

УДК 622.765

Хтет Зо У

аспирант, НИТУ «МИСиС»,
119049, г. Москва,
Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1
e-mail: mghtetzawmisa@gmail.com

Чжо Зай Яа

кандидат технических наук,
стажер-докторант,
НИТУ «МИСиС»
e-mail: kokyawgyi49@gmail.com

Горячев Борис Евгеньевич

доктор технических наук, профессор,
НИТУ «МИСиС»
e-mail: beg@misis.ru

**РОЛЬ СИМПЛЕКСНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ
ЭКСПЕРИМЕНТА В СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ
СОСТАВОВ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ
СИСТЕМ РЕАГЕНТОВ-МОДИФИКАТОРОВ
ПРИ ФЛОТАЦИИ МЕДНО-ЦИНКОВЫХ РУД**

Аннотация:

Проведено изучение возможности повышения эффективности извлечения ценных металлов из медно-цинковых колчеданных руд при их флотации с применением композиций медного, цинкового купоросов и сернистого натрия. В работе предложен подход к совершенствованию технологии флотации медно-цинковых колчеданных руд на основе симплексного планирования экспериментов и последующего математического моделирования составов смесей реагентов-модификаторов. Установлено влияние композиций выбранных модификаторов на флотуемость минералов меди, железа и цинка в концентрат. Представлены результаты экспериментальных исследований флотации медно-цинковой руды, а также выполнено сравнение полученных данных между различными экспериментами. Предложены расчеты коэффициентов уравнения регрессии для построения математических моделей. Разработаны математические модели и определены оптимальные составы смесей реагентов-модификаторов данного процесса. Разработанные математические модели позволяют прогнозировать оптимальные составы смесей реагентов-модификаторов с целью максимизации извлечения меди и цинка при одновременной минимизации извлечения пирита в концентрат. Предложенный подход предоставляет инструментарий для улучшения технологических параметров процесса флотации медно-цинковых колчеданных руд и повышения его эффективности.

Ключевые слова: флотация, медно-цинковые руды, извлечение, медь, цинк, железо, реагенты-модификаторы, симплексное планирование, оптимизация.

DOI:

Htet Zaw Oo

Ph. D student, NUST MISIS,
119049 Moscow,
4 Leninsky Av., b. 1
e-mail: mghtetzawmisa@gmail.com

Kyaw Zay Ya

Candidate of Technical Sciences,
intern-doctoral student,
NUST MISIS
e-mail: kokyawgyi49@gmail.com

Goryachev Boris E.

Doctor of Technical Sciences, Professor,
NUST MISIS,
e-mail: beg@misis.ru

**ROLE OF SIMPLEX EXPERIMENTAL
PLANNING IN ENHANCING
THE PREDICTION AND OPTIMIZATION
OF MULTICOMPONENT SYSTEM
COMPOSITIONS OF REAGENT-MODIFIERS
IN THE FLOTATION OF COPPER-ZINC ORES**

Abstract:

The potential enhancement of valuable metal extraction from copper-zinc pyrite ores through flotation, using compositions comprising copper sulfate, zinc sulfate, and sodium sulfide, has been studied. The paper presents an approach aimed at enhancing the flotation technology of copper-zinc pyrite ores through the application of simplex experimental design and subsequent mathematical modeling of reagent-modifiers mixtures. The effect of the compositions of the selected modifiers on the floatability of copper, iron and zinc minerals in the concentrate has been established. The results of experimental studies on copper-zinc ore flotation are presented, and the obtained data are compared across various experiments. Additionally, calculations of regression equation coefficients are provided for the development of mathematical models. Mathematical models have been formulated to determine the optimal compositions of reagent modifiers in the process. These models facilitate the prediction of optimal mixtures, aiming to maximize the recovery of copper and zinc while concurrently minimizing the recovery of pyrite in the concentrate. The proposed approach offers a systematic framework for enhancing the technological parameters of the copper-zinc pyrite ore flotation process and increasing its efficiency.

Key words: flotation, copper-zinc ores, recovery, copper, zinc, iron, reagents-modifiers, simplex planning, optimization

Введение

Медно-цинковые руды в России в основном представлены месторождениями Урала и могут быть классифицированы как труднообогатимые [1, 2]. Основным процессом обогащения таких руд является флотация, и лишь малая их часть подвергается металлургической переработке или обогащению другими методами [3]. Флотационное обогащение медно-цинковых руд представляет собой сложный процесс, сопряженный с определенными трудностями в достижении высокого качества конечных продуктов. Основной проблемой является близость флотационных свойств сульфидов меди, цинка и железа, а также сложность их вещественного состава и характера вкрапленности [4 - 6].

Из практики обогатительных фабрик медно-цинковых руд следует, что получение высококачественных концентратов [7] невозможно без применения в процессе флотации различных реагентов-модификаторов. В качестве таких модификаторов используются сульфаты меди (II), цинка и сульфида натрия в щелочной известковой среде [8, 9]. В настоящее время совершенствование технологии флотации медно-цинковых руд проводится по нескольким направлениям. Одним из основных направлений повышения технологических показателей обогащения этих руд является совершенствование реагентного режима флотации [10, 11].

Однако сложные взаимосвязи между различными составами реагентов-модификаторов (факторы) и их характеристиками флотации (отклики) до конца не исследованы. В связи с этим оптимизация составов многокомпонентных смесей модификаторов для прогнозирования и анализа их влияния на процесс флотации медно-цинковых руд является актуальной задачей. Для решения этой проблемы в рамках нашего исследования был проведен дизайн и разработка трехкомпонентных систем реагентов-модификаторов для флотации медно-цинковых руд. В работе основные методы совершенствования реагентного режима ориентированы на использование симплекс-метода, математического моделирования составов смесей реагентов-модификаторов и программного обеспечения Design Expert® [12, 13].

Материалы и методы исследования.

Материалы, использованные в работе

Объектом исследований являлась медно-цинковая колчеданная руда одного из месторождений Урала. Средние массовые доли меди и цинка в частных пробах руды составили $0,65 \pm 0,02\%$ и $1,37 \pm 0,08\%$ [14]. Флотореагенты, использованные в работе: собиратель – бутилксантогенат калия, пенообразователь – сосновое масло, регулятор среды – известь, модификаторы – медный, цинковый купоросы и сульфид натрия.

Аппараты и приборы

Дробление руды проводилось в лабораторной щековой дробилке ДЩ 80x150; дробленая руда измельчалась в лабораторной шаровой мельнице МШЛ-1; флотация руды осуществлялась в лабораторной флотомашине механического типа ФЛ-137. Определение содержания меди, железа и цинка во флотоконцентрат проводилось на рентгенофлуоресцентном спектрометре ElvaX.

Метод симплексного планирования эксперимента

В данной работе применен симплекс–решетчатый план четвертого порядка Шеффе в соответствии с методом симплексного планирования эксперимента [15 – 17]. Применение симплекс-метода позволило, при ограниченном числе экспериментов с меньшим шагом планирования, получить математические модели. Симплекс-решетчатый план четвертого порядка Шеффе представлен на рис. 1.

Каждая точка на графике представляет собой состав – массовое содержание каждого из компонентов в смеси. В качестве факторов были выбраны три компонента смеси, включая CuSO_4 (x_1), ZnSO_4 (x_2) и Na_2S (x_3). Для решения поставленной задачи на

основе анализа научных данных была составлена матрица математического планирования эксперимента, состоящая из 15 экспериментальных опытов (табл. 1).

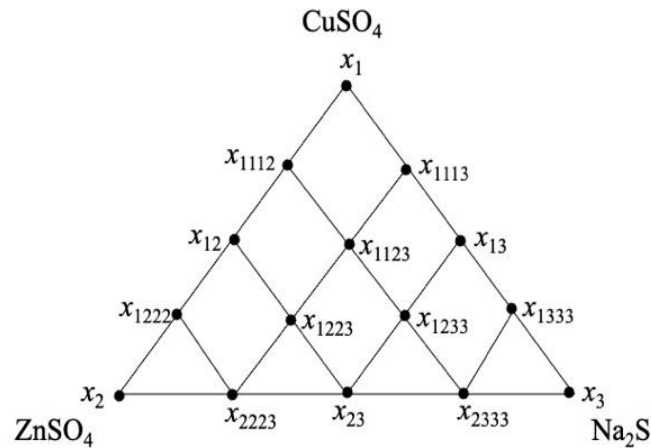


Рис. 1. Симплекс-решетчатый план четвертого порядка Шеффе

Таблица 1

Обозначение откликов в матрице планирования для {3,4}-решетки

№ опыта	Пропорции компонентов, доли ед.			Обозначение точки	Отклики
	x_1	x_2	x_3		
1	1	0	0	x_1	y_1
2	0	1	0	x_2	y_2
3	0	0	1	x_3	y_3
4	0,5	0,5	0	x_{12}	y_{12}
5	0,5	0	0,5	x_{13}	y_{13}
6	0	0,5	0,5	x_{23}	y_{23}
7	0,75	0,25	0	x_{1112}	y_{1112}
8	0,25	0,75	0	x_{1222}	y_{1222}
9	0,75	0	0,25	x_{1113}	y_{1113}
10	0,25	0	0,75	x_{1333}	y_{1333}
11	0	0,75	0,25	x_{2223}	y_{2223}
12	0	0,25	0,75	x_{2333}	y_{2333}
13	0,5	0,25	0,25	x_{1123}	y_{1123}
14	0,25	0,5	0,25	x_{1223}	y_{1223}
15	0,25	0,25	0,5	x_{1233}	y_{1233}

Методика проведения флотации

Исходная руда дробилась в щековой дробилке до крупности – 3 мм, из которой после усреднения и сокращения формировались частные пробы массой 250 г. Частные пробы измельчались до крупности 80 % класса -74 мкм и направлялись на флотацию [18]. В лабораторных условиях проведены серии флотационных опытов в соответствии с технологической схемой, которая включает в себя флотацию I и флотацию II. Схема флотации медно-цинковой руды представлена на рис. 2.

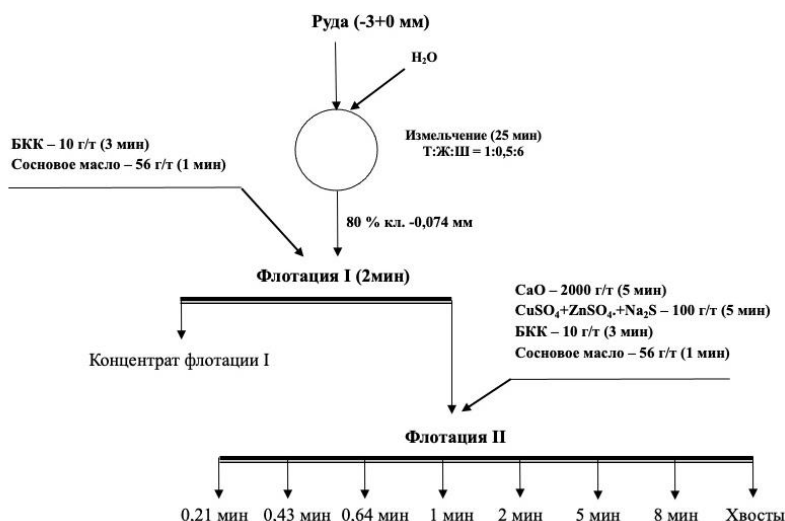


Рис. 2. Схема флотации медно-цинковой руды

*Результаты исследования и их обсуждение
Исследование флотации I медно-цинковой руды
без реагентов-модификаторов*

Как показано на схеме флотации медно-цинковой руды, в процессе флотации I дозируются только собиратель – бутиловый ксантогенат калия и пенообразователь – сосновое масло. Флотация I была проведена в течение 2 минут, результаты на рис. 3.

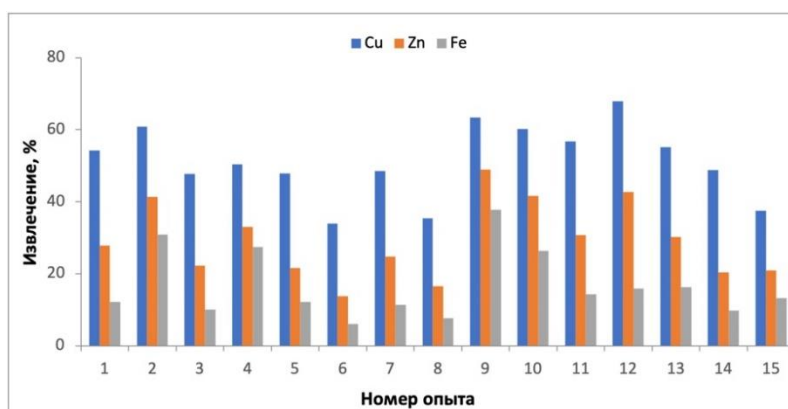


Рис. 3. Результаты флотации I медно-цинковой руды без модификаторов

На основе анализа полученных результатов флотации I установлено, что извлечение меди в концентрат варьируется от 33,91 до 67,95 %, цинка – от 13,7 до 48,88 %, а железа – от 6 до 37,73 %, что свидетельствует о значительных различиях в эффективности извлечения сульфидных минералов при отсутствии модификаторов. Общий тренд показывает, что извлечение меди и цинка чаще выше, чем извлечение железа в рассматриваемых образцах.

*Исследование влияния композиций реагентов-модификаторов
на флотацию II медно-цинковой руды*

В соответствии со схемой флотации можно утверждать, что хвосты флотации I используются в качестве питания для флотации II. Для оценки влияния композиций реагентов-модификаторов на флотацию медно-цинковой руды дозирование медного, цинкового купоросов и сернистого натрия во флотацию II проводилось по симплекс-

методу. Общий расход композиций реагентов-модификаторов во всех опытах был постоянным – 100 г/т. Несмотря на время флотации II до 8 минут, накопленное извлечение всех металлов было рассчитано до одной минуты для сравнения результатов. Результаты экспериментальных исследований флотации II с использованием смесей двух модификаторов представлены на рис. 4.

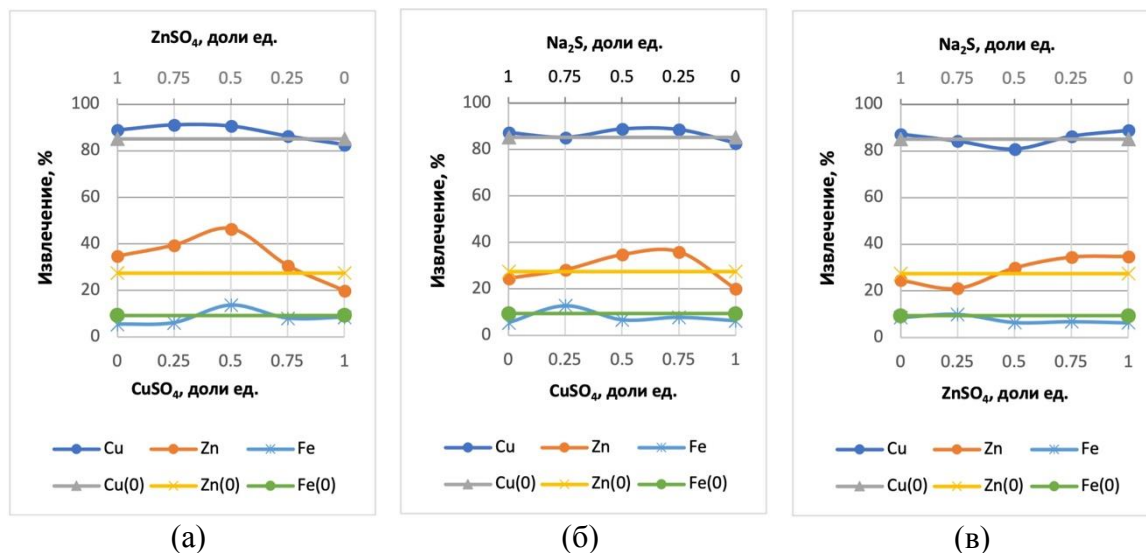


Рис. 4. Результаты влияния композиций двухкомпонентных реагентов-модификаторов на флотацию II медно-цинковой руды

Полученные результаты показывают, что из представленных композиций двух модификаторов $\text{CuSO}_4+\text{ZnSO}_4$ (а), $\text{CuSO}_4+\text{Na}_2\text{S}$ (б) и $\text{ZnSO}_4+\text{Na}_2\text{S}$ (в) значимое влияние на флотиремость минералов меди и цинка оказывает сочетание медного купороса с цинковым купоросом. Наилучшее извлечение минералов меди 91,19 % с применением состава указанных выше модификаторов достигается при пропорциях 0,25 первого и 0,75 второго реагентов. В большей степени повышение флотиремости минералов цинка происходит при расходе указанных реагентов в равных пропорциях 0,5 и 0,5. В сравнении с нулевым режимом отмечается повышение извлечения цинка в концентрат с 27,47 до 46,52 %.

Несмотря на это, удалось получить концентрат с максимальным извлечением меди и цинка при одновременной минимизации извлечения пирита с использованием предложенного первым состава модификаторов. Введение цинкового купороса с сернистым натрием либо не оказывает влияния на флотацию меди, либо частично приводит к ее депрессии. При сочетании 0,25 первого и 0,75 второго реагентов отмечается частичное снижение извлечения цинка в концентрат до 21,1 %.

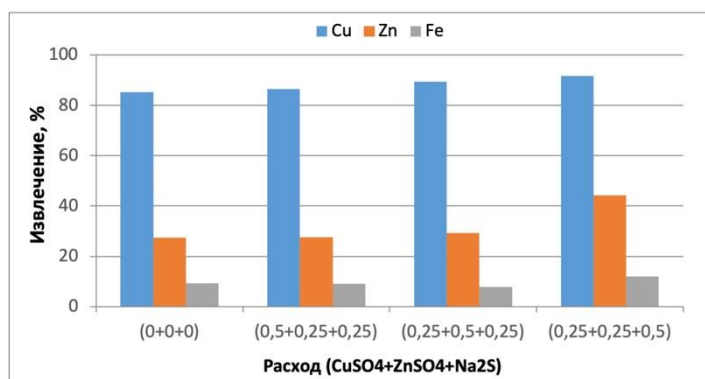


Рис. 5. Результаты флотации II медно-цинковой руды с применением композиций трех реагентов-модификаторов

На рис. 5 представлены результаты флотации II с применением композиций трех реагентов-модификаторов – медного, цинкового купоросов и сернистого натрия. При этом с расходом тройной смеси, содержащей 0,25 доли первого, 0,25 доли второго и 0,5 доли третьего компонентов, извлечение меди в концентрат составляет 91,66 %, а цинка и железа – 44,21 и 12,07 %, соответственно. Этот результат приводит к общему увеличению извлечения обоих металлов на 23,16 % по сравнению с нулевым режимом.

Таким образом, экспериментальными исследованиями флотации II установлено, что введение реагентов во флотацию II как двойной смеси $\text{CuSO}_4 + \text{ZnSO}_4 - [0,25; 0,75]$, так и тройной смеси $\text{CuSO}_4 + \text{ZnSO}_4 + \text{Na}_2\text{S} - [0,25; 0,25; 0,5]$ приводит не только к увеличению извлечения меди и цинка, но также одновременно снижает извлечение пирита в концентрат.

Расчет коэффициентов уравнений и описание математических моделей

Для установления взаимосвязи между тремя факторами CuSO_4 (x_1), ZnSO_4 (x_2) и Na_2S (x_3) и функцией отклика (извлечение) и построения модели была использована модель четвертого порядка Шеффе [19, 20]. Математическая модель данного плана между функцией отклика и факторами имеет вид полиномиальной функции (1):

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

На основе экспериментальных данных флотации II, процедуры расчета матриц коэффициентов уравнений проводились с использованием значений функции отклика в каждой точке симплекса по формулам [21]. Рассчитанные коэффициенты уравнения для расчета извлечения меди, железа и цинка представлены в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициенты уравнения для расчета извлечения меди, цинка и железа

Коэффициенты уравнения для расчета извлечения меди (ϵ_{Cu})							
β_1	β_2	β_3	β_{12}	β_{13}	β_{23}	γ_{12}	γ_{13}
82,69	88,92	87,31	19,54	15,6	-29,02	-9,25	30,83
γ_{23}	δ_{12}	δ_{13}	δ_{23}	β_{1123}	β_{1223}	β_{1233}	
6,8	-15,01	-21,76	57,31	-439,01	22,56	621,47	
Коэффициенты уравнения для расчета извлечения цинка (ϵ_{Zn})							
β_1	β_2	β_3	β_{12}	β_{13}	β_{23}	γ_{12}	γ_{13}
19,98	34,77	24,58	76,58	49,92	0,82	-7,17	53,33
γ_{23}	δ_{12}	δ_{13}	δ_{23}	β_{1123}	β_{1223}	β_{1233}	
44,35	-141,73	10,67	-43,17	-1238,53	-1077,97	1824,51	
Коэффициенты уравнения для расчета извлечения железа (ϵ_{Fe})							
β_1	β_2	β_3	β_{12}	β_{13}	β_{23}	γ_{12}	γ_{13}
5,47	8,51	6,3	27,16	3,26	-3,78	-2,35	28,72
γ_{23}	δ_{12}	δ_{13}	δ_{23}	β_{1123}	β_{1223}	β_{1233}	
10,53	-105,44	80,61	35,28	-212,4	-305,09	522,03	

Таким образом, подставляя значение коэффициентов в уравнение (1), можно получить математические модели (2) – (4), предназначенные для расчета извлечения меди, цинка и железа в концентрат флотации II:

$$Y_{Cu} = 82,69x_1 + 88,92x_2 + 87,31x_3 + 19,54x_1x_2 + 15,6x_1x_3 - 29,02x_2x_3 - 9,25x_1x_2(x_1 - x_2) + 30,83x_1x_3(x_1 - x_3) + 6,8x_2x_3(x_2 - x_3) - 15,01x_1x_2(x_1 - x_2)^2 - 21,76x_1x_3(x_1 - x_3)^2 + 57,31x_2x_3(x_2 - x_3)^2 - 439,01x_1^2x_2x_3 + 22,56x_1x_2^2x_3 + 621,47x_1x_2x_3^2; \quad (2)$$

$$Y_{Zn} = 19,98x_1 + 34,77x_2 + 24,58x_3 + 76,58x_1x_2 + 49,92x_1x_3 + 0,82x_2x_3 - 7,17x_1x_2(x_1 - x_2) + 53,33x_1x_3(x_1 - x_3) + 44,35x_2x_3(x_2 - x_3) - 141,73x_1x_2(x_1 - x_2)^2 + 10,67x_1x_3(x_1 - x_3)^2 - 43,17x_2x_3(x_2 - x_3)^2 - 1238,53x_1^2x_2x_3 - 1077,97x_1x_2^2x_3 + 1824,51x_1x_2x_3^2; \quad (3)$$

$$Y_{Fe} = 5,47x_1 + 8,51x_2 + 6,3x_3 + 27,16x_1x_2 + 3,26x_1x_3 - 3,78x_2x_3 - 2,35x_1x_2(x_1 - x_2) + 28,72x_1x_3(x_1 - x_3) + 10,53x_2x_3(x_2 - x_3) - 105,44x_1x_2(x_1 - x_2)^2 + 80,61x_1x_3(x_1 - x_3)^2 + 35,28x_2x_3(x_2 - x_3)^2 - 212,4x_1^2x_2x_3 - 305,09x_1x_2^2x_3 + 522,03x_1x_2x_3^2. \quad (4)$$

Поверхности отклика для каждой переменной отклика были предсказаны путем моделирования долей компонентов в смесях реагентов на основе экспериментальных данных. По разработанным моделям произведен расчет извлечения меди, железа и цинка в концентрат флотации II с шагом 5 % массовой доли каждого компонента в рассматриваемых смесях. Результаты зависимости расчетных извлечений меди, цинка и железа от относительных долей компонентов в смесях реагентов-модификаторов представлены на рис. 6, который построен при помощи компьютерной программы Design Expert® [<https://www.statease.com/>].

По полученным результатам разработанных моделей можно отметить, что наиболее эффективным влиянием оказывается сочетание реагентов-модификаторов как двойная смесь $CuSO_4+ZnSO_4$ (AB), так и тройная смесь $CuSO_4+ZnSO_4+Na_2S$ (ABC). При сочетании относительных долей 0,4 медного купороса и 0,6 медного купороса модель прогнозирует извлечение меди и цинка в концентрат на уровне 91,42 и 46,22 %, в то время как извлечение железа составляет 12,9 %. Однако максимальное извлечение цинка прогнозируется при другом соотношении смеси реагентов: 0,45 первого и 0,55 второго. В этом случае модель предсказывает достижение значений извлечения меди, цинка и железа в концентрате – 91,14, 46,89 и 13,66 %, соответственно (что близко к упомянутым ранее значениям).

В результате анализа модели с учетом всех трех факторов (x_1, x_2, x_3) предполагается, что модель прогнозирует оптимальный состав смеси реагентов $CuSO_4+ZnSO_4+Na_2S$ в долях [0,25:0,2:0,55]. Этот состав предназначен для достижения наилучших результатов извлечения меди и цинка с одновременным минимизированием извлечения железа в концентрат, что приводит к следующим показателям: 91,86 % меди, 45,01 % цинка и 12,55 % железа.

Таким образом, сопоставляя расчетные извлечения металлов в двух- и трехкомпонентных смесях модификаторов, установлено, что в симплексных точках модели предсказываются оптимальные составы с тремя реагентами. Согласно разработанным моделям, оптимальными составами смесей, используемых в работе модификаторов, являются $CuSO_4+ZnSO_4$ - [0,4:0,6] и $CuSO_4+ZnSO_4+Na_2S$ - [0,25:0,2:0,55].

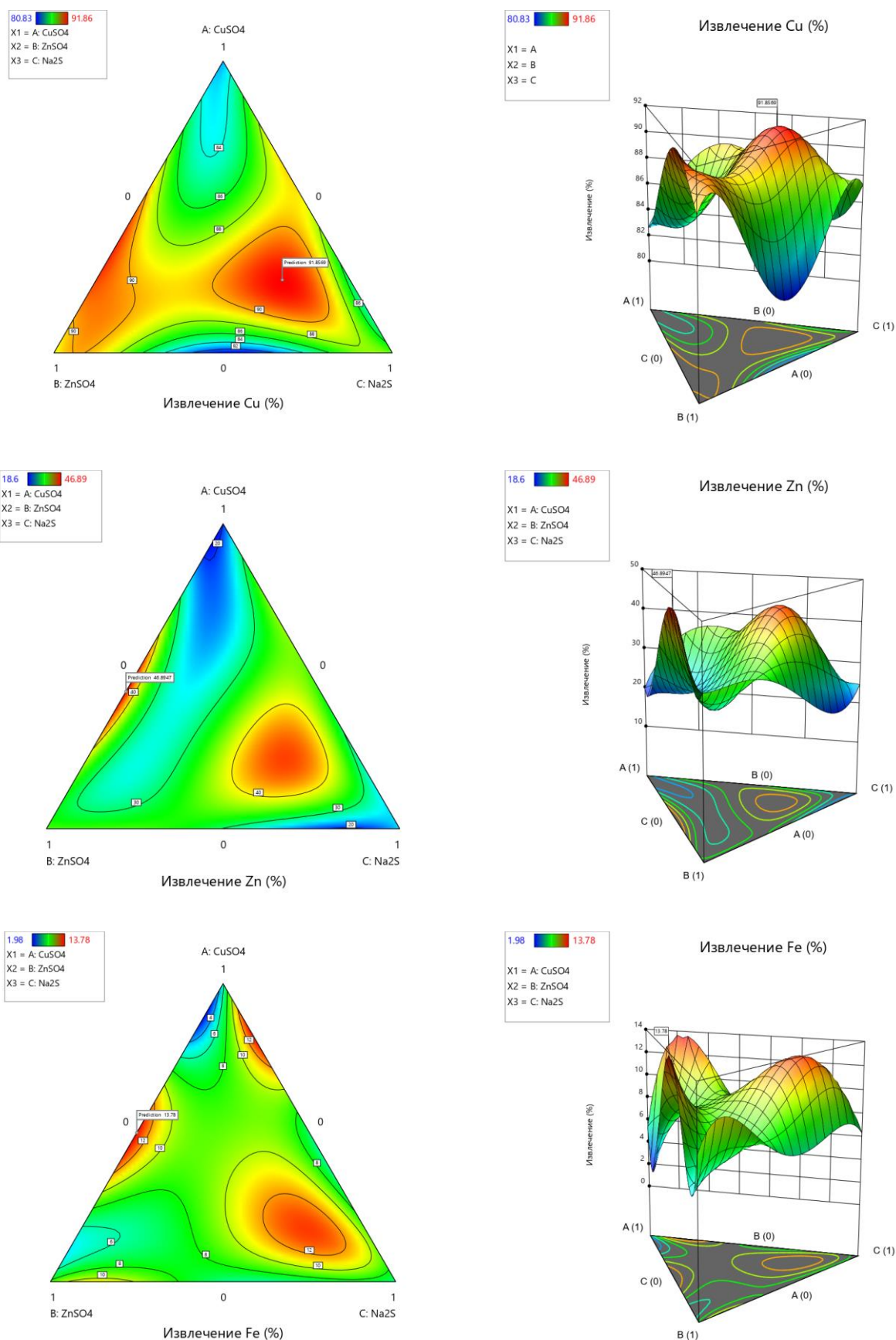


Рис. 6. Зависимость расчетных извлечений меди, цинка и железа в концентрат флотации II от долей медного, цинкового купоросов и сернистого натрия в их смесях

Выводы

- Экспериментальными исследованиями флотации II установлено, что оптимальными составами смесей модификаторов являются $\text{CuSO}_4+\text{ZnSO}_4$ - [0,25;0,75], $\text{CuSO}_4+\text{ZnSO}_4+\text{Na}_2\text{S}$ - [0,25;0,25;0,5] при общем расходе данных смесей – 100 г/т. При этом извлечения меди, цинка и железа в концентрат достигнуты при первом составе смеси – 91,19, 39,46 и 6,16 %, при втором – 91,66, 44,21 и 12,07 %, соответственно.
- На основе экспериментальных данных флотации II были вычислены коэффициенты уравнения и разработаны математические модели в виде зависимостей извлечения меди, цинка и железа от относительных долей каждого из компонентов в смеси.
- По разработанным моделям были найдены два возможных оптимальных состава смесей модификаторов $\text{CuSO}_4+\text{ZnSO}_4$ – [0,4;0,6] и $\text{CuSO}_4+\text{ZnSO}_4+\text{Na}_2\text{S}$ – [0,25;0,2;0,55]. При этом могут быть спрогнозированы извлечения меди, цинка и железа в концентрат на уровне 91,42, 46,22 и 12,9 % при первом составе, а также на уровне 91,86, 45,01 и 12,55 % при втором составе.
- Применение симплексного планирования эксперимента в данном исследовании имеет значительное преимущество, заключающееся в том, что для разработки приемлемой модели трехкомпонентных смесей модификаторов требуется всего 15 флотационных опытов. Разработанные модели предоставляют возможность оптимизации технологических параметров флотации медно-цинковой руды с использованием предложенных в работе композиций реагентов-модификаторов.

Список литературы

1. Мамонов С.В., Дресвянкина Т.П., Зиятдинов С.В., Ершов А.А., 2020. Технологические решения переработки медных и медно-цинковых руд колчеданного месторождения Урала. *Глобус: геология и бизнес*, № 3 (62), С. 140–144.
2. Бочаров В.А., Рыскин М.Я., Поспелов Н.Д., 1979. Развитие технологии переработки медно-цинковых руд Урала. *Цветные металлы*, № 10, С. 105–107.
3. Заварухина Е.А., Орехова Н.Н., 2017. Влияние дополнительного собирателя на селективность флотационного разделения сульфидов меди и цинка. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 3, С. 305–311.
4. Чантурия В.А., 2015. Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки минерального сырья природного и техногенного происхождения. *Горный журнал*, № 7, С. 29–37. DOI: <http://dx.doi.org/10.17580/gzh.2015.07.05>.
5. Зимин А.В., Немчинова Л.А., 2014. Интенсификация селективной флотации медно-цинковых руд термомеханическим модифицированием поверхности цинковых минералов. *Горный журнал*, № 11, С. 56–60.
6. Чантурия В.А., 2009. Инновационные процессы в технологиях переработки минерального сырья сложного вещественного состава. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 15, С. 9–25.
7. Васильева А.А., Бодуэн А.Я., 2023. Минералогические особенности и способы переработки медных цинксодержащих концентратов. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, Т. 334, № 3, С. 61–72. DOI: 10.18799/24131830/2023/3/3956.
8. Зай Яа Чжо, Чжо Чжо Пье, Копылов А.Б., Ковалев Р.А., 2021. Совершенствование реагентных режимов флотации сфалерита и пирита из месторождений колчеданных медно-цинковых и полиметаллических руд. *Известия ТулГУ. Науки о Земле*, № 2, С. 374–388. DOI 10.46689/2218-5194-2021-4-1-374-388
9. Чжо Зай Яа, Хтет Зо У, Шехирев Д.В., Горячев Б. Е., 2023. Влияние сульфата железа, сернистого натрия и их смеси на флотацию сфалерита в щелочной среде. *Устойчивое развитие горных территорий*, Т. 15, № 1, С. 122–133. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-1-122-133.

10. Карасов Ю.К., Ягудина Ю.Р., 2021. Совершенствование технологии флотации медно-цинковых руд, перерабатываемых на обогатительной фабрике Актюбинской медной компании. *Горная промышленность*, № 5 (2), С. 29–32.
11. Горбатова Е.А., Емельяненко Е.А., Ожогина Е.Г., 2019. Целесообразность прогнозной оценки обогатимости колчеданных руд. *Журнал «Разведка и охрана недр»*, № 3, С. 63–66.
12. Афонин Ю.С., Дубровин В.И., 2004. Моделирование составов смесей методом симплексных решеток. *Радиоэлектроника. Информатика. Управление*, № 2, С. 60–63.
13. Duangjit S., Mehr L.M., Kumpugdee-Vollrath M., Ngawhirunpat T., 2014. Role of simplex lattice statistical design in the formulation and optimization of microemulsions for transdermal delivery. *Biological & Pharmaceutical Bulletin*, Vol. 37, No. 12, pp. 1948–1957.
14. Хтет Зо У, Чжо Зай Яа, Горячев Б.Е., 2023. Действие композиций из железного, цинкового купоросов и сернистого натрия на флотацию медно-цинковых колчеданных руд. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 12, С. 139–151. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_12_0_139.
15. Новик Ф.С., 1985. *Планирование эксперимента на симплексе при изучении металлических систем*. Москва: Металлургия, 256 с.
16. Oguaghamba O.A., Mama B.O., 2018. Generalized Scheffe's second degree mathematical methods approach in engineering mixture design. *Conference paper: 16th International Conference and Annual General Meeting, Nigerian Institute of Civil Engineers*, No. 6, pp. 32–44.
17. K. C. Nwachukwu, D. A. Okodugha, I. S. Akosubo, F.K. Atulomah., 2022. Optimization of Compressive Strength of Steel Fibre Reinforced Concrete (SFRC) Using Scheffe's Third-Degree Regression Model. *Iconic Research and Engineering Journals*, Vol. 5, No. 11, pp. 168–183.
18. Пье Чжо Чжо, Чжо Зай Яа, Горячев Б. Е., 2023. Действие композиций металлосодержащих модификаторов поверхности сульфидных минералов цветных тяжелых металлов при флотации медно-цинковых руд. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 11, С. 128–142. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_11_0_128.
19. Okafor F.O., Oguaghamba O.A., 2009. Procedure for optimization using Scheffe's models. *Journal of Engineering Science and Application (JESA)*, Vol. 7, No. 1, pp. 36–47.
20. Obam S.O., 2006. The accuracy of Scheffe's third degree over second-degree, optimization regression polynomials. *Nigerian Journal of Technology*, Vol. 25, No. 2, pp. 1–10.
21. Зедгинидзе И.Г., 1976. *Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем*. Москва: Наука, 390 с.

References

1. Mamonov S.V., Dresvyankina T.P., Ziyatdinov S.V., Ershov A.A., 2020. Tekhnologicheskiye resheniya pererabotki mednykh i medno-tsinkovykh rud kolchedannogo mestorozhdeniya Urala [Technological solutions for processing copper and copper-zinc ores of the pyrite deposit of the Urals]. *Globus: geologiya i biznes*, № 3 (62), P. 140–144.
2. Bocharov V.A., Ryskin M. Ya., Pospelov N. D., 1979. Razvitiye tekhnologii pererabotki medno-tsinkovykh rud Urala [Development of technology for processing copper-zinc ores of the Urals]. *Tsvetnye Metally*, № 10, P. 105–107.
3. Zavarukhina E.A., Orekhova N.N., 2017. Vliyaniye dopolnitel'nogo sobiratelya na selektivnost' flotatsionnogo razdeleniya sul'fidov medi i tsinka [Effects of additional col-

lecting agent on selectivity of flotation of copper and zinc sulfides]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten*, № 3, P. 305—311.

4. Chanturiya V.A., 2015. Innovatsionnyye protsessy kompleksnoy i glubokoy pererabotki mineral'nogo syr'ya prirodnogo i tekhnogenno proiskhozhdeniya [Innovation-based processes of integrated and high-level processing of natural and technogenic minerals]. *Gornyy zhurnal*, № 7, P. 29–37. DOI: <http://dx.doi.org/10.17580/gzh.2015.07.05>.

5. Zimin A.V., Nemchinova L.A., 2014. Intensifikatsiya selektivnoy flotatsii medno-tsinkovykh rud termomekhanicheskim modifitsirovaniyem poverkhnosti tsinkovykh mineralov [Intensification of selective flotation of copper-zinc ores by thermomechanical modification of zinc minerals' surface]. *Gornyy zhurnal*, № 11, P. 56–60.

6. Chanturiya V.A., 2009. Innovatsionnyye protsessy v tekhnologiyakh pererabotki mineral'nogo syr'ya slozhnogo veshchestvennogo sostava [Innovative processes in technologies for processing mineral raw materials of complex material composition]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten*, № 15, P. 9–25.

7. Vasilyeva A.A., Baudouin A.Ya., 2023. Mineralogicheskiye osobennosti i sposoby pererabotki mednykh tsinksoderzhashchikh kontsentratsiy [Mineralogical features and methods of processing copper zinc-containing concentrates]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, T. 334, № 3, P. 61–72. DOI: [10.18799/24131830/2023/3/3956](https://doi.org/10.18799/24131830/2023/3/3956).

8. Zay Ya Kyaw, Kyaw Kyaw Phy, A. B. Kopylov, R. A. Kovalev, 2021. Sovershenstvovaniye reagentnykh rezhimov flotatsii sfalerita i pirita iz mestorozhdeniy kolchedannykh medno-tsinkovykh i polimetallicheskikh rud [Improving reagent modes for flotation of sphalerite and pyrite from deposits of pyrite copper-zinc and polymetallic ores]. *Izvestiya Telugu. Nauki o Zemle*, № 2, P. 374–388. DOI [10.46689/2218-5194-2021-4-1-374-388](https://doi.org/10.46689/2218-5194-2021-4-1-374-388)

9. Kyaw Zay Ya, Htet Zaw Oo, Shekhirev D. V., Goryachev B. E., 2023. Vliyaniye sul'fata zheleza, sernistogo natriya i ikh smesi na flotatsiyu sfalerita v shchelochnoy srede [The effect of ferrous sulfate, sodium sulfide and their mixtures on the flotation of sphalerite in the alkaline medium]. *Ustoychivoye razvitiye gornyykh territoriy*, Vol. 15, № 1, P. 122–133. DOI: [10.21177/1998-4502-2023-15-1-122-133](https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-1-122-133).

10. Yu. K. Karasov, Yu.R. Yagudina., 2021. Sovershenstvovaniye tekhnologii flotatsii medno-tsinkovykh rud, pererabatyvayemykh na obogatitel'noy fabrike Aktyubinskoy mednoy kompanii [Improving the flotation technology of copper-zinc ores processed at the concentrating plant of the Aktobe Copper Company]. *Gornaya promyshlennost'*, № 5 (2), P. 29–32.

11. Gorbatova E.A., Emelianenko E.A., Ozhogina E.G., 2019. Tselesoobraznost' prognoznoy otsenki obogatimosti kolchedannykh rud [The expediency of predictive assessment of the enrichment of pyrite ores]. *Zhurnal «Razvedka i okhrana nedr»*, № 3, P. 63–66.

12. Afonin Yu. S., Dubrovin V. I., 2004. Modelirovaniye sostavov smesey metodom simpleksnykh reshetok [Modeling of mixtures by the simplex lattice method]. *Radioelektronika. Informatika. Upravleniye*, № 2, P. 60–63.

13. Duangjit S., Mehr L.M., Kumpugdee-Vollrath M., Ngawhirunpat T., 2014. Role of simplex lattice statistical design in the formulation and optimization of microemulsions for transdermal delivery. *Biological & Pharmaceutical Bulletin*, Vol. 37, No. 12, pp. 1948–1957.

14. Htet Zaw Oo, Kyaw Zay Ya, Goryachev B. E., 2023. Deystviye kompozitsiy iz zhelezno, tsinkovogo kuporosov i sernistogo natriya na flotatsiyu medno-tsinkovykh kolchedannykh rud [Effect of iron/zinc vitriol–sodium sulphide blends on copper–zinc sulphide ore flotation]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten*, № 12, P. 139–151. DOI: [10.25018/0236_1493_2023_12_0_139](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_12_0_139).

15. Novik F. S., 1985. Planirovaniye eksperimenta na simplekse pri izuchenii metallicheskih sistem [Planning an experiment on a simplex in the study of metal systems]. Moscow: Metallurgiya, 256 p.

16. Oguaghamba O. A., Mama B. O., 2018. Generalized Scheffe's second degree mathematical methods approach in engineering mixture design. *Conference paper: 16th International Conference and Annual General Meeting, Nigerian Institute of Civil Engineers*, No. 6, pp. 32–44.
17. K.C. Nwachukwu, D.A. Okodugha, I.S. Akosubo, F.K. Atulomah., 2022. Optimization of Compressive Strength of Steel Fibre Reinforced Concrete (SFRC) Using Scheffe's Third-Degree Regression Model. *Iconic Research and Engineering Journals*, Vol. 5, No. 11, pp. 168–183.
18. Phyo Kyaw Kyaw, Kyaw Zaya Ya, Goryachev B.E., 2023. Deystviye kompozitsiy metallosoderzhashchikh modifikatorov poverkhnosti sul'fidnykh mineralov tsvetnykh tyazhelykh metallov pri flotatsii medno-tsinkovykh rud [Effect of composition of metal-bearing surface modifiers for sulfide minerals of base heavy metals in copper–zinc ore flotation]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten*, № 11, P. 128-142. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_11_0_128.
19. Okafor F.O., Oguaghamba O.A., 2009. Procedure for optimization using Scheffe's models. *Journal of Engineering Science and Application (JESA)*, Vol. 7, No. 1, pp. 36–47.
20. Obam S.O., 2006. The accuracy of Scheffe's third degree over second-degree, optimization regression polynomials. *Nigerian Journal of Technology*, Vol. 25, No. 2, pp. 1-10.
21. Zedginidze I.G., 1976. *Planirovaniye eksperimenta dlya issledovaniya mnogokomponentnykh sistem* [Experiment planning for the study of multicomponent systems]. Moscow: Nauka, 390 p.