

## ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕЙСТВИЯ КОМПОЗИЦИИ МЕТАЛЛОСОДЕРЖАЩИХ МОДИФИКАТОРОВ НА ФЛОТАЦИЮ СУЛЬФИДНЫХ МИНЕРАЛОВ ЦВЕТНЫХ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

Пье Чжо Чжо<sup>1</sup>, Чжо Зай Яа<sup>1</sup>, Б.Е. Горячев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> НИТУ МИСИС, Москва, Россия,  
e-mail: bophyo1831993@gmail.com; beg@misis.ru

**Аннотация:** Представлены результаты исследований влияния металлосодержащих модификаторов на флотацию сульфидов меди, цинка и пирита, содержащихся в медно-цинковой колчеданной руде одного из уральских месторождений, и результаты моделирования зависимостей извлечения меди, железа и цинка в концентрат флотации II (основная медно-цинковая флотация) от относительных долей каждого из купоросов в их смеси. В работе применен симплекс-план четвертого порядка при смешивании модификаторов в различных пропорциях. Модификаторы, такие как медный купорос ( $\text{CuSO}_4$ ), железный купорос ( $\text{FeSO}_4$ ) и цинковый купорос ( $\text{ZnSO}_4$ ), смешиваются и добавляются во флотацию II, которая по сути является медно-цинковой флотацией. Анализ экспериментальных результатов показал, что смесь железного купороса ( $\text{FeSO}_4$ ) 25 г/т и медного купороса ( $\text{CuSO}_4$ ) 75 г/т, добавляемая во флотацию II, при общем расходе смеси 100 г/т позволяет достигнуть максимального суммарного извлечения меди и цинка в концентрат – 137,6%. По результатам флотационного эксперимента рассчитана взаимосвязь между извлечениями меди, цинка и пирита в концентрат флотации и относительными долями каждого из модификаторов при их общем расходе во флотацию 100 г/т. Полученные уравнения могут быть использованы в системе дозирования данных реагентов в медно-цинковую флотацию. По полученным моделям были рассчитаны извлечения меди, железа и цинка в концентрате флотации II, которые позволили определить составы смеси, при которых может наблюдаться максимальное извлечение меди и цинка в концентрат при минимальном извлечении железа. Согласно результатам расчетного моделирования, наибольший интерес представляет исследование действия смеси медного и железного купоросов, которая дозируется во флотацию II.

**Ключевые слова:** медно-цинковые колчеданные руды, решетчатый план Шеффе, модификатор, реагенты, флотация, извлечение, медь, цинк, железо.

**Для цитирования:** Пье Чжо Чжо, Чжо Зай Яа, Горячев Б. Е. Исследование и моделирование действия композиции металлосодержащих модификаторов на флотацию сульфидных минералов цветных тяжелых металлов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 7. – С. 142–154. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_7\_0\_142.

---

## Effect of composition of metal-containing modifiers on flotation of sulfide minerals of nonferrous heavy metals: Analysis and modeling

Phyoe Kyaw Kyaw<sup>1</sup>, Kyaw Zaya Ya<sup>1</sup>, B.E. Goryachev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> NUST MISIS, Moscow, Russia, e-mail: bophyo1831993@gmail.com; beg@misis.ru

---

**Abstract:** The article presents the studies into the influence exerted by metal-containing modifiers on flotation of copper, zinc and pyrite sulfides contained in copper–zinc sulfide ore from a Ural’s deposit, and the results of modeling copper, iron and zinc recovery in concentrate of flotation II (rougher copper–zinc flotation) as function of percentage of each sulfate in their mixture. The study uses a fourth-order simplex algorithm for mixing the test modifiers at different percentage. The modifiers, namely, cupric sulfate ( $\text{CuSO}_4$ ), ferric sulfate ( $\text{FeSO}_4$ ) and zinc sulfate ( $\text{ZnSO}_4$ ), are mixed and entered in flotation II, which is the rougher copper–zinc flotation, as a matter of fact. The experimental data analysis shows that a mixture of iron sulfate ( $\text{FeSO}_4$ ) 25 g/t and cupric sulfate ( $\text{CuSO}_4$ ) 75 g/t, added in flotation II at the total mixture consumption of 100 g/t, allows reaching the maximal overall copper and zinc recovery of 137.6%. From the experimental flotation results, the relations between the recoveries of copper, zinc and pyrite in flotation concentrate and the percentages of each modifier at their total consumption of 100 g/t are obtained. The relations can be used in a system of dozing the listed reagents in copper–zinc flotation. The models were used to calculate the copper, iron and zinc recoveries in concentrate of flotation II. This enabled determining the mixture compositions which could lead to the maximal copper and zinc recoveries at the minimal iron recovery. According to the modeling results, it seems the most interesting to investigate the effect of the mixture of cupric and iron sulfates entered in flotation II.

**Key words:** copper–zinc sulfide ore, Scheffe’s simplex lattice design method, modifier, reagent, flotation, recovery, copper, zinc, iron.

**For citation:** Phyoe Kyaw Kyaw, Kyaw Zaya Ya, Goryachev B.E. Effect of composition of metal-containing modifiers on flotation of sulfide minerals of nonferrous heavy metals: Analysis and modeling. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(7):142-154. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_7\_0\_142.

---

### Введение

Медно-цинковые руды месторождений РФ являются преимущественно колчеданными и представляют собой один из наиболее сложных для обогащения объектов — как из-за высокого содержания пирита в руде, которое может достигать 85–90%, так и из-за тонкого неравномерного взаимопрорастания сульфидных минералов между собой и с породными минералами [1, 2].

Медно-цинковые руды [3, 4] зон первичного и вторичного обогащения —

это сложный комплекс сульфидов меди, цинка, железа и минералов вмещающих пород [5]. Сульфиды меди в них представлены обычно халькопиритом, халькозином, ковеллином, борнитом, теннантитом и тетраэдритом; сульфиды железа — пиритом, марказитом и пирротинном; сульфиды цинка — различными разновидностями сфалерита. Минералы в рудных породах могут включать кварц, кальцит, хлорит, серицит, тальк, гранат, флюорит, апатит и многие другие [5, 6]. В РФ медно-цинковые колчеданные руды

ды в основном обогащаются на Гайской, Учалинской, Сибайской, Среднеуральской обогатительных фабриках [1]. Флотационный метод обогащения является основным способом переработки колчеданных медно-цинковых руд [7].

Наряду с рассмотрением влияния различных тиоловых собирателей на флотацию минералов меди, сфалерита и пирита [8, 9] было изучено активирующее и депрессирующее действие медного, цинкового и железного купоросов и их смесей [10–12] на флотацию тех же минералов и медно-цинковой колчеданной руды одного из месторождений РФ [13–15]. Продолжением данных работ явилось изучение действия двойных и тройных смесей тех же купоросов в коллективном цикле флотации той же руды [16].

В связи с широким диапазоном вариаций составов изучаемых смесей в работе использовано симплексное планирование эксперимента. Эта процедура помогает выбрать количество и условия экспериментов, необходимые и достаточные для решения задачи с необходимой точностью [17].

Симплексное планирование эксперимента [18, 19] на основе симплексных решеток наиболее подходит для изуче-

ния свойств смесей при одновременном использовании нескольких компонентов в составе смеси.

В данной работе представлены результаты моделирования зависимостей извлечения меди, железа и цинка в концентрат флотации II от относительных расходов железного, цинкового и медного купоросов в их бинарных и тройных смесях при расходе каждой из смеси 100 г/т с помощью симплекс-плана 4-го порядка [18]. Основой построения модели явились результаты флотационных экспериментов, изложенные в [16].

### Методика исследований

Методика исследования с использованием симплекс-плана 4-го порядка и схема проведения флотационных опытов были представлены в [16].

Как следует из [16], флотация II проводилась на хвосте флотации I во всех трех сериях флотационных опытов, в соответствии с симплекс-планом 4-го порядка. Флотация проводилась в «голодном режиме» по собирателю (расход БКК 10 г/т) в известковой среде (расход извести 2000 г/т) с добавлением реагентов-модификаторов — медного, цинкового и железного купоросов и их двойных и

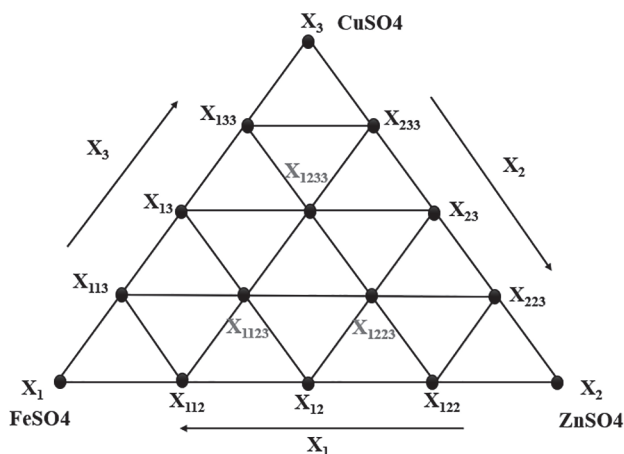


Рис. 1. {4}-решетчатый план Шеффе

Fig. 1. {4}-lattice Scheffe design

тройных смесей с их общим расходом 100 г/т. Расход соснового масла во флотацию составлял 56 г/т.

### Планирование и проведение экспериментов

Симплексное планирование эксперимента [20] используется для исследования систем, включающих множество компонентов, таких как анализ зависимостей свойств разнообразных сплавов от их состава [17–19]. В данной работе этот метод используется для выявления взаимосвязи между технологическими показателями флотаций II и относительными долями реагентов-модификаторов в их двойных и тройной смесях, дозируемых во флотацию. План Шеффе (см. рис. 1) был применен для установления

зависимости между функцией отклика (извлечение меди, железа и цинка в концентрат флотации II) и тремя переменными (относительной долей железного  $x_1$ , цинкового  $x_2$  и медного купороса  $x_3$  в их смесях) при общем расходе каждой из смесей 100 г/т, дозируемой во флотацию II. План эксперимента для проведения флотационных опытов представлен в табл. 1 [16].

### Результаты экспериментов и их обсуждение

Результаты флотационных экспериментов — выход концентрата II, массовая доля меди, железа и цинка в концентрате флотации II и извлечение меди, железа и цинка в концентрат, представлены в табл. 1.

Таблица 1

#### Экспериментальные результаты флотации II Experimental results of flotation II

№ опыта	Расход модификаторов в смеси, г/т			Выход в концентрат флотации II, %	Массовая доля в концентрате флотации II, %			Извлечение в концентрат флотации II, %		
	FeSO <sub>4</sub>	ZnSO <sub>4</sub>	CuSO <sub>4</sub>		Cu	Fe	Zn	Cu	Fe	Zn
1	100	0	0	7,73	4,74	35,68	5,29	86,45	8,77	36,81
2	0	100	0	7,3	5,36	38,72	5,84	89,07	7,89	35,34
3	0	0	100	9,27	3,92	50,95	3,73	90,90	8,62	30,41
4	50	50	0	7,84	4,72	43,51	5,45	91,69	6,44	28,99
5	50	0	50	8,82	3,87	39,13	4,99	93,23	9,71	36,74
6	0	50	50	7,27	2,71	61,41	2,75	88,50	10,39	35,82
7	75	25	0	10,66	2,63	44,25	4,99	86,73	10,69	32,97
8	25	75	0	7,36	3,41	46,25	4,25	90,59	7,19	27,85
9	75	0	25	9,58	2,2	36,56	3,74	89,45	11,07	34,8
10	25	0	75	9,61	4,21	20,16	7,39	90,10	10,60	46,61
11	0	75	25	11,79	2,24	48,22	3,23	89,24	12,78	37,36
12	0	25	75	10,53	3,15	47,23	3,97	73,7	10,05	32,49
13	50	25	25	9,22	2,71	43,36	3,14	83,72	9,67	34,78
14	25	50	25	10,48	2,69	44,86	3,09	83,66	10,13	38,25
15	25	25	50	8,29	3,21	38,39	4,05	85,36	9,72	36,23
16	0	0	0	8,38	3,25	40,50	3,54	85,24	9,33	27,47

Из анализа табл. 1 следует, что наиболее эффективная активация флотации меди и цинка наблюдается при добавлении во флотацию II смеси железного купороса 25 г/т и медного купороса 75 г/т. В этом случае (опыт № 10) извлечение меди в концентрат флотации II составляет 90,1%, цинка – 46,6%. Суммарное извлечение меди и цинка достигает 136,7%, что на 24% больше по сравнению с суммарным извлечением тех же металлов в концентрат, полученный без добавки указанных модификаторов во флотацию II (опыт № 16). Однако в случае, когда дозировка железного и медного купоросов составляла 50 г/т каждого модификатора, наблюдалось максимальное извлечение меди в концентрат флотации II. В этом случае (опыт № 5) извлечение меди в концентрат составило 93,2%, а цинка 36,7% (суммарно – 129,9%). При дозировании во флотацию II смеси железного 25 г/т и медного 75 г/т купоросов был получен концентрат с минимальным содержанием в нем железа (20%) и максимальным содержанием цинка (7,4%) при содержании в нем меди 4,2%.

### Построение модели

Симплекс-решетчатые планы, использованные в [16], являются насыщенными, т.е. число экспериментальных точек в плане равно числу коэффициентов искомого полинома, для получения расчетных формул коэффициентов полинома удобно воспользоваться методом подстановки [21]. Для получения расчетных формул в полином последовательно подставляются значения всех  $x_1$ ,  $x_2$  и  $x_3$  для всех точек плана (см. рис. 1), а вместо функции отклика – соответствующие данным точкам значения  $y$ :

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

где  $y$  – извлечение или меди или железа или цинка в концентрат флотации II, %;  $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_{12}, \beta_{13}, \beta_{23}, \gamma_{12}, \gamma_{13}, \gamma_{23}, \delta_{12}, \delta_{13}, \delta_{23}, \beta_{1123}, \beta_{1223}, \beta_{1233}$  – расчетные коэффициенты уравнения регрессии (модели);  $x_1, x_2, x_3$  – относительная доля каждого из купоросов в смеси в экспериментальных точках симплекс-плана. Например, в точке  $X_{12}$  значение  $x_1 = 0,5, x_2 = 0,5$  и  $x_3 = 0$ ; в точке  $X_{1233}$  –  $x_1 = 0,25, x_2 = 0,25$  и  $x_3 = 0,5$  и т.д.

Формулы для расчета коэффициентов уравнения регрессии для плана четвертого порядка представлены ниже:

$$\begin{aligned}
 \beta_1 = y_1; \beta_2 = y_2; \beta_3 = y_3; \\
 \beta_{12} = 4y_{12} - 2y_1 - 2y_2; \beta_{13} = 4y_{13} - 2y_1 - 2y_3; \beta_{23} = 4y_{23} - 2y_2 - 2y_3; \\
 \gamma_{12} = \frac{8}{3}(-y_1 + 2y_{1112} - 2y_{1222} + y_2); \\
 \gamma_{13} = \frac{8}{3}(-y_1 + 2y_{1113} - 2y_{1333} + y_3); \\
 \gamma_{23} = \frac{8}{3}(-y_2 + 2y_{2223} - 2y_{2333} + y_3);
 \end{aligned}$$

$$\delta_{12} = \frac{8}{3}(-y_1 + 4y_{1112} - 6y_{12} + 4y_{1222} - y_3);$$

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

$$\delta_{23} = \frac{8}{3}(-y_1 + 4y_{2223} - 6y_{23} + 4y_{2333} - y_3);$$

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

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

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

Таблица 2

**Расчетные значения коэффициентов модели для извлечения меди**

**Calculated values of coefficient models for copper recovery**

№ опыта	Значение факторов			Функция отклика у и ее значение		Коэффициенты модели для извлечения меди		
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$y$	$\varepsilon(\text{Cu})$			
1	1	0	0	$y_1$	86,45	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$
2	0	1	0	$y_2$	89,07	86,45	89,07	90,90
3	0	0	1	$y_3$	90,90			
4	0,5	0,5	0	$y_{12}$	91,69	$\beta_{12}$	$\beta_{13}$	$\beta_{23}$
5	0,5	0	0,5	$y_{12}$	93,23	15,72	18,22	-5,94
6	0	0,5	0,5	$y_{23}$	88,50			
7	0,75	0,25	0	$y_{1112}$	86,73	$\gamma_{12}$	$\gamma_{13}$	$\gamma_{23}$
8	0,25	0,75	0	$y_{1222}$	90,59	-13,6	8,4	87,76
9	0,75	0	0,25	$y_{1113}$	89,45			
10	0,25	0	0,75	$y_{1333}$	90,10	$\delta_{12}$	$\delta_{13}$	$\delta_{23}$
11	0	0,75	0,25	$y_{2223}$	89,24	-43,68	-49,41	-157,9
12	0	0,25	0,75	$y_{2333}$	73,70			
13	0,5	0,25	0,25	$y_{1123}$	83,72	$\beta_{1123}$	$\beta_{1223}$	$\beta_{1233}$
14	0,25	0,5	0,25	$y_{1223}$	83,66	-365,0	-581,0	353,8
15	0,25	0,25	0,5	$y_{1233}$	85,36			

Расчетные значения коэффициентов уравнений регрессии (2), (3) и (4) для извлечения меди (табл. 2), железа (табл. 3) и цинка (табл. 4) в концентрат флотации II и сами уравнения регрессии представлены ниже.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{Cu} = & 86,45x_1 + 89,07x_2 + 90,90x_3 + 15,72x_1x_2 + 18,22x_1x_3 - 5,94x_2x_3 - \\ & -13,6x_1x_2(x_1 - x_2) + 8,4x_1x_3(x_1 - x_3) + 87,7x_2x_3(x_2 - x_3) - \\ & -43,68x_1x_2(x_1 - x_2)^2 - 49,41x_1x_3(x_1 - x_3)^2 - 157,9x_2x_3(x_2 - x_3)^2 - \\ & -365,0x_1^2x_2x_3 - 581,0x_1x_2^2x_3 + 353,8x_1x_2x_3^2 \end{aligned} \quad , (2)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{Fe} = & 8,77x_1 + 7,89x_2 + 8,62x_3 - 7,56x_1x_2 + 4,06x_1x_3 + 8,54x_2x_3 + \\ & +16,32x_1x_2(x_1 - x_2) + 2,11x_1x_3(x_1 - x_3) + 16,51x_2x_3(x_2 - x_3) + \\ & +43,25x_1x_2(x_1 - x_2)^2 + 29,41x_1x_3(x_1 - x_3)^2 + 33,25x_2x_3(x_2 - x_3)^2 - \\ & -42,85x_1^2x_2x_3 + 77,47x_1x_2^2x_3 - 2,29x_1x_2x_3^2 \end{aligned} \quad , (3)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{Zn} = & 36,81x_1 + 35,34x_2 + 30,4162x_3 - 28,34x_1x_2 + 12,52x_1x_3 + 11,78x_2x_3 + \\ & +23,39x_1x_2(x_1 - x_2) - 80,05x_1x_3(x_1 - x_3) + 12,83x_2x_3(x_2 - x_3) - \\ & -7,49x_1x_2(x_1 - x_2)^2 + 101,28x_1x_3(x_1 - x_3)^2 - 3,39x_2x_3(x_2 - x_3)^2 + \\ & +74,16x_1^2x_2x_3 + 491,52x_1x_2^2x_3 - 356,08x_1x_2x_3^2 \end{aligned} \quad , (4)$$

Таблица 3

**Расчетные значения коэффициентов модели для извлечения железа**  
**Calculated values of coefficient models for iron recovery**

№ опыта	Значение факторов			Функция отклика у и ее значение		Коэффициенты модели для извлечения железа		
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$y$	$\varepsilon(Fe)$			
1	1	0	0	$y_1$	8,77	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$
2	0	1	0	$y_2$	7,89	8,77	7,89	8,62
3	0	0	1	$y_3$	8,62			
4	0,5	0,5	0	$y_{12}$	6,44	$\beta_{12}$	$\beta_{13}$	$\beta_{23}$
5	0,5	0	0,5	$y_{12}$	9,71	-7,56	4,06	8,54
6	0	0,5	0,5	$y_{23}$	10,39			
7	0,75	0,25	0	$y_{1112}$	10,69	$\gamma_{12}$	$\gamma_{13}$	$\gamma_{23}$
8	0,25	0,75	0	$y_{1222}$	7,19	16,32	2,11	16,51
9	0,75	0	0,25	$y_{1113}$	11,07			
10	0,25	0	0,75	$y_{1333}$	10,6	$\delta_{12}$	$\delta_{13}$	$\delta_{23}$
11	0	0,75	0,25	$y_{2223}$	12,78	43,25	29,41	33,25
12	0	0,25	0,75	$y_{2333}$	10,05			
13	0,5	0,25	0,25	$y_{1123}$	9,67	$\beta_{1123}$	$\beta_{1223}$	$\beta_{1233}$
14	0,25	0,5	0,25	$y_{1223}$	10,13	-42,85	77,47	-2,29
15	0,25	0,25	0,5	$y_{1233}$	9,72			

Таблица 4

**Расчетные значения коэффициентов модели для извлечения цинка**  
**Calculated values of coefficient models for zinc recovery**

№ опыта	Значение факторов			Функция отклика у и ее значение		Коэффициенты модели для извлечения цинка		
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	у	$\varepsilon(\text{Zn})$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$
1	1	0	0	$y_1$	36,81	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$
2	0	1	0	$y_2$	35,34	36,81	35,34	30,41
3	0	0	1	$y_3$	30,41			
4	0,5	0,5	0	$y_{12}$	28,99	$\beta_{12}$	$\beta_{13}$	$\beta_{23}$
5	0,5	0	0,5	$y_{12}$	36,74	-28,34	12,52	11,78
6	0	0,5	0,5	$y_{23}$	35,82			
7	0,75	0,25	0	$y_{1112}$	32,97	$\gamma_{12}$	$\gamma_{13}$	$\gamma_{23}$
8	0,25	0,75	0	$y_{1222}$	27,85	23,39	-80,05	12,83
9	0,75	0	0,25	$y_{1113}$	34,8			
10	0,25	0	0,75	$y_{1333}$	46,61	$\delta_{12}$	$\delta_{13}$	$\delta_{23}$
11	0	0,75	0,25	$y_{2223}$	37,36	-7,49	101,28	-3,39
12	0	0,25	0,75	$y_{2333}$	32,49			
13	0,5	0,25	0,25	$y_{1123}$	34,78	$\beta_{1123}$	$\beta_{1223}$	$\beta_{1233}$
14	0,25	0,5	0,25	$y_{1223}$	38,25	74,16	491,52	-356,08
15	0,25	0,25	0,5	$y_{1233}$	36,23			

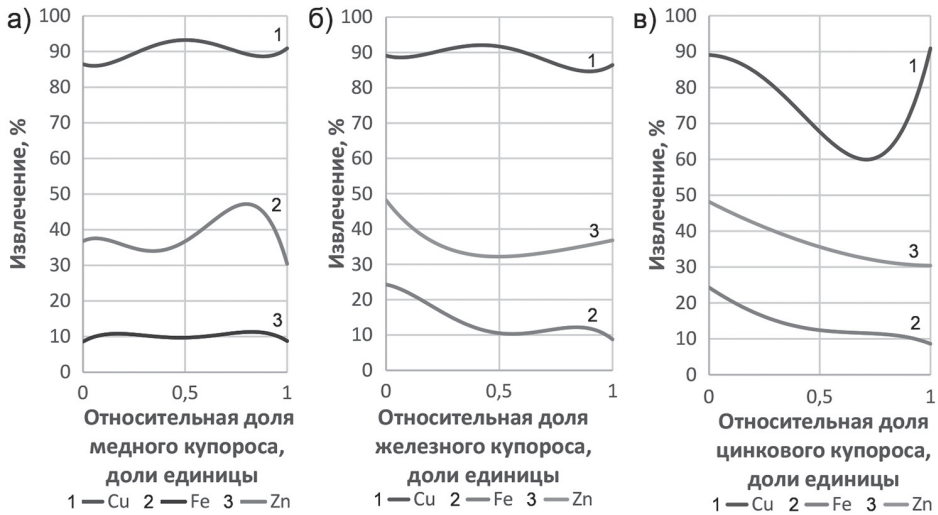


Рис. 2. Зависимость расчетных значений извлечений меди, железа и цинка от относительной доли медного купороса в его смеси с железным купоросом (а), относительной доли железного купороса в его смеси с цинковым купоросом (б) и относительной доли цинкового купороса в его смеси с медным купоросом (в)

Fig. 2. Dependence of the calculated values of copper, iron, and zinc recovery on the relative proportion of copper sulfate in its mixture with iron sulfate (a), the relative proportion of iron sulfate in its mixture with zinc sulfate (b), and the relative proportion of zinc sulfate in its mixture with copper sulfate (c)



Таблица 5

**Рассчитанные по моделям значения извлечения меди железа и цинка в концентрат флотации II**

**Model-calculated values for the recovery of copper, iron, and zinc into flotation concentrate II**

№ опыта	Факторы			Извлечение, %		
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	Cu	Fe	Zn
1	1	0	0	86,45	8,77	36,81
2	0	1	0	89,07	7,89	35,34
3	0	0	1	90,90	8,62	30,41
4	0,5	0,5	0	91,69	6,44	28,99
5	0,5	0	0,5	93,23	9,71	36,74
6	0	0,5	0,5	88,50	10,39	35,82
7	0,75	0,25	0	86,73	10,69	32,97
8	0,25	0,75	0	90,59	7,19	27,85
9	0,75	0	0,25	89,45	11,07	34,8
10	0,25	0	0,75	90,10	10,6	46,61
11	0	0,75	0,25	89,24	12,78	37,36
12	0	0,25	0,75	73,7	10,05	32,49
13	0,5	0,25	0,25	83,72	9,67	34,78
14	0,25	0,5	0,25	83,66	10,13	38,25
15	0,25	0,25	0,5	85,36	9,72	36,23

При известных значениях коэффициентов каждого из уравнений регрессии рассчитывалось извлечение каждого из металлов  $\varepsilon_{Cu}$ ,  $\varepsilon_{Fe}$  и  $\varepsilon_{Zn}$  в концентрат флотации II. Расчетные по моделям (2) – (4) значения извлечения металлов в концентрат флотации II в узлах симплекса решетки (см. рис. 1) показаны в табл. 5.

Так как для проведения эксперимента использовался насыщенный план 4-го порядка, то в узлах симплексной решетки расчетные по моделям и экспериментально полученные значения извлечений металлов в концентрат совпадают.

На рис. 2 показаны зависимости рассчитанных по уравнениям (2) – (4) извлечения меди, железа и цинка в концентрат флотации II от относительной доли первого купороса в смеси для каждой из двойных смесей медного, железного

и цинкового купоросов. Так как целью флотации II является максимальное извлечение меди и цинка в концентрат флотации при минимальном извлечении в него пирита, то сравнение трех рассчитанных моделей показывает, что наибольший интерес представляет исследование действия смеси медного и железного купоросов, которая дозируется во флотацию (рис. 2, а).

Из рисунка следует, что представленные зависимости для извлечения меди и особенно цинка имеют явно выраженные максимумы. Однако максимальные значения указанных металлов могут быть достигнуты при различных долях медного и железного купоросов в их смеси, что совпадает с ранее полученными экспериментальными данными, описанными в [16].

## Заключение

В данной статье представлены результаты моделирования зависимостей извлечения меди, железа и цинка от действия железного, цинкового и медного купоросов и их двойных и тройных смесей при флотации медно-цинковой колчеданной руды одного из месторождений Урала.

Полученные зависимости между извлечением меди, цинка и железа в концентрат основной медно-цинковой флотации и относительными долями медного, железного и цинкового купоросов в их двойных и тройных смесях при общем расходе смеси 100 г/т позволяют предсказать результаты флотации и определить составы смесей, при которых будет наблюдаться наибольшее извлечение меди и цинка в концентрат при минимальном извлечении в него пирита. Применение смеси железного и медно-

го купоросов во флотации увеличивает извлечение меди и особенно цинка в концентрат флотации.

Максимальное суммарное извлечение указанных металлов достигается при дозировке смеси железного (25 г/т) и медного (75 г/т) купоросов во флотацию II при общем расходе смеси 100 г/т. В этом случае суммарное извлечение меди и цинка в концентрат флотации достигает 137,6%.

По результатам эксперимента, проведенного по симплекс-плану, была получена математическая модель 4-го порядка, представляющая собой систему трех уравнений регрессии, каждое из которых связывает извлечение либо меди, либо железа, либо цинка с относительными долями каждого из примененных купоросов в их двойных и тройных смесях. При условии, что фактический расход каждой из смесей составлял 100 г/т.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бочаров В. А., Игнаткина В. А. Технология обогащения полезных ископаемых. Т. 2: Минерально-сырьевая база полезных ископаемых. Обогащение руд цветных металлов, руд и россей редких металлов. — М.: Руда и металлы. — 2007. — С. 156–170.
2. Абрамов А. А., Леонов С. Б. Обогащение руд цветных металлов. — М.: Недра, 1991. — 407 с.
3. Бочаров В. А., Игнаткина В. А., Абрютин Д. В., Каюмов А. А., Каюмова В. Р. (Корж) Влияние модификаторов класса сульфоксидов на флотируемость сульфидных минералов и технологические показатели флотации руды // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 12. — С. 20–33. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_12\_0\_20.
4. Štirbanović Z. The effect of degree of liberation on copper recovery from copper-pyrite ore by flotation // Separation Science and Technology. 2020, vol. 55, no. 17, pp. 3260–3273. DOI: 10.1080/01496395.2019.1676260.
5. Бочаров В. А., Рыскин М. Я., Поспелов Н. Д. Развитие технологии переработки медно-цинковых руд Урала // Цветные металлы. — 1979. — № 10-е. — С. 105–107.
6. Митрофанов С. И. Обогащение медно-цинково-пиритных руд Урала // Цветные металлы. — 1977. — № 1. — С. 53–56.
7. Абрамов А. А. Флотационные методы обогащения. — М.: Недра, 1993. — 412 с.
8. Горячев Б. Е., Наинг Лин У, Николаев А. А. Особенности флотации пирита одного из медно-цинковых месторождений Уральского региона бутиловым ксантогенатом калия и дитиофосфатом натрия // Цветные металлы. — 2014. — № 6. — С. 16–22.
9. Ягудина Ю. Р., Карасов Ю. К. Совершенствование технологии флотации медно-цинковых руд, перерабатываемых на обогатительной фабрике Актюбинской медной компании // Горная промышленность. — 2021. — № S5-2. — С. 29–32.
10. Чантурия В. А., Шадрунова И. В. Технология обогащения медных и медно-цинковых руд Урала. — М.: Наука, 2016. — 386 с.
11. 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 ин-

формационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 12. — С. 139–151. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_12\_0\_139.

12. Кузнецов В. В., Александрова Т. Н. Разработка методов определения флотуемости минералов для эффективного проектирования технологии флотации // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 10-1. — С. 145–154. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_101\_0\_145.

13. Сорока Е. И., Притчин М. Е., Лютоев В. П., Смолева И. В. Физико-химические исследования карбонатов Сафьяновского медно-колчеданного месторождения (Средний Урал) // Вестник Пермского университета. Геология. — 2019. — № 2. — С. 152–164.

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

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

16. 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.

17. Scheffe H. Experiments with mixtures // Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological). 1958, vol. 20, no. 2, pp. 344–360. DOI: 10.1111/j.2517-6161.1958.tb00299.x.

18. Новик Ф. С. Планирование эксперимента на симплексе при изучении металлических систем. — М.: Металлургия, 1985. — 256 с.

19. Шуменко В. Н. Методы планирования экспериментов. Планирование эксперимента при изучении диаграмм «состав-свойства» / Планирование промышленных экспериментов. — М.: МИСиС, 1979. — 52 с.

20. Valery V., Hanna P., Yevhenia, Konstantin G. A modified scheffe's simplex lattice design method in development of ceramic carriers for catalytic neutralizers of gas emissions // Chemistry Journal of Moldova. 2021, vol. 16, pp. 79–87. DOI: 10.19261/cjm.2021.779.

21. Зедгинидзе И. Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем. — М.: Наука, 1976. — 390 с. **МИАН**

## REFERENCES

1. Bocharov V. A., Ignatkina V. A. Technology of mineral enrichment. Т. 2: *Mineral'no-syr'evaya baza poleznykh iskopaemykh. Obogashchenie rud tsvetnykh metallov, rud i rossypey redkikh metallov* [Vol. 2.: Mineral resource base of minerals. Enrichment of ores of non-ferrous metals, ores and placers of rare metals], Moscow, Ruda i metallurgy. 2007, pp. 156–170.

2. Abramov A. A., Leonov S. B. *Obogashchenie rud tsvetnykh metallov* [Enrichment of non-ferrous metal ores], Moscow, Nedra, 1991, 407 p.

3. Bocharov V. A., Ignatkina V. A., Abrytin D. V., Kayumov A. A., Kayumova V. R. (Korzhen). Effect of sulfoxide-based modifiers on sulfide mineral floatability and on production data of ore flotation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 12, pp. 20–33. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_12\_0\_20.

4. Štirbanović Z. The effect of degree of liberation on copper recovery from copper-pyrite ore by flotation. *Separation Science and Technology*. 2020, vol. 55, no. 17, pp. 3260–3273. DOI: 10.1080/01496395.2019.1676260.

5. 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-e, pp. 105–107. [In Russ].

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

7. Abramov A. A. *Flotatsionnye metody obogashcheniya* [Flotation methods of enrichment], Moscow, Nedra, 1993, 412 p.

8. Goryachev B. E., Naing L. O., Nikolaev A. A. Features of pyrite flotation in one of the copper-zinc deposits of the Ural region with potassium butyl xanthate and sodium dithiophosphate. *Tsvetnyye Metally*. 2014, no. 6, pp. 16–22. [In Russ].
9. Yagudina Yu. R., Karasov Yu. K. Improving the technology of flotation of copper-zinc ores processed at the processing plant of the Aktobe copper company. *Russian Mining Industry*. 2021, no. S5-2, pp. 29–32. [In Russ].
10. Chanturiya V. A., Shadrinova I. V. *Tekhnologiya obogashcheniya mednykh i medno-tsinkovykh rud Urala* [Technology of enrichment of copper and copper-zinc ores of the Urals], Moscow, Nauka, 2016, 386 p.
11. 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.
12. Kuznetsov V. V., Aleksandrova T. N. Development of methods for determining the flotability of minerals for the effective design of flotation technology. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 10-1, pp. 145–154. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_101\_0\_145.
13. Soroka E. I., Pritchinn M. E., Lyutov V. P., Smoleva I. V. Physico-chemical studies of carbonates of the Safyanovsky copper-pyrite deposit (Middle Urals). *Bulletin of Perm university. Geology*. 2019, no. 2, pp. 152–164. [In Russ].
14. Hnaing Lin Oo *Povyshenie selektivnosti flotatsii kolchedannykh medno-tsinkovykh rud s ispol'zovaniem modifikatorov flotatsii pirita na osnove soedineniy zheleza (II)* [Increasing the selectivity of flotation of pyrite copper-zinc ores using pyrite flotation modifiers based on iron (II) compounds], Candidate's thesis, Moscow, MISiS, 2015, pp. 27. [https://misis.ru/files/3192/Naing\\_avtoreferat.doc](https://misis.ru/files/3192/Naing_avtoreferat.doc).
15. Kyaw Za Ya *Povyshenie selektivnosti flotatsii kolchedannykh medno-tsinkovykh rud s ispol'zovaniem modifikatorov flotatsii sfalerita na osnove soedineniy zheleza (II), medi (II) i tsinka* [Increasing the selectivity of flotation of pyrite copper-zinc ores using sphalerite flotation modifiers based on iron (II), copper (II) and zinc compounds], Candidate's thesis, Moscow, MISiS, 2018, pp. 26. [https://misis.ru/files/9461/Chgo\\_AR.pdf](https://misis.ru/files/9461/Chgo_AR.pdf).
16. 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.
17. Scheffe H. Experiments with mixtures. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*. 1958, vol. 20, no. 2, pp. 344–360. DOI: 10.1111/j.2517-6161.1958.tb00299.x.
18. 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.
19. Shumenko V. N. Methods of experiment planning. Experimental planning in the study of composition-properties diagrams. *Planirovanie promyshlennykh eksperimentov* [Planning of industrial experiments], Moscow, MISiS, 1979, 52 p.
20. Valery V., Hanna P., Yevhenia, Konstantin G. A modified scheffe's simplex lattice design method in development of ceramic carriers for catalytic neutralizers of gas emissions. *Chemistry Journal of Moldova*. 2021, vol. 16, pp. 79–87. DOI: 10.19261/cjm.2021.779.
21. Zedginidze I. G. *Planirovanie eksperimenta dlya issledovaniya mnogokomponentnykh sistem* [Experiment planning for the study of multicomponent systems], Moscow, Nauka, 1976, 390 p.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пье Чжо Чжо<sup>1</sup> – аспирант,  
 e-mail: bophyo1831993@gmail.com,  
 ORCID ID: 0000-0003-3084-6771,  
 Чжо Зай Яа<sup>1</sup> – канд. техн. наук, стажер кафедры,  
 e-mail: kokyawgyi49@gmail.com,  
 ORCID ID: 0000-0003-4364-9574,  
 Горячев Борис Евгеньевич<sup>1</sup> – д-р техн. наук,  
 профессор, e-mail: beg@misis.ru,  
<sup>1</sup> НИТУ МИСИС.

**Для контактов:** Пье Чжо Чжо, Горячев Б.Е.,  
 e-mail: bophyo1831993@gmail.com; e-mail: beg@misis.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Phyoe Kyaw Kyaw*<sup>1</sup>, Graduate Student,  
e-mail: bophyo1831993@gmail.com,  
ORCID ID: 0000-0003-3084-6771,  
*Kyaw Zaya Ya*<sup>2</sup>, Ph.D. Internship-Department of Mineral Processing,  
e-mail: kokyawgyi49@gmail.com,  
ORCID ID: 0000-0003-4364-9574,  
*B.E. Goryachev*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.),  
Professor, e-mail: beg@misis.ru,  
<sup>1</sup> NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia.

**Corresponding author:** *Phyoe Kyaw Kyaw, B.E. Goryachev,*  
e-mail: bophyo1831993@gmail.com; e-mail: beg@misis.ru.

Получена редакцией 19.12.2023; получена после рецензии 19.02.2024; принята к печати 10.06.2024.  
Received by the editors 19.12.2023; received after the review 19.02.2024; accepted for printing 10.06.2024.



---

### ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

---

#### РАЗВИТИЕ МЕТОДОЛОГИИ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ В ПРАКТИКЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

(2024, № 3, СБ 7, 44 с.)

*Снигирев В.В., Гурков А.А., Козлова О.Ю., Агафонов В.В., Маскаев К.В., Бычков А.С., Алимов В.А.,  
Оганесян А.С., Цюпа Д.А., Воропаев И.В.*

Представлены результаты исследований аналитического плана в области разработки алгоритмического обеспечения итерационных процедур синтеза, генерации и проверки конечного множества альтернативных проектных решений горнотехнических систем с подземным способом добычи в современных макроэкономических условиях с учетом рационализации природопользования. Предложены пути развития методологии композиционного синтеза горнотехнических систем с использованием гибридного когнитивного моделирования и элементов нейро-нечеткой сети ANFIS, в основе которых лежит постулат обеспечения достаточной степени объективности, достоверности и надежности синтезированных проектных решений с удовлетворительным уровнем робастности. На базовой платформе когнитивного моделирования и гибридных моделей с элементами нейро-нечеткой сети ANFIS предложено научно-методическое обеспечение, методические основы и принципы обоснования процедуры синтеза технологических решений горнотехнических систем, которые должны закладываться в методологическую основу рабочей методики с привлечением элементов долгосрочного динамического анализа проектных решений при различных альтернативных сценариях.

#### DEVELOPMENT OF METHODOLOGY OF DESIGN DECISION SUPPORT SYSTEMS IN THE PRACTICE OF MINING ENGINEERING SYSTEMS DESIGN

*V.V. Snigirev, A.A. Gurkov, O. Yu. Kozlova, V.V. Agafonov, K.V. Maskaev, A.S. Bychkov, V.A. Alimov,  
A.S. Oganesyanyan, D.A. Tsyupa, I.V. Voropaev*

The results of research of the analytical plan in the field of development of algorithmic support for iterative procedures for synthesis, generation and verification of a finite set of alternative design solutions for mining systems with an underground mining method in modern macroeconomic conditions, taking into account the rationalization of environmental management, are presented. The ways of developing the methodology of compositional synthesis of mining engineering systems using hybrid cognitive modeling and elements of the ANFIS neuro-fuzzy network are proposed, which are based on the postulate of ensuring a sufficient degree of objectivity, reliability and reliability of synthesized design solutions with a satisfactory level of robustness. On the basic platform of cognitive modeling and hybrid models with elements of the ANFIS neuro-fuzzy network, scientific and methodological support, methodological foundations and principles of substantiation of the procedure for synthesizing technological solutions of mining systems are proposed, which should be laid in the methodological basis of the working methodology involving elements of long-term dynamic analysis of design solutions under various alternative scenarios.