6, 7].

При анализе работы обогатительных фабрик, перерабатывающих медно-цинковые колчеданные руды, выявлены потери меди и цинка в различных концентратах и отвальных хвостах, полученных по применяемым технологическим схемам в различных реагентных режимах [8]. В связи с этим решение вопроса по

повышению технологических показателей обогащения медно-цинковых колчеданных руд является актуальным [9, 10].

В настоящее время одной из технологических задач обогащения медно-цинковых руд является разработка эффективных составов смесей реагентов-модификаторов [11]. Этот аспект требует проведения самостоятельных технологических исследований, поскольку правильный выбор реагентов-модификаторов и их сочетаний может существенно повысить эффективность процесса обогащения этих руд. Кроме того, важно иметь возможность предсказывать действие таких смесей на флотацию меди, цинка и пирита из медно-цинковых колчеданных руд.

Среди перспективных методов исследования флотации медно-цинковых руд,

направленных на увеличение технологических показателей, следует рассматривать применение метода симплексного планирования эксперимента [12, 13]. Этот метод широко применяется при изучении систем типа «состав — свойство» для определения оптимальных составов смесей модификаторов флотации с целью повышения извлечения меди и цинка в концентраты, а также увеличения эффективности депрессии активного пирита.

Материалы и методы

В предыдущей опубликованной нами статье [14] представлены материалы, аппараты и приборы, использованные в настоящей работе, а также описана методика проведения эксперимента по флотации медно-цинковой колчеданной руды [14, 15].

Теория моделирования и построение уравнения регрессии

Симплекс-решетчатые планы, предложенные Шеффе и использованные в данной работе, нашли широкое применение в исследованиях свойств многокомпонентных систем, являясь практически наилучшим инструментом для этой цели [16–18].

На рис. 1 симплексное пространство представлено для трех компонентов ($q = 3$), пропорции которых обозначены x_1 , x_2 и x_3 .

Для исследования действия трехкомпонентных смесей железного, цинкового купоросов и сернистого натрия на флотацию медно-цинковой руды строят диаграммы «состав — свойство», представляющие собой сеть изолиний, представленных на треугольнике относительных долей каждого из указанных компонентов в смеси [19, 20]. Создание таких диаграмм требует значительного объема экспериментов по флотации, например, для шага 0,05 относительной доли каждого компонента смеси необходимо провести 231 эксперимент. Для сокращения объема экспериментов при создании диаграмм было использовано планирование эксперимента на основе симплекс-решетчатых планов 4-го порядка, что позволило уменьшить количество необходимых опытов до 15.

Для анализа влияния трехкомпонентной смеси во флотационных экспериментах и построения модели была использована модель четвертого порядка. Такая модель представляет собой полином четвертого порядка и может точно описать функции, включая экстремумы, седла и перегибы. Для данного плана

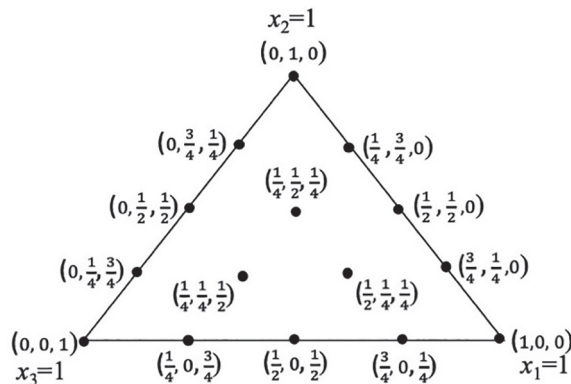


Рис. 1. Схема симплекса с пропорциями компонентов в смеси

Fig. 1. The scheme of the simplex with the proportions of the components in the mixture

эксперимента математическая модель между функцией отклика и факторами имеет вид полиномиальной функции (1):

$$\begin{aligned}
 Y = & \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \\
 & + \gamma_{12} x_1 x_2 (x_1 - x_2) + \gamma_{13} x_1 x_3 (x_1 - x_3) + \gamma_{23} x_2 x_3 (x_2 - x_3) + \\
 & + \delta_{12} x_1 x_2 (x_1 - x_2)^2 + \delta_{13} x_1 x_3 (x_1 - x_3)^2 + \delta_{23} x_2 x_3 (x_2 - x_3)^2 + \\
 & + \beta_{1123} x_1^2 x_2 x_3 + \beta_{1223} x_1 x_2^2 x_3 + \beta_{1233} x_1 x_2 x_3^2
 \end{aligned} \quad (1)$$

Коэффициенты рассчитываются по формулам (2) – (14):

$$\beta_1 = y_1; \beta_2 = y_2; \beta_3 = y_3 \quad (2)$$

$$\beta_{12} = 4y_{12} - 2y_1 - 2y_2 \quad (3)$$

$$\beta_{13} = 4y_{13} - 2y_1 - 2y_3 \quad (4)$$

$$\beta_{23} = 4y_{23} - 2y_2 - 2y_3 \quad (5)$$

$$\gamma_{12} = \frac{8}{3}(-y_1 + 2y_{1112} - 2y_{1222} + y_2) \quad (6)$$

$$\gamma_{13} = \frac{8}{3}(-y_1 + 2y_{1113} - 2y_{1333} + y_3) \quad (7)$$

$$\gamma_{23} = \frac{8}{3}(-y_2 + 2y_{2223} - 2y_{2333} + y_3) \quad (8)$$

$$\delta_{12} = \frac{8}{3}(-y_1 + 4y_{1112} - 6y_{12} + 4y_{1222} - y_2) \quad (9)$$

$$\delta_{13} = \frac{8}{3}(-y_1 + 4y_{1113} - 6y_{13} + 4y_{1333} - y_3) \quad (10)$$

$$\delta_{23} = \frac{8}{3}(-y_2 + 4y_{2223} - 6y_{23} + 4y_{2333} - y_3) \quad (11)$$

$$\begin{aligned}
 \beta_{1123} = & 32(3y_{1123} - y_{1223} - y_{1233}) + \frac{8}{3}(6y_1 - y_2 - y_3) - 16(y_{12} + y_{13}) - \\
 & - \frac{16}{3}(5y_{1112} + 5y_{1113} - 3y_{1222} - 3y_{1333} - y_{2223} - y_{2333})
 \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned}
 \beta_{1223} = & 32(3y_{1223} - y_{1123} - y_{1233}) + \frac{8}{3}(6y_2 - y_1 - y_3) - 16(y_{12} + y_{23}) - \\
 & - \frac{16}{3}(5y_{1222} + 5y_{2223} - 3y_{1112} - 3y_{2333} - y_{1113} - y_{1333})
 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned}
 \beta_{1233} = & 32(3y_{1233} - y_{1123} - y_{1223}) + \frac{8}{3}(6y_3 - y_1 - y_2) - 16(y_{13} + y_{23}) - \\
 & - \frac{16}{3}(5y_{1333} + 5y_{2333} - 3y_{1113} - 3y_{2223} - y_{1112} - y_{1222})
 \end{aligned} \quad (14)$$

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты экспериментальных исследований флотации II медно-цинковой руды с применением смеси железного и цинкового купоросов и сернистого натрия при общем расходе смеси, равном 100 г/т, приведены в табл. 1.

На основе анализа полученных результатов флотации II выявлено, что минералы меди обладают наивысшим извлечением, в то время как минералы железа менее обогатимы по сравнению с минералами меди и цинка. Введение смесей модификаторов во флотацию II, таких как двойные смеси железного и цинкового купоросов [0,5+0,5], железного купороса с сернистым натрием [0,5+0,5], а также тройные смеси железного, цинкового купоросов и сернистого натрия [0,5+0,25+0,25], приводит к повышению извлечения меди и цинка во флото-

концентрат и улучшает эффективность депрессии флотации пирита. В результате указанных опытов флотации было получено извлечение меди, цинка и железа в концентрат: в первом случае – 91,81; 37,72 и 7,82%, во втором – 92,6; 37,19; и 8,36%, а в третьем – 91,28; 30,3 и 7,5% соответственно.

Таким образом, на основе экспериментальных данных флотации II были определены оптимальные составы смесей модификаторов: $\text{FeSO}_4 + \text{ZnSO}_4 - [0,5 + 0,5]$, $\text{FeSO}_4 + \text{Na}_2\text{S} - [0,5 + 0,5]$, $\text{FeSO}_4 + \text{ZnSO}_4 + \text{Na}_2\text{S} - [0,5 + 0,25 + 0,25]$.

Определение коэффициентов и формирование функции отклика или модели

Для расчета коэффициентов в полиноме (1), функцию отклика обозначили как Y. Тогда коэффициенты с одним индексом 1 могут быть интерпретированы

Таблица 1

Результаты проведения эксперимента флотации II медно-цинковой руды Results of the flotation experiment of copper-zinc ore II

№ опыта	Доля реагента в смеси			Выход, %	Содержание, %			Извлечение, %		
	$\text{FeSO}_4 (x_1)$	$\text{ZnSO}_4 (x_2)$	$\text{Na}_2\text{S} (x_3)$		Cu	Fe	Zn	Cu	Fe	Zn
1	1	0	0	7,35	5,74	36,43	5,29	87,71	6,93	31,25
2	0	1	0	6,19	6,26	34,68	6,46	71,92	5,32	29,04
3	0	0	1	8,91	3,13	37,03	3,25	92,67	8,86	28,09
4	0,5	0,5	0	7,93	5,85	38,88	6,87	91,81	7,82	37,72
5	0,5	0	0,5	8,8	4,8	38,69	6,25	92,6	8,36	37,19
6	0	0,5	0,5	7,27	2,71	34,65	2,75	86,67	7,05	20,04
7	0,75	0,25	0	8,04	5,65	35,41	7,32	85,92	6,83	38,22
8	0,25	0,75	0	7,29	6,84	36,44	5,33	86,71	7,16	32,35
9	0,75	0	0,25	10,66	3,32	41,35	3,77	92,56	11,39	36,57
10	0,25	0	0,75	8,62	3,46	37,89	3,42	86,92	10,22	31,55
11	0	0,75	0,25	6,21	5,34	41,42	6,29	82,89	6,6	32,19
12	0	0,25	0,75	7,47	3,93	40,33	5,19	88,5	8,26	33,78
13	0,5	0,25	0,25	8,22	3,22	39,38	5	91,28	7,5	30,29
14	0,25	0,5	0,25	7,58	3,84	34,77	3,61	86,46	8,36	30
15	0,25	0,25	0,5	10,05	2,51	34,8	2,21	76,37	13,41	31,35

Таблица 2

Коэффициенты уравнения для расчета извлечения меди, железа и цинка
Coefficients of the equation for calculating the extraction of copper, iron and zinc

Коэффициенты уравнения для расчета извлечения меди (ε_{Cu})							
β_1	β_2	β_3	β_{12}	β_{13}	β_{23}	γ_{12}	γ_{13}
87,71	71,92	92,67	47,98	9,64	17,5	-46,32	4331
γ_{23}	δ_{12}	δ_{13}	δ_{23}	β_{1123}	β_{1223}	β_{1233}	
25,41	-53,25	-48,16	2,53	498,91	-25,33	-1117,41	
Коэффициенты уравнения для расчета извлечения железа (ε_{Fe})							
β_1	β_2	β_3	β_{12}	β_{13}	β_{23}	γ_{12}	γ_{13}
6,93	5,32	8,86	6,78	1,86	-0,16	-6,05	11,39
γ_{23}	δ_{12}	δ_{13}	δ_{23}	β_{1123}	β_{1223}	β_{1233}	
0,59	-8,56	54,64	7,89	-290,99	-71,71	512,03	
Коэффициенты уравнения для расчета извлечения цинка (ε_{Zn})							
β_1	β_2	β_3	β_{12}	β_{13}	β_{23}	γ_{12}	γ_{13}
31,25	29,04	28,09	30,3	30,08	-34,1	25,41	18,35
γ_{23}	δ_{12}	δ_{13}	δ_{23}	β_{1123}	β_{1223}	β_{1233}	
-11,01	-11,55	-26,67	230,69	-526,43	84	187,71	

с точки зрения отклика на чистый компонент 1, коэффициенты с индексами 1 и 2 — с точки зрения отклика на бинарные смеси компонентов 1 и 2, а коэффициенты с индексами 1, 2 и 3 — с точки зрения отклика на тройные смеси компонентов 1, 2 и 3. На основе экспериментальных данных флотации II, используя значение функции отклика в каждой точке симплекса-треугольника (рис. 1), рассчитывались коэффициенты уравнения для расчета извлечения меди, железа и цинка (табл. 2).

Таким образом, подставив данные значения коэффициентов в уравнение (1), получены математические модели для расчета извлечения минералов меди, железа и цинка, основанные на полиноме Шеффе 4-го порядка, имеющие вид (15, 16 и 17):

$$\begin{aligned}
 Y_{Cu} = & 87,71x_1 + 71,92x_2 + 92,67x_3 + 47,98x_1x_2 + 9,64x_1x_3 + 17,5x_2x_3 - \\
 & -46,32x_1x_2(x_1 - x_2) + 43,31x_1x_3(x_1 - x_3) + 25,41x_2x_3(x_2 - x_3) - \\
 & -53,25x_1x_2(x_1 - x_2)^2 - 48,16x_1x_3(x_1 - x_3)^2 + 2,53x_2x_3(x_2 - x_3)^2 + \\
 & + 498,91x_1^2x_2x_3 - 25,33x_1x_2^2x_3 - 1117,41x_1x_2x_3^2
 \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned}
 Y_{Fe} = & 6,93x_1 + 5,32x_2 + 8,86x_3 + 6,78x_1x_2 + 1,86x_1x_3 - 0,16x_2x_3 - \\
 & -6,05x_1x_2(x_1 - x_2) + 11,39x_1x_3(x_1 - x_3) + 0,59x_2x_3(x_2 - x_3) - \\
 & -8,56x_1x_2(x_1 - x_2)^2 + 54,64x_1x_3(x_1 - x_3)^2 + 7,89x_2x_3(x_2 - x_3)^2 - \\
 & -290,99x_1^2x_2x_3 - 71,71x_1x_2^2x_3 + 512,03x_1x_2x_3^2
 \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned}
Y_{zn} = & 31,25x_1 + 29,04x_2 + 28,09x_3 + 30,3x_1x_2 + 30,08x_1x_3 - 34,1x_2x_3 + \\
& + 25,41x_1x_2(x_1 - x_2) + 18,35x_1x_3(x_1 - x_3) - 11,01x_2x_3(x_2 - x_3) - \\
& - 11,55x_1x_2(x_1 - x_2)^2 - 26,67x_1x_3(x_1 - x_3)^2 + 230,69x_2x_3(x_2 - x_3)^2 - \\
& - 526,43x_1^2x_2x_3 + 84x_1x_2^2x_3 + 187,71x_1x_2x_3^2
\end{aligned} \quad (17)$$

На основе полученных моделей было рассчитано извлечение меди, железа и цинка в концентрат флотации II с шагом массовой доли каждого компонента в исследованных смесях, равным 0,05. На рис. 2 представлены зависимости расчетных извлечений меди, цинка и железа от относительных долей первого компонента в двойных смесях реагентов-модификаторов, — железного и цинкового купоросов (рис. 2, а), железного купороса и сернистого натрия (рис. 2, б), цинкового купороса и сернистого натрия (рис. 2, в).

Из анализа представленных данных можно сделать вывод, что оптимальным сочетанием для повышения эффективности извлечения меди в концентрат флотации II является совместное применение железного купороса и сернистого натрия. Так, при относительной доле железного купороса, равной 0,6; в смеси с сернистым натрием, относительная доля которого равна 0,4; модель прогнозирует извлечение меди на уровне 93,62%. В этом случае прогноз по извлечению цинка составляет 37,83%, а железа (пирита) — 9,22%. Сочетание железного купороса с цинковым купоросом (рис. 2, а) может позволить достичь близких к указанным выше прогнозных показателей извлечения меди и цинка в концентрат — на уровне 91,2 и 38,36%. Данному уровню извлечения соответствуют относительные доли железного купороса (0,55) и цинкового купороса (0,45).

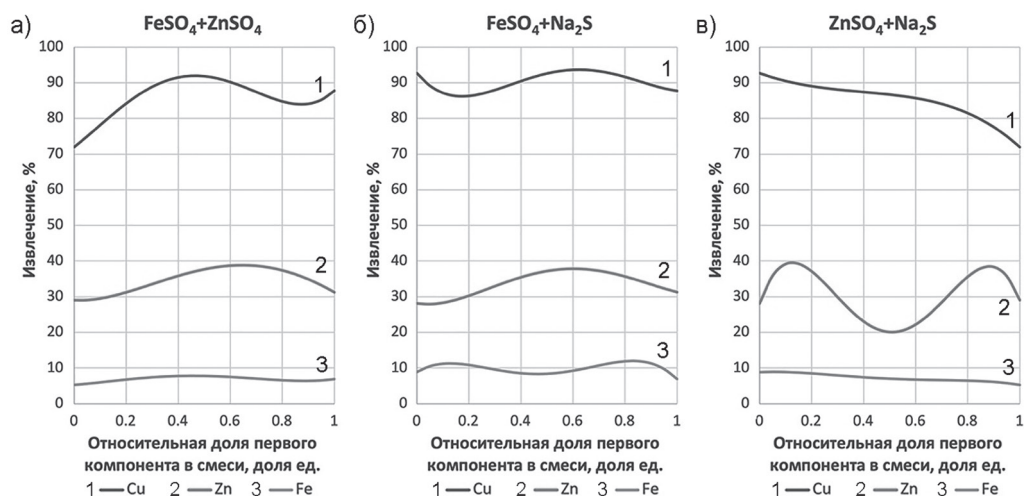


Рис. 2. Зависимость извлечения меди, цинка и железа в концентрат флотации II от относительной доли первого компонента в смеси железного и цинкового купоросов (а), железного купороса и сернистого натрия (б) и цинкового купороса и сернистого натрия (в)

Fig. 2. Dependence of the extraction of copper, zinc and iron into flotation II concentrate on the relative proportion of the first component in a mixture of iron and zinc sulfate (a), iron sulfate and sodium sulfide (b) and zinc sulfate and sodium sulfide (v)

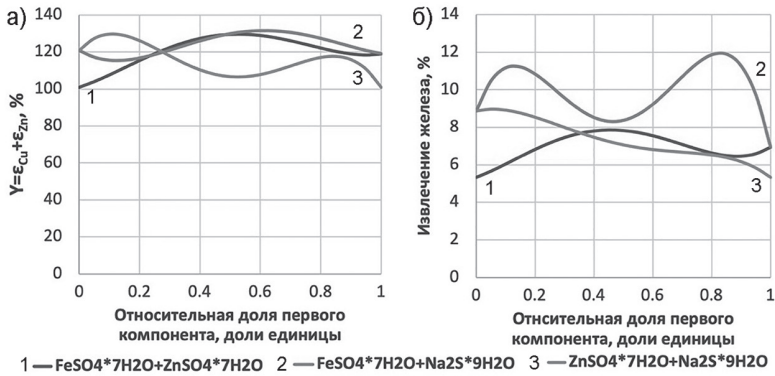


Рис. 3. Зависимость функции отклика $Y = \varepsilon_{Cu} + \varepsilon_{Zn}$ (а) и извлечения железа (б) в концентрат флотации II от относительной доли первого компонента в двойных смесях реагентов-модификаторов
 Fig. 3. Dependence of the response function $Y = \varepsilon_{Cu} + \varepsilon_{Zn}$ (a) and the extraction of iron (b) into the flotation concentrate II on the relative proportion of the first component in double mixtures of modifier reagents

Так как операцию «флотация II» по своей сути можно рассматривать как основную медно-цинковую флотацию, то ее целью является максимальное извлечение меди и цинка в концентрат флотации при минимальном извлечении в концентрат пирита. Тогда в качестве функции отклика модели может служить величина суммы извлечений меди и цинка в концентрат флотации II. Следовательно функция отклика может быть выражена как $Y = \varepsilon_{Cu} + \varepsilon_{Zn}$. Предельное максимальное значение данной функции отклика должно составлять $Y = 100\% + 100\% = 200\%$. Значения функции отклика $Y = \varepsilon_{Cu} + \varepsilon_{Zn}$ рассчитывались по уравнению (18):

$$\begin{aligned}
 Y_{Cu+Zn} = & 118,96x_1 + 100,96x_2 + 120,76x_3 + 78,28x_1x_2 + 39,72x_1x_3 - 16,6x_2x_3 - \\
 & - 20,91x_1x_2(x_1 - x_2) + 61,65x_1x_3(x_1 - x_3) + 14,4x_2x_3(x_2 - x_3) - \\
 & - 64,8x_1x_2(x_1 - x_2)^2 - 74,83x_1x_3(x_1 - x_3)^2 + 233,23x_2x_3(x_2 - x_3)^2 - \\
 & - 27,52x_1^2x_2x_3 + 58,67x_1x_2^2x_3 - 929,71x_1x_2x_3^2
 \end{aligned} \quad (18)$$

На рис. 3 изображены зависимости расчетного значения указанной функции отклика (рис. 3, а) и извлечения железа (рис. 3, б) в концентрат флотации II от относительной доли первого компонента в двойных смесях реагентов-модификаторов.

Анализ результатов показал, что максимальная сумма извлечения меди и цинка в концентрат флотации II достижима при расчете функции отклика $Y = \varepsilon_{Cu} + \varepsilon_{Zn}$ по уравнению (18) для стороны x_1x_3 симплекс-треугольника. Данная сторона соответствует составу смеси реагентов-модификаторов $FeSO_4 \cdot 7H_2O + Na_2S + 9H_2O$ при ее общем расходе 100 г/т. Максимальное расчетное значение суммы извлечений меди и цинка в концентрат, равное 131,45%, соответствует следующему составу смеси: $0,6FeSO_4 \cdot 7H_2O + 0,4Na_2S + 9H_2O$ или расходам первого реагента смеси 60 г/т и второго — 40 г/т. Сочетание указанных реагентов в таком соотношении дает расчетное значение извлечения железа на уровне 9,22%.

В результате оптимизации составов трех модификаторов на основе модели лучшие извлечения меди и цинка при минимальных извлечениях железа могут быть достигнуты при использовании смеси $FeSO_4$, $ZnSO_4$ и Na_2S с соотношением [0,55 : 0,4 : 0,05], что может обеспечить максимальное суммарное извлечение

Таблица 3

Оптимальные составы смесей во флотации II
Optimal compositions of mixtures in flotation II

Оптимальные составы смесей			Расчетное извлечение металлов по моделям		
FeSO ₄	ZnSO ₄	Na ₂ S	ε _{Cu}	ε _{Fe}	ε _{Zn}
0,55	0,45	0	91,2	7,71	38,36
0,6	0,4	0	90,17	7,54	38,75
0,55	0,4	0,05	93,76	6,44	35,65
0,5	0,4	0,1	94,98	6,02	33,37

меди и цинка в концентрат флотации II (концентрат основной медно-цинковой флотации), равное 129,41; при извлечении пирита, равном 6,44%.

Предложенные модели позволяют проследить влияние третьего компонента смесей реагентов-модификаторов, которым является сернистый натрий, на показатели флотации медно-цинковой руды.

Составы компонентов смеси реагентов-модификаторов, при которых прогнозируется максимальное извлечение меди и цинка в концентрат флотации II при минимальном извлечении в него железа, представлены в табл. 3.

Из представленных данных следует, что введение в двойную смесь железного и цинкового купоросов третьего компонента — сернистого натрия в небольших относительных долях может повысить извлечение меди в концентрат флотации II с 90 до 95% при одновременном снижении извлечения цинка с 38,75 до 33,4% и при примерно таком же снижении извлечения пирита в концентрат на 1,7%.

Выводы

- Экспериментально установлено, что введение смесей модификаторов во флотации II, таких, как смеси FeSO₄ + ZnSO₄ — [0,5 + 0,5]; FeSO₄ + Na₂S — [0,5 + 0,5], а также смеси FeSO₄ + ZnSO₄ + Na₂S — [0,5 + 0,25 + 0,25], увеличивает извлечение меди и цинка в концентрат при одновременной депрессии флотации

пирита. Из перечисленных опытов наилучшее извлечение меди, цинка при минимальном извлечении железа в медно-цинковый концентрат были достигнуты в первом случае: 91,81; 37,72 и 7,82% соответственно.

- На основании результатов симплексного планирования флотационных экспериментов были рассчитаны многофакторные модели, связывающие между собой извлечение меди, цинка и железа с относительными долями каждого из компонентов смеси реагентов-модификаторов. Модели представляют собой нелинейные уравнения множественной регрессии без свободного члена.

- Согласно разработанным моделям, были выявлены четыре оптимальных состава смесей модификаторов, из которых оптимальным сочетанием оказалось FeSO₄ + ZnSO₄ + Na₂S — [0,55 + 0,4 + 0,05]. С указанным составом были получены расчетные извлечения меди, цинка и железа в медно-цинковый концентрат — 93,76; 35,65 и 6,44%.

- Разработанные математические модели позволяют прогнозировать желаемые результаты флотации медно-цинковой руды в случае использования предложенных в работе реагентов-модификаторов.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Научно-исследовательской лаборатории НИТУ «МИСиС» за помощь в проведении экспериментов, входящих в данное исследование.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чантурия В. А. Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки минерального сырья природного и техногенного происхождения // Горный журнал. — 2015. — № 7. — С. 29 — 37. DOI: 10.17580/gzh.2015.07.05.
2. Мамонов С. В., Дресвянкина Т. П., Зиятдинов С. В., Ершов А. А. Технологические решения переработки медных и медно-цинковых руд колчеданного месторождения Урала // Глобус: геология и бизнес. — 2020. — № 3 (62). — С. 140 — 144.
3. Бочаров В. А., Рыскин М. Я., Поспелов Н. Д. Развитие технологии переработки медно-цинковых руд Урала // Цветные металлы. — 1979. — № 10. — С. 105 — 107.
4. Романенко С. А., Ушаков Е. К. Исследование технологической изменчивости медно-цинковых колчеданных пирротинсодержащих руд на примере приорского месторождения // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2019. — № 4 (11). — С. 56 — 61.
5. Зимин А. В., Немчинова Л. А. Интенсификация селективной флотации медно-цинковых руд термомеханическим модифицированием поверхности цинковых минералов // Горный журнал. — 2014. — № 11. — С. 56 — 60.
6. Карасов Ю. К., Ягудина Ю. Р. Совершенствование технологии флотации медно-цинковых руд, перерабатываемых на обогатительной фабрике Актюбинской медной компании // Горная промышленность. — 2021. — № 5-2. — С. 29 — 32.
7. Chandra A. P., Gerson A. R. A review of the fundamental studies of the copper activation mechanisms for selective flotation of the sulfide minerals, sphalerite and pyrite // Advances in Colloid and Interface Science. 2009, vol. 145, pp. 97 — 110.
8. Зимин А. В., Арустамян М. А., Калинин Е. П., Соловьева Л. М., Немчинова Л. А. Разработка технологических схем флотационного обогащения колчеданных медных и медно-цинковых руд // Горный журнал. — 2012. — № 11. — С. 28 — 33.
9. Горбатова Е. А., Емельяненко Е. А., Ожогина Е. Г. Целесообразность прогнозной оценки обогатимости колчеданных руд // Разведка и охрана недр. — 2019. — № 3. — С. 63 — 66.
10. Чантурия В. А., Козлов А. П., Вайсберг Л. А. Приоритетные направления исследований в области переработки минерального сырья // Обогащение руд. — 2014. — № 2. — С. 3 — 9.
11. Афонин Ю. С., Дубровин В. И. Моделирование составов смесей методом симплексных решеток // Радиоэлектроника. Информатика. Управление. — 2004. — № 2. — С. 60 — 63.
12. Зедгинидзе И. Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем. — М.: Наука, 1976. — 390 с.
13. Новик Ф. С. Планирование эксперимента на симплексе при изучении металлических систем. — М.: Металлургия, 1985. — 256 с.
14. 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.
15. Хтет Зо У, Чжо Зай Яа, Горячев Б. Е. Действие композиций из железного, цинкового купоросов и сернистого натрия на флотацию медно-цинковых колчеданных руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 12. — С. 139 — 151. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_12_0_139.
16. Obam S. O. The accuracy of Scheffe's third degree over second-degree, optimization regression polynomials // Nigerian Journal of Technology. 2006, vol. 25, no. 2, pp. 1 — 10.
17. Okafor F. O., Oguaghamba O. A. Procedure for optimization using Scheffe's models // Journal of Engineering Science and Application (JESA). 2009, vol. 7, no. 1, pp. 36 — 47.
18. Oguaghamba O. A., Mama B. O. Generalized Scheffe's second degree mathematical methods approach in engineering mixture design / 16th International Conference and Annual General Meeting, Nigerian Institute of Civil Engineers. 2018, no. 6, pp. 32 — 44.
19. Duangjit S., Mehr L. M., Kumpugdee-Vollrath M., Ngawhirunpat T. Role of simplex lattice statistical design in the formulation and optimization of microemulsions for transdermal delivery // Biological & Pharmaceutical Bulletin. 2014, vol. 37, no. 12, pp. 1948 — 1957.
20. Nwachukwu K. C., Okodugha D. A., Akosubo I. S., Atulomah F. K. Optimization of compressive strength of steel fibre reinforced concrete (SFRC) using scheffe's third-degree regression model // Iconic Research and Engineering Journals. 2022, vol. 5, no. 11, pp. 168 — 183. **PIAB**

REFERENCES

1. Chanturia V. A. Innovation-based processes of integrated and high-level processing of natural and technogenic minerals. *Gornyi Zhurnal*. 2015, no. 7, pp. 29–37. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2015.07.05.
2. Mamonov S. V., Dresvyankina T. P., Ziyatdinov S. V., Ershov A. A. Technological solutions for processing copper and copper-zinc ores of the pyrite deposit of the Urals. *Globus: geologiya i biznes*. 2020, no. 3 (62), pp. 140–144. [In Russ].
3. 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].
4. Romanenko Sergey A., Ushakov Egor K. The study of technological variability of copper-zinc pyrite pyrrhotite-containing ores on the example of the Priorskoye deposit. *Herald of the Kola Science Centre of RAS*. 2019, no. 4 (11), pp. 56–61. [In Russ].
5. Zimin A. V., Nemchinova L. A. Intensification of selective flotation of copper-zinc ores by thermomechanical modification of zinc minerals' surface. *Gornyi Zhurnal*. 2014, no. 11, pp. 56–60. [In Russ].
6. Karasov Yu. K., Yagudina Yu. P. Enhancement of flotation technology for copper-zinc ores processed at concentrating plant of Aktyubinsk copper company. *Russian Mining Industry Journal*. 2021, no. 5-2, pp. 29–32. [In Russ].
7. Chandra A. P., Gerson A. R. A review of the fundamental studies of the copper activation mechanisms for selective flotation of the sulfide minerals, sphalerite and pyrite. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2009, vol. 145, pp. 97–110.
8. Zimin A. V., Arustamyan M. A., Kalinin E. P., Solovyova L. M., Nemchinova L. A. Development of technological schemes for flotation enrichment of pyrite copper and copper-zinc ores. *Gornyi Zhurnal*. 2012, no. 11, pp. 28–33. [In Russ].
9. Gorbatova E. A., Emelianenko E. A., Ozhogina E. G. The expediency of predictive assessment of the enrichment of pyrite ores. Prospect and protection of mineral resources. *Prospect and protection of mineral resources*. 2019, no. 3, pp. 63–66. [In Russ].
10. Chanturia V. A., Kozlov A. P., Vaisberg L. A. Priority areas of research in the field of mineral processing. *Obogashchenie Rud*. 2014, no. 2, pp. 3–9. [In Russ].
11. Afonin Yu. S., Dubrovin V. I. Modeling of mixtures by the simplex lattice method. *Radioelectronics. Computer science. Management*. 2004, no. 2, pp. 60–63. [In Russ].
12. Zedginidze I. G. *Planirovanie eksperimenta dlya issledovaniya mnogokomponentnykh sistem* [Experiment planning for the study of multicomponent systems], Moscow, Nauka, 1976, 390 p.
13. Novik F. S. *Planirovanie eksperimenta na simplekse pri izuchenii metallicheskikh sistem* [Planning an experiment on a simplex in the study of metal systems], Moscow, Metallurgiya, 1985, 256 p.
14. Phyo 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, no. 11, pp. 128–142. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_11_0_128.
15. Htet Zaw Oo, Kyaw Zay Ya, Goryachev B. E. Effect of iron/zinc vitriol-sodium sulphide blends on copper-zinc sulphide ore flotation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 12, pp. 139–151. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_12_0_139.
16. Obam S. O. The accuracy of Scheffe's third degree over second-degree, optimization regression polynomials. *Nigerian Journal of Technology*. 2006, vol. 25, no. 2, pp. 1–10.
17. Okafor F. O., Oguaghamba O. A. Procedure for optimization using Scheffe's models. *Journal of Engineering Science and Application (JESA)*. 2009, vol. 7, no. 1, pp. 36–47.
18. Oguaghamba O. A., Mama B. O. Generalized Scheffe's second degree mathematical methods approach in engineering mixture design. *16th International Conference and Annual General Meeting*, Nigerian Institute of Civil Engineers. 2018, no. 6, pp. 32–44.
19. Duangjit S., Mehr L. M., Kumpugdee-Vollrath M., Ngawhirunpat T. Role of simplex lattice statistical design in the formulation and optimization of microemulsions for transdermal delivery. *Biological & Pharmaceutical Bulletin*. 2014, vol. 37, no. 12, pp. 1948–1957.
20. Nwachukwu K. C., Okodugha D. A., Akosubo I. S., Atulomah F. K. Optimization of compressive strength of steel fibre reinforced concrete (SFRC) using scheffe's third-degree regression model. *Iconic Research and Engineering Journals*. 2022, vol. 5, no. 11, pp. 168–183.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Хтет Зо У¹ — аспирант,
e-mail: htetzawoo68099@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0003-2040-2552,
Чжо Зай Яа¹ — канд. техн. наук,
стажер-докторант,
e-mail: kokyawgyi49@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0003-4364-9574,
Горячев Борис Евгеньевич¹ — д-р техн. наук,
профессор, e-mail: beg@misis.ru,
¹ НИТУ МИСИС.

Для контактов: Хтет Зо У, e-mail: htetzawoo68099@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Htet Zaw Oo¹, Graduate Student,
e-mail: htetzawoo68099@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0003-2040-2552,
Kyaw Zay Ya¹, Cand. Sci. (Eng.),
Intern-Doctoral Student,
e-mail: kokyawgyi49@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0003-4364-9574,
B.E. Goryachev¹, Dr. Sci. (Eng.),
Professor, e-mail: beg@misis.ru,
¹ NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia.

Corresponding author: Htet Zaw Oo, e-mail: htetzawoo68099@gmail.com.

Получена редакцией 23.01.2024; получена после рецензии 28.02.2024; принята к печати 10.07.2024.
Received by the editors 23.01.2024; received after the review 28.02.2024; accepted for printing 10.07.2024.



НОВИНКИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ГОРНАЯ КНИГА»



Галкин В.И.
Современные ленточные конвейеры. Справочное пособие

Год: 2024
Страниц: 316
ISBN: 978-5-98672-571-0
UDK: 622.647.2

Представлен краткий исторический обзор основных этапов создания, развития и применения ленточных конвейеров. Приведен сравнительный анализ конструктивных и эксплуатационных особенностей основных узлов ленточных конвейеров различного назначения с учетом области их применения. Представлены параметры и технические характеристики оборудования. Сформулированы основные требования, предъявляемые к современным ленточным конвейерам, и дана классификация их технико-технологической эффективности и экологической безопасности. Разработан классификатор ленточных конвейеров на основе

их существующей и перспективной технической оснащенности. Обозначены перспективные направления развития ленточного конвейеростроения в России.

Для инженерно-технических и научных работников, занимающихся конструированием, проектированием и эксплуатацией специальных ленточных конвейеров, а также преподавателей, аспирантов, магистров, бакалавров и студентов старших курсов вузов соответствующего профиля.