

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)  
УДК 622  
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-2-18-27



## СНИЖЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ВЫНОСА КРЕМНИЙСОДЕРЖАЩИХ МИНЕРАЛОВ ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД В КОНЦЕНТРАТ ПУТЕМ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Арабаджи Я.Н.<sup>1</sup>, Орехова Н.Н.<sup>2</sup>, Тюленев А.Ю.<sup>3</sup>, Баранова Л.П.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Уральская горно-металлургическая компания, Верхняя Пышма, Россия

<sup>2</sup>Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, Магнитогорск, Россия

<sup>3</sup>АО «Сибирь-Полиметаллы», Рубцовск, Россия

**Аннотация.** Обеспечение эффективности и стабильности переработки полиметаллических руд является актуальной задачей, которая усложняется сложностью вещественного состава руд, снижением содержаний металлов и тонкой вкрапленностью минералов. Целью исследования являлось определение относительной значимости изменения плотности пульпы, расхода воздуха и скорости вращения импеллера при совокупном воздействии в контексте их влияния на снижение механического выноса тонких частиц нерудных минералов, а также установление границ регулирования их значений в цинковом цикле флотации полиметаллических руд. Снижение содержания минералов вмещающих пород в кондиционном цинковом концентрате необходимо для уменьшения стоимости его металлургической переработки. В работе оценён вклад механического выноса кремнийсодержащих минералов в снижение качества пенного продукта цинкового цикла флотации полиметаллической руды. Проведёнными исследованиями определён рабочий диапазон оптимальных режимных параметров технологического процесса, обеспечивающий эффективность флотации сфалерита при минимизации извлечения диоксида кремния в концентрат. Экспериментально выявлено негативное влияние чрезмерного снижения каждого из регулируемых параметров. Математической обработкой результатов полного факторного эксперимента получено уравнение регрессии, адекватно описывающее взаимосвязь между управляемыми параметрами технологического процесса и коэффициентом механического выноса нерудных минералов, что позволяет более точно прогнозировать результаты при изменении условий флотации. Установлено, что наиболее значимым фактором является расход воздуха. Обоснованные решения по оптимизации режимных параметров действующего производства при практической адаптации результатов на первоначальном этапе позволили снизить массовую долю диоксида кремния в цинковом концентрате на 15,66% относительно исходного уровня.

**Ключевые слова:** коэффициент механического выноса, цинковая флотация, оптимальные режимные параметры, диоксид кремния, расход воздуха, плотность пульпы, скорость вращения импеллера

© Арабаджи Я.Н., Орехова Н.Н., Тюленев А.Ю., Баранова Л.П., 2025

### Для цитирования

Снижение механического выноса кремнийсодержащих минералов вмещающих пород в концентрат путем оптимизации режимных параметров технологического процесса / Арабаджи Я.Н., Орехова Н.Н., Тюленев А.Ю., Баранова Л.П. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №2. С. 18-27. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-18-27>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

# REDUCTION OF MECHANICAL ENTRAINMENT OF SILICA-BEARING GANGUE MINERALS TO CONCENTRATE BY OPTIMIZING THE OPERATING PARAMETERS OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS

Arabadzhi Ya.N.<sup>1</sup>, Orekhova N.N.<sup>2</sup>, Tyulenev A.Yu.<sup>3</sup>, Baranova L.P.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ural Mining and Metallurgical Company, Verkhnyaya Pyshma, Russia

<sup>2</sup>Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

<sup>3</sup>Siberia-Polyminerals, Rubtsovsk, Russia

**Abstract.** Efficient beneficiation of polymetallic ores is an essential issue, which has become more difficult due to the mineral complexity of ores, lower metal grades and fine dissemination of minerals. The purpose of the study was to identify the relative importance of changes in pulp density, airflow rate and impeller speed at their aggregate impact on reduction of the mechanical entrainment of fine gangue mineral particles, and to establish the control limits of their values in the zinc cycle of polymetallic ore flotation. In this study the effect of mechanical entrainment of silica-containing minerals on the reduced quality of froth product of zinc cycle of polymetallic ore flotation was evaluated. The experiments were performed to establish the operating range of optimal process parameters, providing efficient sphalerite flotation and minimizing the extraction of  $\text{SiO}_2$  in the concentrate. The negative impact of excessive reduction of each of the controlled parameters has been experimentally revealed. By mathematical processing of the results of the complete factorial experiment the regression equation was obtained, which appropriately describes the correlation between the controlled process parameters and the ratio of mechanical entrainment of gangue minerals that enables more accurate prediction of the results when altering flotation conditions. Airflow rate was found to be the most significant factor. The reasonable decision on streamlining performance parameters of the existing production by implementation of the obtained results provided, at the initial stage, reduction of mass fraction of  $\text{SiO}_2$  in zinc concentrate by 15.66% of the initial level.

**Keywords:** ratio of mechanical entrainment, zinc flotation, optimal process parameters, silica, airflow rate, impeller speed

## For citation

Arabadzhi Ya.N., Orekhova N.N., Tyulenev A.Yu., Baranova L.P. Reduction of Mechanical Entrainment of Silica-Bearing Gangue Minerals to Concentrate by Optimizing the Operating Parameters of the Technological Process. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 2, pp. 18-27. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-18-27>

## Введение

Достижение необходимых показателей качества на обогатительных фабриках осложняется поступлением в переработку руд, характеризующихся все более тесным взаимным прорастанием минералов между собой, снижением содержания полезных минералов и, как следствие, неизбежными повышением тонины помола руд перед флотацией и использованием многооперационных схем флотации [1]. В результате эволюции схем обогащения возникает необходимость в постоянной оптимизации технологических процессов для обеспечения их эффективности, стабильности и экономической целесообразности.

Главной целью оптимизации промышленного процесса флотации является достижение более высоких качественно-количественных показателей благодаря усовершенствованию технологических условий.

Эффективное управление параметрами флотационного процесса, наряду с оптимизацией измельчения на основе прогноза возможности селективной дезинтеграции [2], реагентными режимами [3] может быть реализовано посредством автоматического регулирования систем, контролирующих расход, плотность и уровень

пульпы, расход воздуха, толщину пенного слоя и множество других параметров [4].

Авторами ранее было установлено [5], что важным фактором снижения качества пенных концентратов посредством загрязнения компонентами вмещающих пород является их механический вынос, который мало зависит от способности поверхности частиц минералов к взаимодействию с водной средой. Механический вынос – это процесс, при котором мелкие и сверхмелкие частицы переносятся во флотационную пену из верхней части пульпы и в конечном итоге выгружаются в концентрат, даже если они не прикреплены к пузырькам газа [6].

Изучению возможности минимизации механического выноса посвящено большое количество работ, обзор которых представлен в работах [7-11]. Доказано [12], и еще раз подтверждено результатами наших опытов, прямое влияние расхода воздуха на высоту и стабильность пенного слоя в камере флотомашины, что, в свою очередь, также имеет прямое влияние на извлечение сфалерита в пенный продукт и на механический вынос. Проведенный анализ [5] позволил выделить основные параметры технологического процесса, влияющие на него: плотность пульпы, рас-

ход воздуха и скорость вращения импеллера. Как правило, исследования сосредоточены на изучении влияния какого-либо одного из этих параметров и не позволяют оценить сравнительную значимость каждого из них при совокупном воздействии.

Данные параметры приняты в качестве управляемых факторов при проведении лабораторных экспериментов по повышению качества цинкового концентратата, в первую очередь за счет снижения механического выноса примесных минералов вмещающих пород.

Цинк, являясь третьим по объему производства цветным металлом, демонстрирует стабильный спрос, с годовым потреблением в России около 250 тыс. т, и прогнозируется его дальнейший рост.

Согласно стратегии развития металлургии России до 2030 года [13], существует риск, что потребление цинка может начать отставать от темпов его производства. В таких условиях производители качественного концентратата будут обладать явным конкурентным преимуществом. Необходимость повышения качества обусловлена негативными изменениями в процессе металлургического передела (при обжиге), что неизбежно отражается на себестоимости переработки [14] цинковых концентратов, содержащих соединения кремния [15], алюминия, магния и кальция. Это, в свою очередь, приводит к увеличению затрат на переработку и преждевременному износу оборудования. К примеру, при продаже 1 000 БМТ цинкового концентратата марки КЦ-2 производитель может понести убытки в сумме до 7 тыс. долл. США при изменении содержания  $\text{SiO}_2$  в нем в границах 2,0-3,0%. Таким образом, оптимизация флотации для снижения содержания диоксида кремния становится не просто желательной, а необходимой мерой для повышения общей эффективности производственных процессов и снижения затрат.

Учитывая, что более 80% запасов цинка сосредоточено в сульфидных рудах, данное направление исследований и разработки технологий флотации имеет высокую практическую значимость. Это не только повысит конкурентоспособность производителей, но и будет способствовать устойчивому развитию металлургической отрасли в целом.

Целью исследования являлось повышение качества цинковых концентратов путем установления оптимальных параметров процесса цинковой флотации, обеспечивающих снижение механического выноса нерудных минералов в пенный слой.

### Объект исследования

Объектом исследований являются хвосты медно-свинцового цикла флотации полиметаллической руды Корбалихинского месторождения. Данная руда характеризуется сложным, тонким взаимным срастанием зерен минералов между собой, неравномерным характером вкрапленности и различной крупностью полезных минералов [16]. Постановку тестов осуществляли на пробах хвостов медно-свинцового цикла флотации, являющихся в соответствии с проектом питанием цинк-пиритной флотации.

Данные по содержанию основных элементов, оцениваемых в процессе флотации, а также минералогический состав приведены в **табл. 1**. Содержание класса крупности менее 71 мкм в питании флотационных тестов составляло не менее 98%.

Таблица 1. Вещественный состав питания флотационных опытов

Table 1. The material composition of the feed of flotation tests

Элемент /минерал //соединение	Символ	Содержание, %
Медь	Cu	0,35
Цинк	Zn	6,55
Свинец	Pb	0,86
Железо	Fe	12,77
Сера	S	15,34
//Диоксид кремния	$\text{SiO}_2$	41,8
/Халькопирит	Cp	0,9
/Сфалерит	Sf	10,3
/Галенит	Ga	0,9
/Пирит	Py	21,4
/Кварц	Qz	30,8
/Клинохлор	Clc	21,5
/Мусковит	Mu	11,5
/Барит	Ba	0,1
/Кальцит	Ca	2,1
Прочие	-	0,5

Распределение минералов и их сростков в питании флотации приведено в **табл. 2**, из которой видно, что сфалерит свободен на 65,6%. Большинство (25,5 абс. %) его сростков приходится на сростки с халькопиритом, с нерудными минералами – 0,5-1,0 абс. %. Нерудные минералы на 75,3% свободны и на 23,7% находятся в виде многокомпонентных сростков. Кроме того, основная часть (~80 отн. %) свободных зерен нерудных минералов представлена классом крупности менее 10 мкм. Приведенные данные свидетельствуют о возможности загрязнения цинкового концентратата в большей степени за счет механического выноса минералов вмещающих пород, а также в результате извлечения многокомпонентных сростков за счет гидрообвязки собираемым сульфидам, входящими в их состав, и закрепления сростков на пузырьке воздуха.

Таблица 2. Распределение минералов и их сростков в питании флотации

Table 2. Distribution of minerals and their aggregates in flotation feed

Минерал	Содержание, абс. %					
	свободных зерен	сростков				
		с Sf	с Cp	с Ga	с Py	с Nr
Пирит	92,25	2,50	1,80	0,60	-	2,35
Сфалерит	65,60	-	25,40	5,20	0,50	0,50
Галенит	0,50	91,15	1,58	-	1,42	1,50
Халькопирит	4,95	85,29	-	1,20	1,52	1,24
Нерудные	75,30	1,00	-	-	-	-
						23,7

## Методика проведения исследований

Исследования выполнены в два этапа:

- 1) оценка влияния режимных параметров флотации на показатели цинкового концентратата и определение их рабочих диапазонов;
- 2) постановка ПФЭ для определения оптимальных режимных параметров цинковой флотации по критерию механического выноса кремнийсодержащих минералов.

Критерием оценки содержания и распределения нерудных минералов по продуктам обогащения принята массовая доля диоксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ).

Флотационные тесты на I и II этапах выполнены на пневмомеханической машине «Вектис», аппаратурные возможности которой обеспечивают регулировку выбранных факторов. Объем камеры флотомашины – 1 л. Время флотации на I этапе соответствовало производственному масштабу (с учетом коэффициентов перехода, равным 2). Расход воздуха регулировали в диапазоне от 1 до 4 л/мин; плотность пульпы от 10 до 40% тв.; скорость вращения импеллера от 25 до 45 с<sup>-1</sup>. На II этапе съем пены осуществляли через 1, 3, 6, 9 и 12 мин.

При проведении тестов бесколлекторной флотации использовался МИБК (80 г/т). Тесты по полному реагентному режиму соответствовали режимной карте предприятия в данной операции:  $\text{CaO}$  до содержания остаточной концентрации в диапазоне 450–550 г/дм<sup>3</sup>,  $\text{CuSO}_4$  и бутиловый ксантофенат калия (БКК) – 120 и 50 г/т соответственно.

Коэффициенты разделения цинка и диоксида кремния вычисляли по уравнению Коэна:

$$I = \frac{\varepsilon_{\text{Zn}}}{\varepsilon_{\text{SiO}_2}}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_{\text{Zn}}$  – извлечение цинка в концентрат;  $\varepsilon_{\text{SiO}_2}$  – извлечение диоксида кремния в концентрат.

Методика проведения экспериментов для оценки механического выноса, соответствовала методологии, предложенной в 1981 году В.Дж. Трахаром, по которой извлечение твердых частиц и воды измеряется во время двух параллельных флотационных тестов со съемом пенных продуктов в кинетическом режиме: один – в присутствии собирателя, а другой – в его отсутствии [17]. Предполагается, что при одинаковом извлечении воды в концентрат (обычно получаемом после различных временных промежутков флотации в таких условиях, поскольку скорость извлечения минералов различна), количество минералов, извлекаемое за счет механического выноса, одинаково.

Расчет коэффициента механического выноса кремнийсодержащих минералов вмещающих пород ( $ENT_i$ ) в процессе флотации выполняли по формуле [18, 19]

$$ENT_i = \frac{\varepsilon_{\text{ent}} \cdot (1 - \varepsilon_{\text{water}})}{(1 - \varepsilon_{\text{overal}}) \cdot \varepsilon_{\text{water}}}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_{\text{ent}}$  – извлечение компонента в пенный продукт при бесколлекторной флотации, доли ед.;  $\varepsilon_{\text{water}}$  – извлечение воды в пенный продукт, доли ед.;  $\varepsilon_{\text{overal}}$  – извлечение компонента в пенный продукт при проведении эксперимента по полному реагентному режиму, доли ед.

Поскольку извлечение частиц меньше, чем воды, коэффициент механического выноса безразмерен и меньше единицы.

Инструментом исследования и оптимизации процесса механического выноса выбран метод полного факторного эксперимента (ПФЭ), обеспечивающий системный подход к изучению всех возможных комбинаций изменения уровней принятых факторов [18]. ПФЭ позволяет выявить не только влияние отдельных факторов, но и их взаимодействие. Такой подход помогает выявить синергетические эффекты и оптимизировать работу системы в целом. Важным достоинством принятого инструмента также является то, что с помощью ПФЭ можно определить, какие факторы оказывают наибольшее влияние на процесс и сосредоточить усилия на оптимизации именно этих факторов [21].

Для построения матрицы экспериментов натуральные значения уровней факторов преобразовали в кодовые безразмерные величины по формуле

$$X_i = \frac{x_i - x_{i0}}{\Delta x_i}, \quad (3)$$

где  $X_i$  – кодовое значение  $i$ -го фактора;  $x_i$  – натуральное текущее значение  $i$ -го фактора;  $\Delta x$  – интервал варьирования.

## Результаты и их обсуждение

**Оценка влияния изменения режимных параметров флотации на качественно-количественные характеристики цинкового концентратата.** На рис. 1 приведены результаты тестов по определению влияния плотности пульпы, которая характеризует массу частиц в единице объема флотационной пульпы, на качественно-количественные показатели концентратата. Увеличение концентрации твердого вещества с 10 до 40% тв. повышает вязкость суспензии, снижая тем самым свободу движения частиц и аэрированность пульпы.

Ожидаемо, что при повышенной плотности вероятность механического захвата нерудных минералов минерализованными пузырьками и увлечение выноса их в пену увеличивается. В проведенной серии опытов извлечение диоксида кремния увеличивается с 5,58 до 6,61%, содержание диоксида кремния в концентрате возрастает на 4,73 абс. %, коэффициент разделения снижается с 16,84 до 13,92 (см. рис. 1). В ходе проведения экспериментов отмечено, что из-за стесненных условий движения снижается вероят-

ность столкновения частиц с пузырьками и, как было отмечено другими исследователями [22], это приводит к снижению выхода концентрата.

Как видно на **рис. 2**, недостаточный расход воздуха (1 л/мин) снижает вероятность столкновения флотируемых частиц с пузырьками воздуха, и частицы ценных компонентов не извлекаются в пенный продукт, приводя к сверхнормативным потерям цинка с хвостами флотации. Потери составили 13,89%.

Увеличение расхода воздуха позволяет повысить извлечение цинка в концентрат, однако при этом возрастает и извлечение минералов вмещающих пород. При максимальном расходе воздуха 4 л/мин селективность флотации снижается, на что указывает уменьшение коэффициента разделения до 10,04 против 27,2 при подаче 1 л/мин воздуха. Качество концентрата по цинку в опыте при расходе воздуха 4 л/мин составило 36,92% против 40,23% в опыте при расходе воздуха, равном 1 л/мин.

Высота пенного слоя и селективность разделения минералов и, соответственно, эффективность флотации также зависят от скорости импеллера, поскольку она оказывает определяющее влияние на количество пу-

зырьков и их дисперсность. Чем больше число пузырьков и их размеры, тем лучшая аэрированность пульпы и большая скорость флотации. Результаты тестов проиллюстрированы на **рис. 3**, из которого видно, недостаточная скорость вращения ( $25 \text{ c}^{-1}$ ) не позволила создать необходимое количество пузырьков, что отразилось на низком уровне извлечения цинка в концентрат (86,86%), при этом качество концентрата и коэффициент разделения в данной серии опытов получены максимальные – 41,8 и 46,78 соответственно.

Изменение гидродинамических параметров при повышении скорости вращения импеллера до  $45 \text{ c}^{-1}$  из-за повышенной турбулентности приводит к снижению эффективности сцепления между частицами и пузырьками и происходит неселективный вынос пульпового материала в пенный продукт. Из-за увеличения скорости импеллера скорость флотации возросла и выход концентрата увеличен более чем в 4 раза. Из данных, проиллюстрированных на **рис. 2**, видно, что извлечение цинка составляет 98,66%, при этом качество концентрата (по цинку) не превышает 11,33%, а коэффициент разделения составляет 1,71.

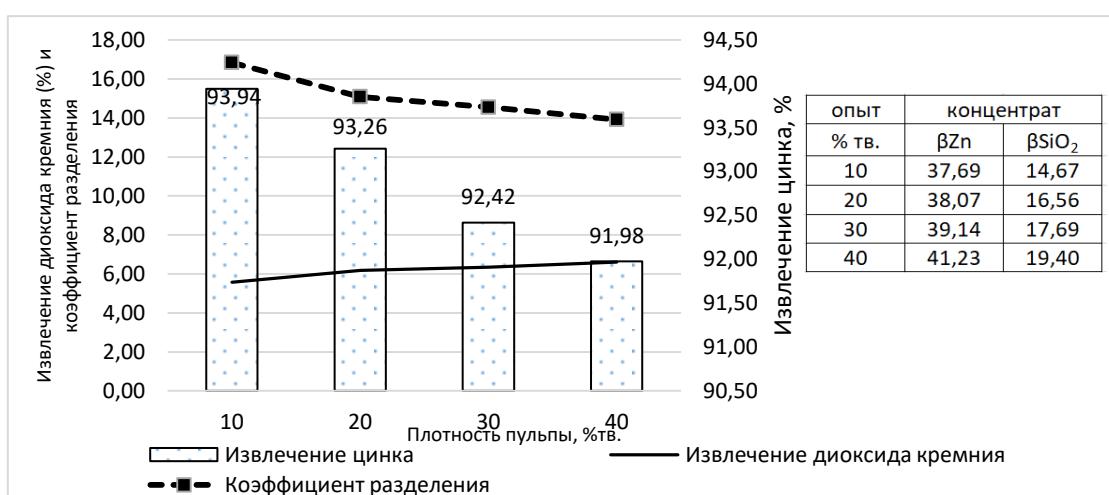


Рис. 1. Результаты серии тестов по определению влияния плотности пульпы на показатели флотации  
Fig. 1. The results of a series of tests to determine the effect of pulp density on flotation performance

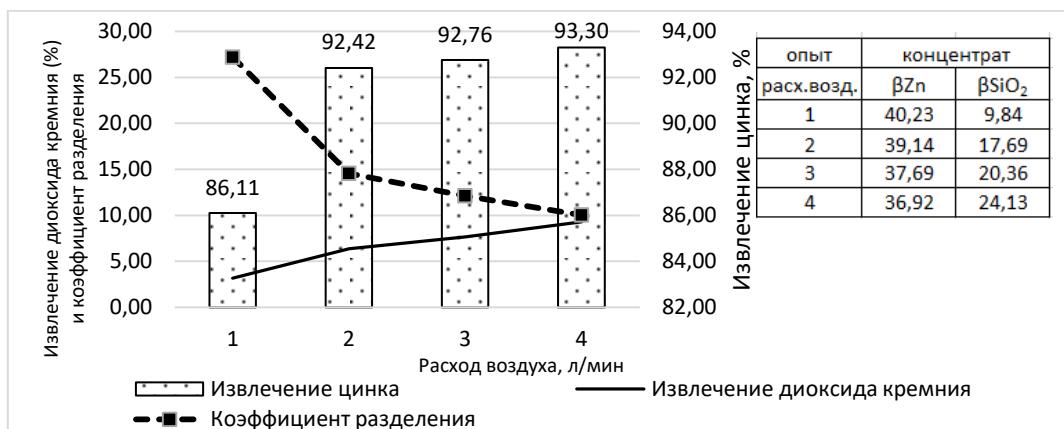


Рис. 2. Результаты серии тестов по определению влияния расхода воздуха на показатели флотации  
Fig. 2. The results of a series of tests to determine the effect of air flow on flotation performance

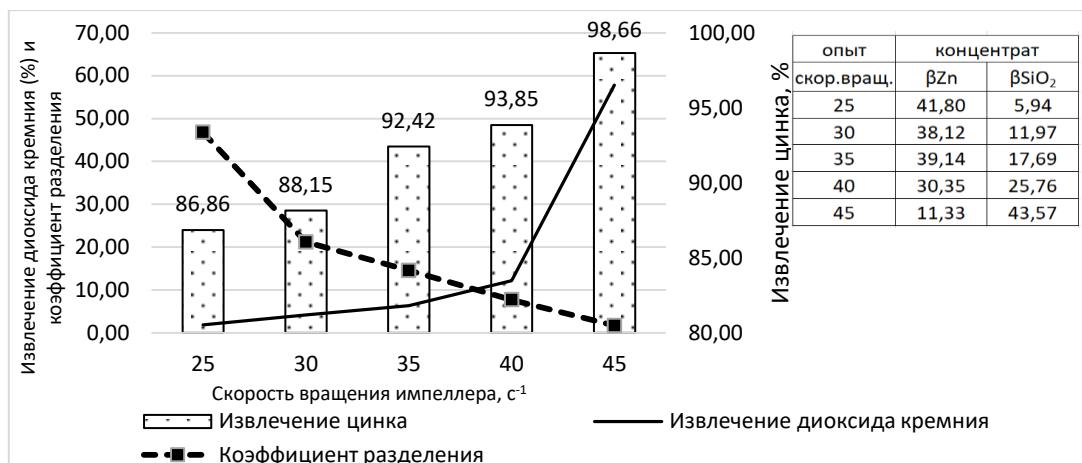


Рис. 3. Результаты серии тестов по определению влияния скорости вращения импеллера на показатели флотации  
Fig. 3. The results of a series of tests to determine the effect of impeller rotation speed on flotation performance

Управляемыми режимными параметрами технологического процесса, во флотомашине необходимо создать аэрогидродинамические условия, способные обеспечить одновременно эффективное закрепление целевых минералов на поверхности пузырьков воздуха и обеспечить высокий уровень селективности процесса, исключая механический вынос частиц минералов вмещающих пород в пенный слой. Экспериментальным путем определен диапазон значений скорости вращения импеллера, обеспечивающий необходимую и достаточную турбулентность, чтобы обеспечить образование агрегатов пузырек-частица и не нарушать их.

Таким образом, применительно к технологическому процессу получения цинка из полиметаллической руды определен рациональный диапазон регулирования режимных параметров, способный обеспечить необходимый уровень извлечения цинка при максимальном коэффициенте разделения сульфидов и минералов вмещающих пород: плотность пульпы – от 25 до 35% тв.; расход воздуха – от 1 до 3 л/мин; скорость вращения импеллера – от 30 до 40  $\text{c}^{-1}$ .

**Выявление влияния параметров флотации на коэффициент механического выноса.** Функциональная зависимость коэффициента механического выноса минералов вмещающих пород при флотации имеет вид

$$Y = f(X_1, X_2, X_3) \text{ или } ENT = f(\Pi, P, C). \quad (4)$$

Фактические значения независимых вариационных факторов приняты по результатам опытов, выполненных на I этапе:

- плотность ( $\Pi$ ) пульпы во флотационной камере –  $X_1$  (интервал варьирования 25–35% тв., в условных единицах -1 - +1);
- расход ( $P$ ) подаваемого воздуха –  $X_2$  (интервал варьирования 1–3 л/мин, в условных единицах -1 - +1);
- скорость ( $C$ ) вращения импеллера –  $X_3$  (интервал варьирования 30–40  $\text{c}^{-1}$ , в условных единицах -1 - +1).

Подставив в уравнение регрессии выражения для кодирования факторов и выполнив арифметические

преобразования, получено уравнение регрессии в натуральных значениях факторов:

$$\begin{aligned} ENT_p = & -2,0403 + 0,063 \cdot \Pi + 0,1029 \cdot P + \\ & + 0,0759 \cdot C - 0,00004 \cdot \Pi \cdot P - 0,0021 \cdot \Pi \cdot C + \\ & + 0,00022 \cdot \Pi \cdot P \cdot C - 0,0066 \cdot P \cdot C. \end{aligned} \quad (5)$$

Как видно из уравнения (5), индексы совокупного влияния в 10 и более раз меньше индивидуальных факторов, что говорит о их незначительном вкладе в значение коэффициента механического выноса. Индексы каждого фактора в отдельности положительные, что указывает на прямо пропорциональную связь между переменными.

В результате комплекса исследований экспериментально доказано, что увеличение любого из выбранных управляемых факторов приводит к росту коэффициента механического выноса нерудных минералов в пенный продукт. При этом самым значимым фактором является расход воздуха. Степень влияния плотности пульпы и скорости вращения приблизительно одинаковы.

Воспроизводимость опытов была проверена по критерию Кохрена, значение которого составило 0,22, что ниже табличного значения – 0,51. Таким образом, условие  $G_p \leq G_t$  выполнено, следовательно, опыты признаны воспроизводимыми.

Для оценки значимости коэффициентов регрессии находили погрешность воспроизводимости коэффициентов и доверительный интервал для абсолютных значений коэффициентов. На основании чего определено, что все коэффициенты регрессии, кроме одного – учитывающего взаимосвязь расхода воздуха и скорости вращения импеллера, значимы.

Результатами расчета дисперсии адекватности определено, что ее значение меньше дисперсии воспроизводимости, следовательно, не применяя критерий Фишера, можно утверждать, что найденное уравнение регрессии адекватно. Таким образом, построенная модель адекватна фактической тенденции и

найденная зависимость достоверно описывает влияние факторов на механический вынос компонентов нерудных минералов в процессе флотации полиметаллической руды.

Экспериментальные ( $ENT_s$ ) и расчетные ( $ENT_p$ ) данные представлены в табл. 3. Как видно, погрешность каждого расчетного коэффициента механического выноса не превышает 5%, что подтверждает возможность применения найденной математической модели для определения потенциала минимизации загрязнения цинкового концентрата минералами вмещающих пород в исследуемом диапазоне изменения выбранных параметров управления технологического процесса.

Таблица 3. Результаты сравнения экспериментальных и расчетных данных по определению механического выноса нерудных минералов в концентрат

Table 3. Results of comparison of experimental and calculated data on determination of mechanical entrainment of nonmetallic minerals into concentrate

Номер опыта	Доли единиц					Погрешность, %
	$ENT_{\text{з1}}$	$ENT_{\text{з2}}$	$ENT_{\text{з3}}$	$\overline{ENT}$	$ENT_p$	
1	0,7662	0,7848	0,7834	0,7781	0,7488	3,92
2	0,6108	0,6326	0,6049	0,6161	0,6344	2,88
3	0,4006	0,4029	0,3868	0,3967	0,4066	2,48
4	0,6158	0,6016	0,6067	0,6080	0,6103	0,37
5	0,6443	0,6185	0,6128	0,6252	0,6442	3,04
6	0,5140	0,5369	0,5053	0,5188	0,5304	2,25
7	0,4646	0,4455	0,4299	0,4467	0,4691	4,78
8	0,2790	0,2644	0,2761	0,2732	0,2850	4,15

## Промышленная апробация

Полученная математическая модель была апробирована на действующей Рубцовской обогатительной фабрике в IV квартале 2024 г. путем реализации комплекса мероприятий, направленных на регулирование режимных параметров технологического процесса флотации (с учетом коэффициентов масштабирования от лабораторных к промышленным условиям). На **рис. 4** приведена проектная схема цепи аппаратов цинк-пиритного цикла фабрики, где стрелками схематично показаны мероприятия, внедренные на данном этапе:

1. Система разбавления пульпы, поступающей в операции перечистного цикла флотации, для снижения содержания твердого более чем в 2 раза.
  2. Снижение на 10 отн. % скорости вращения импеллера флотомашины перечистного цикла.
  3. Оптимизация расхода воздуха, подаваемого во флотоблоки основных операций. Подача воздуха по операциям снижена от 15 до 25 отн. %.

Результаты промышленной эксплуатации обогатительной фабрики в условиях реализации предварительного этапа работ по внедрению оптимальных режимных параметров операций цинк-пиритного цикла флотации полиметаллической руды указывают на возможность снижения механического выноса кремнийсодержащих минералов вмещающих пород в пенные продукты. По данным товарных балансов до и после реализации – III и VI квартал 2024 года соответственно, зафиксирован рост качества товарного цинкового концентрата за счет снижения на 15,66 отн. % (с 2,81 до 2,37%) массовой доли  $\text{SiO}_2$  в нем. Качественно-количественные показатели товарного цинкового концентрата по основному металлу при этом остались на уровне базового значения (52,1-52,9%).

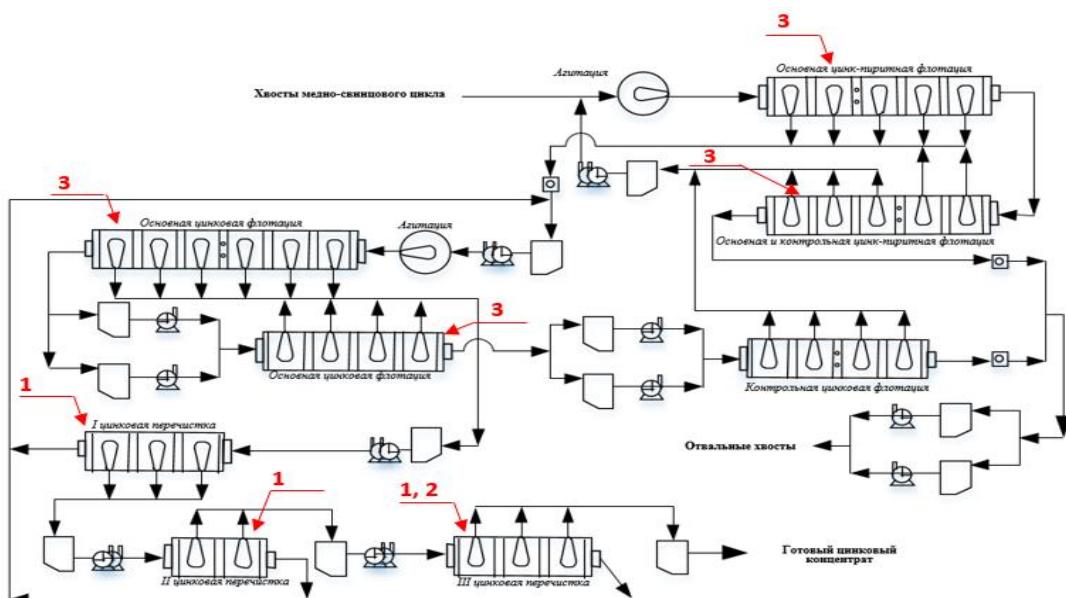


Рис. 4. Схема цепи аппаратов цинк-пиритного цикла переработки полиметаллической руды  
 Fig. 4. Circuit diagram of zinc-pyrite cycle devices for polymetallic ore processing

Учитывая, что в настоящее время на предприятии выпускается концентрат, соответствующий марке КЦ-2 с регламентируемым содержанием  $\text{SiO}_2$  до 3%, положительный опыт реализованных мероприятий по оптимизации режимных параметров технологического процесса тиражируется на все операции схемы получения цинкового концентрата, что в итоге прогнозно позволит повысить марку выпускаемого продукта до КЦ-1 с содержанием  $\text{SiO}_2$  до 2%.

### Заключение

В ходе экспериментальных исследований определено влияние турбулентности в процессе флотации, вызываемой изменением плотности пульпы, расхода воздуха и скорости вращения импеллера, на ее эффективность. Экспериментальным путем установлен рабочий диапазон оптимальных режимных параметров, обеспечивающих надежное закрепление целевых минералов на поверхности воздушных пузырьков и повышение селективности процесса.

Результатами лабораторных исследований, выполненных по известной методике, определены коэффициенты механического выноса, значения которых колеблются от 0,2732 до 0,7781 в зависимости от изменения режимных параметров технологического процесса в исследуемом диапазоне их значений.

Основываясь на надёжности результатов математической обработки данных, были приняты обоснованные решения по оптимизации режимных параметров процесса и разработаны рекомендации для их внедрения на существующем производстве, что позволило снизить механический вынос кремнийсодержащих минералов вмещающих пород, тем самым повысив качество товарного цинкового концентрата. Массовая доля диоксида кремния снижена на 15,66 отн. %.

### Список источников

- Чантuria В.А. Инновационные процессы в технологиях переработки труднообогатимого минерального сырья // Геология рудных месторождений. 2008. Т.50. №6. С. 558-568.
- Обоснование интегративного критерия для прогноза возможности селективной дезинтеграции техногенного сложноструктурного сырья / Горлова О.Е., Орехова Н.Н., Колодежная Е.В., Колкова М.С., Глаголева И.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. № 3. С. 15-26
- Игнаткина В.А., Бочаров В.А., Тубденова Б.Т. К поиску режимов селективной флотации сульфидных руд на основе сочетания собирателей различных классов соединений // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2010. Т. 46. №1. С. 97-103.
- Применение отечественных полимерных анионактивных депрессоров при флотации забалансовой оталькованной медно-никелевой руды / Лавриненко А.А., Кузнецова И.Н., Лусинян О.Г., Гольберг Г.Ю. // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2023. Т.29. №5. С. 5-14.
- Аспектный анализ механизмов загрязнения сульфидных концентратов шламами из вмещающих пород и обзор методов его снижения / Арабаджи Я.Н., Орехова Н.Н., Абдрахманов К.И., Абдрахманов Э.И. // Вестник Забайкальского государственного университета. 2024. Т.30. №4. С. 55-70.
- Wang C., Sun C., Liu Q. Entrainment of Gangue Minerals in Froth Flotation: Mechanisms, Models, Controlling Factors, and Abatement Techniques—a Review // Mining, Metallurgy & Exploration. 2021, vol. 38, pp. 673–692.
- Механический вынос и истинная флотация природной полиметаллической руды / Абди А., Эламари К., Бакауи А., Якуби А. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2014. №6. С. 181-189.
- Hans-Jürgen Butt, Karlheinz Graf, Michael Kappl. Physics and Chemistry of Interfaces. 2013, pp. 355.
- Bhondayi C., Moys M.N. Effects of gas distribution profile on flotation cell performance: An experimental investigation // International journal of mineral processing. 2015, no. 135, pp. 20-31.
- The effect of high intensity conditioning on the flotation of a nickel ore, Part 1: size by size analysis / Chen G., Gran S., Sobieraj S., Ralston J. // Minerals Engineering. 1999, pp. 1185-1200.
- Understanding the entrainment behavior of gangue minerals in flake graphite flotation / Qiu Ya., Mao Z., Sun K., Zhang L., Qian Yu., Lei T., Liang W., An Ya. // Minerals. 2022, pp. 1-15.
- Xu Q.D., Hu W., Zhang M. High-turbulence fine particle flotation cell optimization and verification // Scientific Reports. 2024, pp. 1-32.
- Стратегия развития металлургической промышленности Российской Федерации на период до 2030 года // <https://sudact.ru/law/rasporiazhenie-pravitelstva-rf-ot-28122022-n-4260-r/?ysclid=mbpepf4xc607086226> (дата обращения 22.05.2025).
- Tan P. Challenges to treat complex zinc concentrate and latest technical development // Journal of physics: Conference series. The 10th International Conference on Lead and Zinc Processing (Lead-Zinc 2023). 2024, pp. 1-14.
- Терентьев В.М. Исследование и разработка технологии обжига в печах кипящего слоя тонкодисперсных сульфидных цинковых концентратов: дис. ... канд. техн. наук. Челябинск, 2017.
- Храмов А.Н., Купцова А.В. Особенности раскрываемости минералов полиметаллической руды Корбалихинского месторождения // XIV Международная научно-практическая конференция. В 3 ч. Чита: Забайкальский государственный университет, 2014. Ч. 1. С. 122-128.
- Ross V. Flotation and entrainment of particles during batch flotation tests // Minerals Engineering. 1990, pp. 245-256.
- Выбор параметров флотации сульфидных медно-никелевых руд на основе анализа распределения компонентов по флотируемости / Александрова Т.Н., Афанасова А.В., Кузнецов В.В., Абуррова В.А. // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. №1. С. 131-147.
- Кузнецов В.В. Развитие методов определения показателей флотируемости минералов для разработки эффективных технологических решений при переработке золотосодержащих руд: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2023.

20. Козин В.З., Пелевин А.Е. Теория инженерного эксперимента [Электронное издание]. Екатеринбург: УГГУ, 2016.
21. Козин В.З. Экспериментальное моделирование и оптимизация процессов обогащения полезных ископаемых. М.: Недра, 1984.
22. Анализ и учет факторов, влияющих на технологический процесс флотации калийных руд / Олиферович Д.С., Шилин Л.Ю., Батюков С.В., Пригара В.Н. // Доклады БГУИР. 2009. С. 59-66.

**References**

1. Chanturiya V.A. Innovation processes in technologies for the processing of refractory mineral raw materials. *Geologiya rudnyh mestorozhdeniy* [Geology of Ore Deposits], 2008;50(6):491-501. (In Russ.)
2. Gorlova O.E., Orekhova N.N., Kolodezhnaya E.V., Kolkova M.S., Glagoleva I.V. Providing a rationale for an integrative criterion to predict the potential selective disintegration of technology-related, complex structured raw materials. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2023;21(3):15-26. (In Russ.)
3. Ignatkina V.A., Bocharov V.A., Tubdenova B.T. Selective flotation modes for sulfide ore based on combination of different rank collectors.. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh* [Journal of Mining Science], 2010;46(1):97-103. (In Russ.)
4. Lavrinenko A.A., Kuznetsova I.N., Lusinyan O.G., Golberg G.Yu.. Utilizing Russian polymer anion active depressants in the flotation of out-of-balance talcose copper nickel ore. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Tsvetnaya metallurgiya* [News of higher educational institutions. Non-ferrous metallurgy], 2023;29(5):5-14. (In Russ.)
5. Arabadzhi Ya.N., Orekhova N.N., Abdurakhmanov K.I., Abdurakhmanov E.I. Aspect analysis mechanisms contamination of sulfide concentrates by slime from host rock minerals and a review of its reduction methods. *Vestnik Zabaykalskogo gosudarstvennogo universiteta* [Transbaikal State University Journal], 2024;30(4):55-70. (In Russ.)
6. Wang C., Sun C., Liu Q. Entrainment of Gangue Minerals in Froth Flotation: Mechanisms, Models, Controlling Factors, and Abatement Techniques—a Review. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2021;38:673-692.
7. Abidi A., Elamari K., Bacaoui A., Yacoubi A. Entrainment and true flotation of a natural complex ore sulfide. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh* [Physical and technical problems of mineral resources development], 2014;(6):181-189. (In Russ.)
8. Hans-Jürgen Butt, Karlheinz Graf, Michael Kappl. Physics and Chemistry of Interfaces. 2013:355.
9. Bhondayi C., Moys M.N. Effects of gas distribution profile on flotation cell performance: An experimental investigation. *International journal of mineral processing*. 2015;135:20-31.
10. Chen G., Gran S., Sobieraj S., Ralston J. The effect of high intensity conditioning on the flotation of a nickel ore, Part 1: size by size analysis. *Minerals Engineering*. 1999;11:85-1200.
11. Qiu Ya., Mao Z., Sun K., Zhang L., Qian Yu., Lei T., Liang W., An Ya. Understanding the entrainment behavior of gangue minerals in flake graphite flotation. *Minerals*. 2022;1-15.
12. Xu Q.D., Hu W., Zhang M. High-turbulence fine particle flotation cell optimization and verification // *Scientific Reports*. 2024;1-32.
13. Strategy for the development of the metallurgical industry of the Russian Federation for the period up to 2030 // <https://sudact.ru/law/raspriazhenie-pravitelstva-rf-ot-28122022-n-4260-r/?ysclid=mbpepf4xc607086226> (accessed 22.05.2025). (In Rus.).
14. Tan P. Challenges to treat complex zinc concentrate and latest technical development. *Journal of physics: Conference series*. The 10th International Conference on Lead and Zinc Processing (Lead-Zinc 2023). 2024;1-14.
15. Terentyev V.M. *Issledovanie i razrabotka tekhnologii obzhiga v pechah kipyashchego sloya tonkodispersnyh sulfidnyh tsinkovyh kontsentratov* [Research and development of technology for roasting finely dispersed sulfide zinc concentrates in fluidized bed furnaces. Dissertation for the degree of candidate of technical sciences]. Chelyabinsk, 2017.
16. Khramov A.N., Kuptsova A.V. Features of the mineral recovery of polymetallic ore of the Korbalikhinskoye deposit. *XIV Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya: v 3-chastyah. Tom Chast 1* [XIV International scientific and practical conference: in 3 parts. Volume Part 1]. Chita: Transbaikal State University, 2014, pp. 122-128. (In Russ.)
17. Ross V. Flotation and entrainment of particles during batch flotation tests. *Minerals Engineering*. 1990;245-256.
18. Aleksandrova T.N., Afanasova A.V., Kuznetsov V.V., Aburova V.A. Selection of copper–nickel sulfide ore flotation parameters based on floatability ranking of flotation components. *Gorniy informatsionno-analiticheskiy byulleten* [MIAB], 2022;(1):131-147. (In Russ.)
19. Kuznetsov V.V. Razvitiye metodov opredeleniya pokazateley flotiruemosti mineralov dlya razrabotki effektivnyh tekhnologicheskikh resheniy pri pererabotke zolotosoderzhashchih rud. Dissertation na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Development of methods for determining mineral flotation indicators for the development of effective technological solutions in the processing of gold-bearing ores. Dissertation for the degree of candidate of technical sciences]. St. Petersburg, 2023.
20. Kozin V.Z., Pelevin A.E. *Teoriya inzhenernogo eksperimenta* [Theory of engineering experiment]. Yekaterinburg: Electronic publication of UGMAU, 2016. (In Russ.)
21. Kozin V.Z. *Eksperimentalnoe modelirovanie i optimizatsiya processov obogashcheniya poleznyh iskopaemyh* [Experimental modeling and optimization of mineral enrichment processes]. Moscow: Nedra, 1984. (In Russ.)
22. Oliferovich D.S., Shilin L.Yu., Batyukov S.V., Prigara V.N. Analysis and accounting of factors influencing the technological process of flotation of potassium ores. *Doklady BGUIR* [Reports of BSUIR], 2009;59-66. (In Russ.)

Поступила 03.04.2025; принята к публикации 10.06.2025; опубликована 30.06.2025  
Submitted 03/04/2025; revised 10/06/2025; published 30/06/2025

**Арабаджи Яна Николаевна** – главный специалист управления обогатительного производства, ОАО «Уральская горно-металлургическая компания», Верхняя Пышма, Россия.  
Email: yana\_arabadzhi@mail.ru

**Орехова Наталья Николаевна** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: n\_orehova@mail.ru. ORCID 0000-0002-3507-5198

**Тюленев Андрей Юрьевич** – главный обогатитель, АО «Сибирь-полиметаллы», Рубцовск, Россия.  
Email: TAY@sib-pm.ru

**Баранова Любовь Петровна** – главный специалист управления обогатительного производства, ОАО «Уральская горно-металлургическая компания», Верхняя Пышма, Россия.  
Email: l.baranova@uralmine.com

**Yana N. Arabadzhi** – Chief Specialist of the Processing Production Department, JSC Ural Mining and Metallurgical Company, Verkhnyaya Pyshma, Russia.  
Email: yana\_arabadzhi@mail.ru

**Natalia N. Orekhova** – DrSc (Eng.), Associate Professor, Department of Geology, Surveying and Mineral Processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: n\_orehova@mail.ru. ORCID 0000-0002-3507-5198

**Andrey Yu. Tyulenev** – The main concentrator, SIBIR-POLYMETALS joint-stock company, Rubtsovsk, Russia.  
Email: TAY@sib-pm.ru

**Lyubov P. Baranova** – Chief Specialist of the Processing Production Department, JSC Ural Mining and Metallurgical Company, Verkhnyaya Pyshma, Russia.  
Email: l.baranova@uralmine.com