

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 622.765.4

DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-3-14-24



ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ВТОРИЧНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ФЛОТИРУЕМОЙ ФРАКЦИИ В КОЛОННЫХ ФЛОТАЦИОННЫХ МАШИНАХ

Метелев А.А.^{1,2}, Закирничный В.Н.¹, Гарифулин М.Г.¹, Пургин А.П.¹, Морозов В.В.²

¹Научно-исследовательский и проектный институт обогащения и механической обработки полезных ископаемых АО «Уралмеханобр», Екатеринбург, Россия

²Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» Минобрнауки РФ, Москва, Россия

Аннотация. На основании результатов исследования разделения минеральных фракций в зоне транспортирования и вторичной концентрации пенного продукта выбраны подходы к решению задачи выбора режимных параметров высокоскоростной пневматической флотации медных руд. Целью проводимых исследований был выбор аэрогидродинамических параметров, обеспечивающих селективность флотации минералов. Новизна проведенных исследований заключается в использовании визиометрической методики, основанной на имитации разделяемых минералов люминофорами, позволяющими в динамическом режиме определять флотоактивность минеральных фракций. С применением новой методики установлены закономерности захвата и выноса в пенный продукт зерен гидрофильных минералов при варьировании расхода воздуха и концентрации вспенивателя. Результатами исследования процессов вторичной концентрации сфлотированных в пенный продукт медных минералов установлены зависимости аэрогидродинамических и технологических параметров пневматической флотации от расхода воздуха и концентрации вспенивателя в водной фазе. Показана возможность поддержания режимов высокоскоростной флотации, не вызывающих чрезмерный вынос зерен нерудных минералов различной крупности в пенный продукт в зоне транспортирования и вторичной концентрации. Результатами расчетов показано, что требуемая эффективность пенной флотации минералов меди достигается при удельном расходе воздуха не более $0,6 \text{ м}^3/\text{м}^2$ мин и концентрации вспенивателя не более 50 мг/л. Для достижения требуемого результата – поддержания требуемого качества концентратов при высокоскоростной флотации – предложено изменить геометрические пропорции флотационной машины: увеличить в 1,5 раза отношение диаметров зоны транспортирования–вторичной флокуляции и зоны аэрации–флотации. Практическим результатом модернизации флотомашин КФМ-1400 путем увеличения диаметра верхней части корпуса стало увеличение ее производительности с 0,371 до 0,985 т/ч м^3 при сохранении требуемого качества медного концентрата.

Ключевые слова: медная руда, высокоскоростная флотация, пена, аэрофлокулы, вторичная концентрация, вспениватель, люминофоры, визиометрический анализ, гидрофильные минералы

© Метелев А.А., Закирничный В.Н., Гарифулин М.Г., Пургин А.П., Морозов В.В., 2026

Для цитирования

Исследование и оптимизация процессов вторичной концентрации флотируемой фракции в колонных флотационных машинах / Метелев А.А., Закирничный В.Н., Гарифулин М.Г., Пургин А.П., Морозов В.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №3. С. 14-24. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-14-24>



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

STUDY AND OPTIMIZATION OF SECONDARY CONCENTRATION PROCESSES OF THE FLOTATED FRACTION IN COLUMN FLOTATION MACHINES

Metelev A.A.^{1,2}, Zakirnichny V.N.¹, Garifulin I.F.¹, Purgin A.P.¹, Morozov V.V.²

¹ Scientific Research and Design Institute of Mineral Processing and Mechanical Processing “Uralmekhanobr”, JSC, Yekaterinburg, Russia

² The National University of Science and Technology MISIS, the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Moscow, Russia

Abstract. Based on the results of studying the separation of mineral fractions in the transport and secondary concentration zone of the froth product, approaches to selecting operating parameters for high-rate pneumatic flotation of copper ores have been developed. The aim of the research is to determine the aerohydrodynamic parameters that ensure the selectivity of mineral flotation. The novelty of the study lies in the use of a visometric technique based on simulating the minerals being separated with luminophores, which makes it possible to determine the floatability of mineral fractions under dynamic conditions. Using the proposed technique, the patterns of capture and entrainment of hydrophilic mineral grains into the froth product have been established as a function of air flow rate and frother concentration. The study of the secondary concentration of copper minerals floated into the froth product has established relationships between the aerohydrodynamic and technological parameters of pneumatic flotation and the air flow rate and frother concentration in the aqueous phase. The possibility of maintaining high-rate flotation conditions without excessive entrainment of non-metallic mineral grains of various sizes into the froth product in the transport and secondary concentration zone has been demonstrated. The calculations have shown that the required efficiency of froth flotation of copper minerals is achieved at a specific air flow rate of no more than 0.6 m³/m² min and a frother concentration of no more than 50 mg/L. To achieve the required result such as maintaining the required concentrate quality under high-rate flotation conditions it has been proposed to modify the geometric proportions of the flotation machine by increasing the ratio of the diameters of the transport-secondary flocculation zone to the aeration-flotation zone by a factor of 1.5. The practical result of modernizing the KFM-1400 flotation machine by increasing the diameter of the upper part of the housing is an increase in its capacity from 0.371 to 0.985 t/h m³ while maintaining the required quality of the copper concentrate.

Keywords: copper ore, high-rate flotation, froth, aeroflocs, secondary concentration, frother, luminophores, visometric analysis, hydrophilic minerals

For citation

Metelev A.A., Zakirnichny V.N., Garifulin I.F., Purgin A.P., Morozov V.V. Study and Optimization of Secondary Concentration Processes of the Flotated Fraction in Column Flotation Machines. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 3, pp. 14-24. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-14-24>

Введение

Преимущества процесса пневматической флотации обусловили его развитие и широкое распространение на рудообогатительных фабриках [1, 2]. Зарубежные флотационные машины с пневматическими аэраторами успешно конкурируют и в ряде случаев вытесняют импеллерные флотационные машины, особенно при обогащении крупновкрапленных руд и материалов [3, 4].

Комбинированные пневматические флотомашины колонного типа, разработанные в АО «Уралмеханобр», предназначены для обогащения широкого спектра руд и техногенного сырья, включая труднообогатимые руды цветных металлов [5, 6]. Данное направление развития флотационной техники вполне актуально и применяется на предприятиях горнохимической отрасли [7, 8].

Пневматические флотационные машины конструктивно сочетают узлы и элементы высокоскоростных и традиционных колонных флотационных аппаратов. Рабочая зона пневматической флотационной машины включает два уровня аэрирования [5, 9]. В верхней части рабочей зоны корпуса флотомашины размещены аэрирующие устройства (эжекторы), обеспечивающие подачу в рабочую зону подготовленной к флотации пульповоздушной смеси, в которой формируются аэрофлокулы гидрофобных минералов. В нижней части машины располагают дополнительные аэраторы, выполненные, как правило, в виде перфорированных элементов. Во флотомашинах серии КФМ в верхней части рабочей зоны реализуются принципы пенной сепарации и флотогравитации, обеспечивающие вторичную концентрацию флотируемых минералов [6]. При этом нижняя часть рабочей зоны функционирует по принципу противоточной колонной флотации.

Важным условием достижения эффективности обогащения бедных медных руд является реализация высокоскоростных режимов пневматической флотации (высокоскоростной флотации), обеспечивающих существенное увеличение производительности флотационного передела на прежних площадях производственных цехов и, соответственно, снижение эксплуатационных затрат. Современная концепция эволюции флотационных машин, в том числе машин серии КФМ, предусматривает оптимизацию геометрических пропорций рабочих камер, в том числе выбор высоты и формы зоны транспортирования – вторичной концентрации и других конструктивных параметров, обеспечивающих увеличение их производительности без снижения качества получаемого концентрата [6, 8].

Для оптимизации размеров и пропорций рабочей камеры флотационных аппаратов необходимо принять во внимание особенности процесса вторичной концентрации, протекающего в зоне транспортирования пены. Образующиеся в процессе флотации аэрофлокулы проходят путь от зоны образования и минерализации до места разгрузки в пенный продукт (ПП) и подвергаются существенной реструктуризации из-за утончения гидратной прослойки, приводящей к схлопыванию и укрупнению воздушных пузырьков, составляющих их структурную основу [9, 10].

Одной из причин снижения качества флотационных концентратов при реализации режимов высокоскоростной флотации является механический вынос тонких фракций нерудных минералов с захватываемой образующимися в процессе флотации аэрофлокулами [10, 11]. Важной составляющей процесса вторичной концентрации является повышение содержания ценного компонента, достигаемое за счет оседания или вымывания зерен и шламов нерудных минералов в зоне транспортирования [12]. Практикой колонной флотации показано, что увеличение высоты зоны транспортирования приводит к повышению качества концентрата [2, 6]. Однако, как показано нашими исследованиями, чрезмерное увеличение высоты зоны транспортирования машины или скорости подъема пенного продукта снижает извлечение ценных компонентов и качество концентрата вследствие разрушения аэрофлокул с зернами рудных минералов [13].

Расход и концентрация вспенивателя в водной фазе пульпы являются важными параметрами, в существенной мере определяющими эффективность флотационного процесса. Недостаточная концентрация вспенивателя ведет к снижению устойчивости пены и, как следствие, к увеличению потерь флотированных минералов. Избыточная концентрация вспенивателя приводит к снижению качества концентрата за счет образования тонких и вязких пен, которые обуславливают существенный механический захват в пенный продукт нефлотированных минералов.

Важным условием выбора конструктивных параметров колонных флотационных машин является учет влияния существенных технологических параметров процесса флотации, таких как расход воздуха и концентрация вспенивателя, существенно влияющих на возможность удаления фракций нерудных минералов из пенного слоя [14]. Принципиальным подходом к выбору параметров гидроаэродинамического режима в зоне транспортирования – вторичной концентрации является обеспечение процесса снижения обводненности межпузырькового пространства за счет протекания процесса синерезиса – «стекания» межпузырьковой жидкости под действием гравитационных сил [15, 16].

Задачей настоящей работы являлось экспериментальное исследование влияния параметров флотационного процесса – расхода воздуха и концентрации вспенивателя – на захват зерен и шламов нерудных минералов в пенный продукт с водной фазой аэрофлокул и обратный процесс их удаления при протекании процессов вторичной концентрации в пенном продукте, обеспечивающих повышение технологических показателей процесса колонной флотации.

Методология и методики исследований

К общепринятым механизмам разрушения пены относятся: вытекание жидкости из пены (синерезис), обуславливающее утончение пленок без изменения объема пены; укрупнение больших ячеек пены и исчезновение маленьких из-за диффузии газа через пленки; разрыв пленок [15, 16]. Преобладание одного или другого механизма зависит от многих факторов, но во всех случаях фактором, снижающим устойчивость пены, является чрезмерное снижение толщины гидратного слоя вокруг воздушных пузырьков в аэрофлокулах [13, 17].

Для решения задачи определения оптимальных параметров процесса вторичной концентрации флотированных минералов в пенном продукте в работе [13] была выбрана гипотеза, связывающая содержание гидрофильных минеральных компонентов в пене с массовой долей воды в межпузырьковом пространстве.

Исследование характеристик и траекторий передвижения флотированных и нефлотированных минеральных частиц во флотационном процессе с использованием лабораторных флотационных установок затруднено ввиду непрозрачности флотационной пульпы и пены. Для определения аэрогидродинамических характеристик пены и исследования траекторий движения минеральных зерен в процессе флотации была разработана и применена специально спроектированная и изготовленная флотационная установка на базе известной конструкции, называемой «Трубка Халлимонда», с замкнутым циклом движения продуктов флотации, схема которой и изображение рабочей зоны представлены на **рис. 1**.

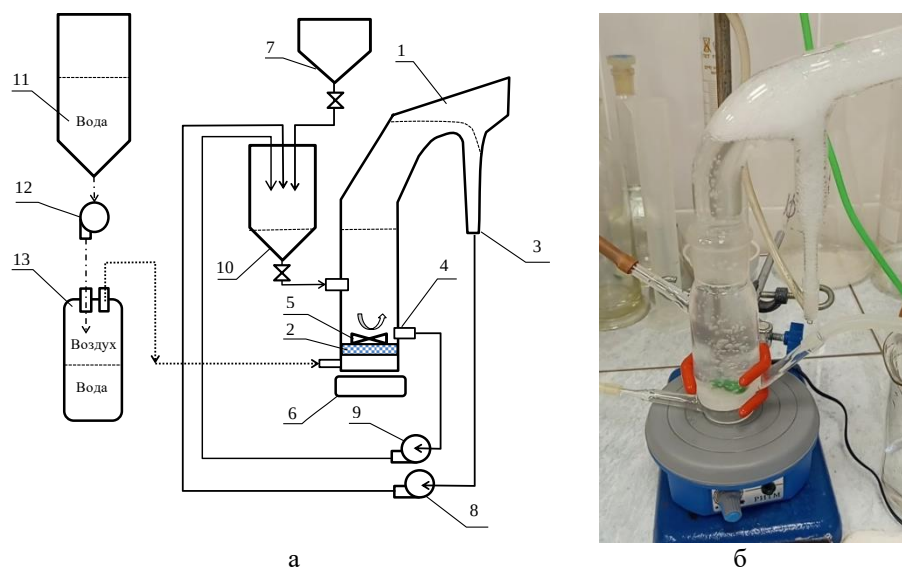


Рис. 1. Схема узлов (а) и изображение рабочей зоны (б) установки пенной флотации для исследования гидроаэродинамического режима: 1 – стеклянная флотокамера; 2 – пористая перегородка; 3 – разгрузочный патрубок пенного продукта; 4 – разгрузочный патрубок камерного продукта; 5 – магнитный элемент; 6 – магнитная мешалка; 7 – емкость загрузки питания флотации; 8 – перистальтический насос для перекачки пенного продукта; 9 – перистальтический насос для перекачки камерного продукта; 10 – приемник продуктов флотации; 11 – емкость с вытеснительной водой; 12 – насос-регулятор расхода вытеснительной воды; 13 – вытеснитель воздуха

Fig. 1. Schematic diagram of the units (a) and image of the working zone (б) of the froth flotation unit for studying the aerohydrodynamic regime: 1 is glass flotation cell; 2 is porous partition; 3 is froth product discharge nozzle; 4 is tailings product discharge nozzle; 5 is magnetic element; 6 is magnetic stirrer; 7 is flotation feed tank; 8 is peristaltic pump for transferring the froth product; 9 is peristaltic pump for transferring the tailings product; 10 is flotation product receiver; 11 is displacement water tank; 12 is displacement water flow control pump; 13 is air displacer

Опыты проводились при пенной флотации с переменным расходом воздуха и концентрации вспенивателя. Изменения расхода воздуха обеспечивали регулированием числа оборотов перистальтического насоса 12, перекачивающего воду из мерной емкости 13 в вытеснительную емкость 14. Изменение концентрации вспенивателя достигали добавкой реагента в водную фазу.

Применение замкнутого цикла с возвратом как сфлотированных минералов (пенного продукта), так и несфлотированных минералов (камерного продукта) в голову процесса позволяло достичь высокой стабильности процесса и сопоставимости результатов, получаемых при варьировании параметров процесса флотации, например расхода воздуха и концентрации вспенивателя.

При проведении исследований на начальном этапе была применена визиометрическая методика, позволяющая фиксировать концентрации, направление и траектории движения минеральных зерен в трехфазной системе твердое – жидкое – газ [13, 15, 18]. Для определения изменения структуры пенного слоя, концентрации и траекторий движения минеральных зерен использовали загрузки люминофоров-имитаторов флотируемых и нефлотируемых минералов, имеющих существенно устойчивые спектры люминесценции в видимом диапазоне при облучении ультрафиолетовым источником

[13]. При этом характеристики люминофоров, имитирующих флотируемые и нефлотируемые минералы, существенно различались, что давало возможность по интегральному спектру определить их соотношение в анализируемом материале. Применение разработанной методики позволяло фиксировать в пене отдельные зерна люминофоров, имитирующих флотируемые или нефлотируемые минералы, и определять траекторию и скорость их движения во флотационной пене.

Использование описанной выше флотационной установки с замкнутым циклом движения продуктов флотации позволяло фиксировать и анализировать результаты после достижения устойчивого протекания флотационного процесса.

Технологические исследования, ставившие задачу оценки эффективности выбранных подходов к модификации конструкций флотационных аппаратов, проводились на серийных флотационных машинах КФМ-1400 и КФМ-1400ВМГ на медных рудах ГОКов АО «Святогор».

Обсуждение полученных результатов

Исследования влияния расхода воздуха на селективность процесса флотации. На начальном этапе исследований были поставлены эксперименты, ставящие целью установления влияния расхода воз-

духа во флотационную установку на селективность флотации. С целью получения информации о поведении флотируемых минералов в различающихся режимах аэрации была применена изображенная на **рис. 1** флотационная установка с замкнутым циклом движения продуктов флотации. Анализ флотационного процесса проводили с применением визиометрической методики с использованием твердых люминофоров-имитаторов флотируемых и нефлотируемых рудных минералов.

В качестве имитаторов минералов использовали люминофоры Э-515-115 и ЭЛ-570М (сульфиды цинка и кадмия, активированные ионами меди и серебра) [19]. Для перевода люминофора Э-515-115 во флотируемую форму применяли его обработку в растворе медного купороса с концентрацией 63 мг/л и последующую гидрофобизацию в растворе бутилового ксантогената с концентрацией 100 мг/л. Люминофор ЭЛ-570 такой обработке не подвергался и сохранял гидрофильность поверхности. Люминофор Э-455-115 обладает фотолюминесценцией с максимумом длины волны 455 нм (синее свечение), люминофор ЭЛ-570М – фотолюминесценцией с максимумом длины волны 570 нм (желтое свечение). При исследовании применяли фракции люминофоров крупностью от 25 до 80 мкм.

При помощи фотосъемки и последующего визиометрического анализа определяли относительную

концентрацию минеральных зерен в рабочей зоне и пенном слое (**рис. 2, б**). Анализ изображений показывает, что при флотации смеси люминофоров Э-570М и Э-455-115 в зоне флотации (участок 2 на **рис. 2, в**) регистрируется зеленое свечение, представляющее собой смешенное излучение от обоих люминофоров. В пенном слое (участок 3 на **рис. 2, в**) и в разгрузочном патрубке (участок 3 на **рис. 2, г**) пенного продукта регистрируется синее свечение, характерное флотируемому люминофору Э-455-115.

Соотношение люминофоров в узлах флотационной установки определяли по результатам спектрального анализа изображений. Расчеты проводили путем предварительного преобразования цветовых характеристик анализируемого участка из формата RGB (красное – голубое – синее) в формат HSL (цветовой оттенок, насыщенность, яркость) (**рис. 3**). Результаты визиометрического анализа, проведенного с использованием программного пакета XnView и приведенного ниже уравнения для расчета длины волны максимума излучения $\nu_{\max}$ по цветовому оттенку H , град,

$$\nu_{\max} = -0,73 \cdot H + 621,$$

позволили определить цветовые характеристики участков с различным соотношением флотируемого и нефлотируемого имитатора.

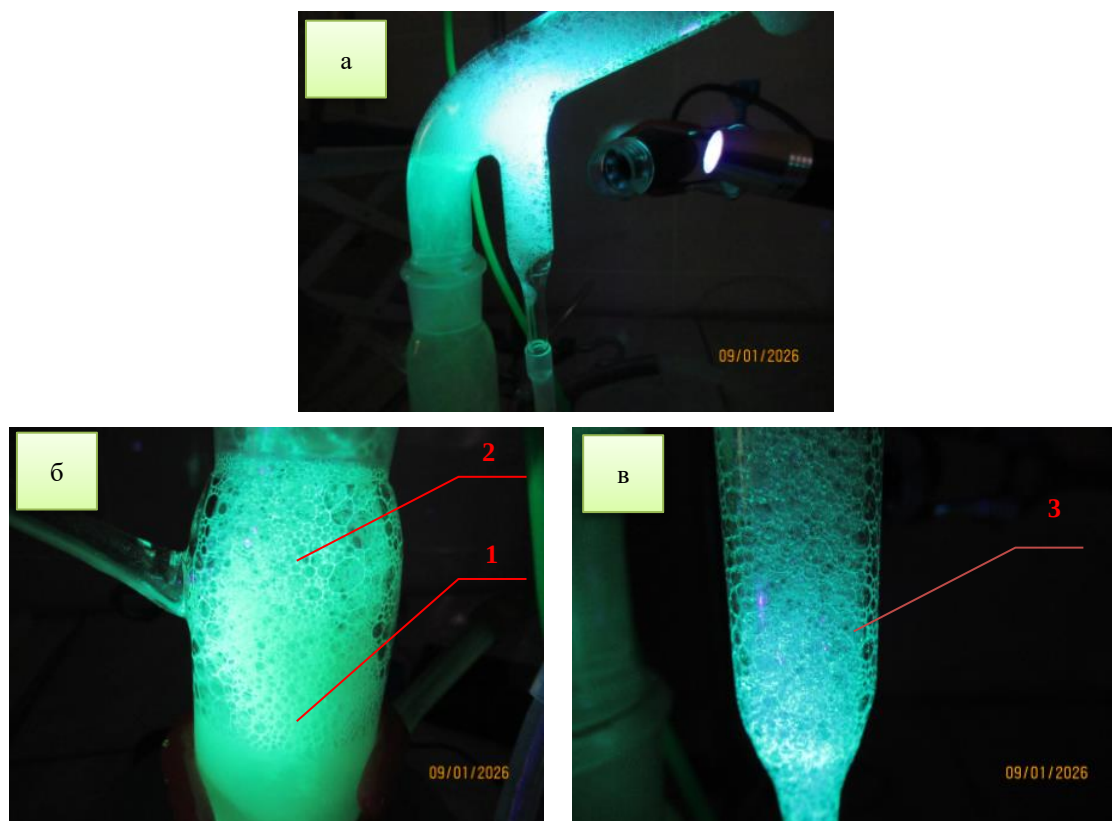


Рис. 2. Изображения флотационной установки (а), рабочей зоны (б) и патрубка разгрузки пенного продукта (в) в ультрафиолетовом освещении, где 1, 2, 3 – участки для спектрального анализа по **табл. 1**

Fig. 2. Images of the flotation unit (a), working zone (б), and froth product discharge nozzle (в) under ultraviolet illumination, where 1, 2, and 3 are areas used for spectral analysis according to Table 1

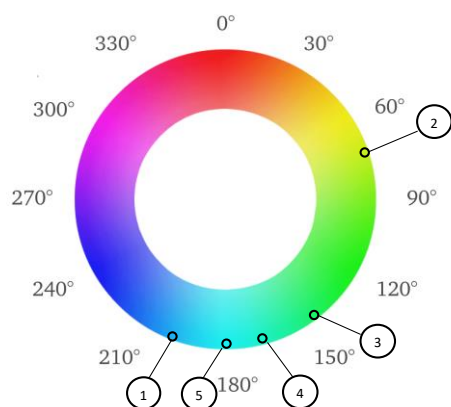


Рис. 3. Представление цветового оттенка люминофоров и результатов анализа изображений на рис.2 на цветовом круге формата HSL: 1 –люминофор Э-455-115; 2 – люминофор ЭЛ-570М; 3 – нижняя часть зоны флотации – камерный продукт, 4 – верхняя часть зоны флотации – пенный продукт; 5 – пена в патрубке разгрузки

Fig. 3. Representation of the color hues of luminophores and results of image analysis shown in Fig. 2 on an HSL color wheel: 1 is E-455-115 luminophore; 2 is EL-570M luminophore; 3 is lower part of the flotation zone – tailings product; 4 is upper part of the flotation zone – froth product; 5 is froth in the discharge nozzle

Для расчета соотношения люминофоров в анализируемых продуктах использовали зависимость цветового оттенка H от соотношения люминофоров (см. рис. 3), построенную по данным табл. 1.

Таблица 1. Спектральные характеристики сигнала люминесценции смеси люминофоров при варьировании соотношения массовых долей компонентов и результаты анализа изображений

Table 1. Spectral characteristics of the luminescence signal of a luminophore mixture with varying mass fractions of the components and the results of image analysis

№ п/п	Массовая доля люминофоров, %		Координаты сигнала в RGB			Координаты сигнала в HSL			Длина волны максимума сигнала, нм
	Э-455-115	ЭЛ-570М	R	G	B	H	S	L	
Калибровка									
1	100	0	25	108	187	200	75,7	40,4	475,0
2	90	10	32	121	170	193	68,3	39,6	480,1
3	80	20	50	138	145	184	50,3	37,8	486,7
4	70	30	70	155	140	171	37,8	44,1	496,2
5	60	40	71	160	130	160	38,5	45,3	504,2
6	50	50	92	168	125	146	30,4	51	514,4
7	40	60	114	156	104	108	20,8	51	542,2
8	30	70	127	174	99	98	31,6	53,5	549,5
9	20	80	140	179	94	88	35,9	53,5	556,8
10	10	90	150	185	88	82	40,9	53,5	561,1
11	0	100	164	183	68	70	45,8	49,2	570,0
Результаты анализа изображений на рис. 2									
1	Нижняя часть рабочей зоны		29	137	79	148	65,1	32,5	513
2	Верхняя часть рабочей зоны		40	147	125	168	57,2	36,7	498,3
3	Пенный продукт в точке разгрузки		49	157	181	191	57,4	45,1	481,6

Полученные результаты исследований позволили измерить влияние расхода воздуха и концентрации вспенивателя на характеристики пенного продукта. Как видно из рис. 4, а, увеличение расхода воздуха вызывает существенное увеличение выхода и относительной доли в пенном продукте нефлотируемого материала – люминофора ЭЛ-570. Увеличение концентрации вспенивателя также приводит к повышению массовой доли нефлотируемого компонента в пенном продукте (рис. 4, б).

Таким образом, результаты визиометрического анализа по разработанной методике с применением люминофоров позволили установить количественные зависимости механического захвата и загрязнения пенного продукта нефлотируемыми минералами. Полученные результаты устанавливают причины снижения качества концентрата и обосновывают необходимость корректировки режимов скоростной пневматической флотации в части выбора расхода воздуха и концентрации вспенивателя, не вызывающих увеличения механического выноса в пенный продукт нерудных минералов.

Исследование влияния расхода воздуха и концентрации вспенивателя на изменение параметров пены и технологических показателей флотации медной руды. Исследование влияния расхода воздуха на параметры пены и технологические показатели флотации медной руды проводили на пробе медной руды с использованием вышеописанной флотационной установки. Флотируемая руда Волковско-го месторождения относится к классу медно-магнетитовых (табл. 2) и характеризуется высокой массовой долей глинистых минералов, что обуславливает снижение качества медного концентрата.

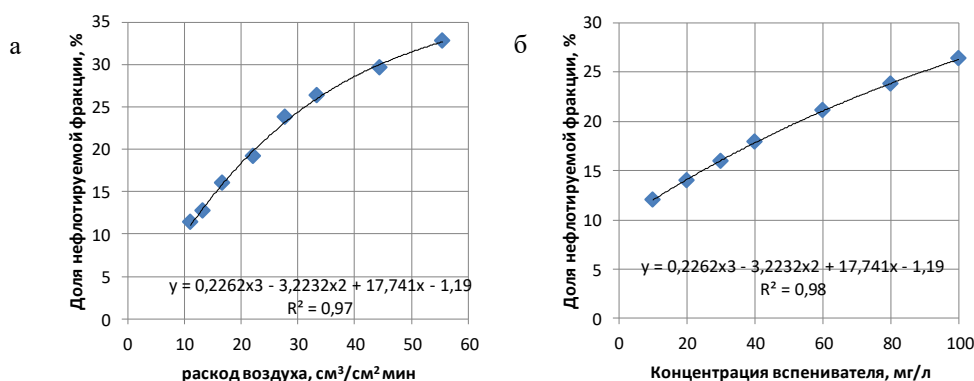


Рис. 4. Зависимость относительной доли нефлотируемой фракции (люминофора ЭЛ-570М) в пенном продукте от расхода воздуха (а) и концентрации вспенивателя (б) по данным визиометрического анализа
Fig. 4. Dependence of the relative fraction of the non-floatable fraction (EL-570M luminophore) in the froth product on the air flow rate (a) and frother concentration (б), based on visometric analysis data

Таблица 2. Минеральный состав пробы руды Волковского месторождения
Table 2. Mineral composition of the ore sample from the Volkovsky deposit

Минералы	Массовая доля, %
Вторичные минералы меди (ковеллин, борнит, халькозин)	0,4
Халькопирит	0,2
Оксисленные минералы меди (хризоколла, малахит)	0,2
Пирит	0,1
Магнетит	13,8
Амфиболы	5,9
Пироксены	33,8
Полевые шпаты	22,5
Апатит	9,4
Клинохлор	8,0
Слюда	3,0
Кальцит	2,1
Прочие	0,6

При проведении флотационных опытов исходную навеску измельченной руды в виде пульпы с плотностью 30% твердого загружали в дозатор и подавали в рабочую зону флотокамеры. После стабилизации процесса флотации проводили отбор пробы пенного продукта. Выгрузку пены проводили путем перенаправления потока пенного продукта из перистальтического насоса в течение 30 с в приемник – фарфоровую чашку. Отобранную пробу взвешивали до и после удаления влаги высушиванием. По разности массы исходной и высушенной пробы рассчитывали массу удаленной воды. По массе водной и твердой фазы рассчитывали плотность водно-минеральной фазы пенного продукта (отношение массы твердого к массе пенного продукта). По расходу воздуха и объему водной фазы рассчитывали кратность пены (отношение объема воздуха к объему воды, В:Ж).

Отобранная твердая фаза после истирания анализировалась на содержание меди методом рентгенофлуоресцентного анализа. По значениям выхода твердой фазы в пробе и содержания меди в пробе и исходной руде рассчитывалось извлечение меди в пенный продукт.

Результаты анализа показателей флотации показали, что при увеличении расхода воздуха наблюдается увеличение выхода пенного продукта и его обводненности (снижение плотности). Изменение технологических показателей состоит в увеличении выхода пенного продукта, повышении извлечения меди и снижении содержания меди в пенном продукте (табл. 3). Причиной таких результатов является увеличение скорости подъема пены, сокращение времени пребывания аэрофлокул в зоне транспортирования – вторичной концентрации и, соответственно, меньшая интенсивность удаления зерен и шламов нерудных минералов за счет стекания водной фазы из аэрофлокул. Повышение извлечения медных минералов обусловлено заметным ослаблением деструкции пены и снижением выпадения ее сростков флотируемых минералов.

Результаты расчетов показали, что эффективность пенной флотации минералов меди существенно уменьшается при удельном расходе воздуха более 0,6 м³/м² мин. Выбор оптимального режима по расходу воздуха будет определяться технико-экономическим анализом, сравнивающим потери от качества концентрата со стоимостью дополнительно извлекаемой меди. При наличии «запаса» по качеству концентрата вполне целесообразно использовать режим скоростной флотации с повышенным расходом воздуха, обеспечивающий повышение извлечения меди на 6,4–10,4%.

Расход и концентрация вспенивателя также являются важными параметрами флотационного процесса, требующими непрерывной корректировки. Результаты анализа показателей флотации медной руды при варьировании концентрации вспенивателя в водной фазе показали ее существенное влияние на аэрогидродинамические и технологические показатели. Так, увеличение концентрации вспенивателя повышает обводненность пенного продукта и скорость подъема, уменьшает продолжительность его пребывания в зоне транспортирования – вторичной концентрации. При этом наблюдается увеличение выхода пенного продукта, повышение извлечения меди и снижение содержания меди в концентрате (табл. 4).

Таблица 3. Параметры пенного продукта и показатели флотации медной руды в установке пенной флотации с замкнутым циклом движения продуктов флотации при варьировании расхода воздуха

Table 3. Froth product parameters and flotation performance indicators for copper ore in a froth flotation unit with a closed-loop circulation of flotation products at varying air flow rates

Удельный расход воздуха, см ³ /см ² ·мин	Выход пенного продукта, г	Масса твердого в ПП, г	Доля твердого в ПП, %	Скорость подъема ПП, см/мин	Массовая доля меди, %	Извлечение меди, %
11,1	2,57	0,93	36,19	12,4	15,4	73,4
13,3	2,85	0,95	33,33	14,8	15,3	74,5
16,7	3,07	0,97	31,60	19,4	15,1	75,1
22,2	3,44	1,05	30,52	24,5	14,4	77,5
27,8	3,56	1,13	31,74	30,5	13,7	79,4
33,3	3,98	1,25	30,41	38,0	12,9	81,8
44,4	4,79	1,38	28,81	48,8	12,2	82,8
60,1	6,36	1,5	27,99	54,2	11,3	83,8
76,3	7,99	1,99	24,91	60,0	9,8	84,1

Таблица 4. Параметры пенного продукта и показатели флотации медной руды в установке пенной флотации с замкнутым циклом при варьировании концентрации вспенивателя

Table 4. Froth product parameters and flotation performance indicators for copper ore in a closed-loop froth flotation unit at varying frother concentrations

Концентрация вспенивателя, мг/л	Выход пенного продукта, г	Масса твердого в ПП, г	Доля твердого в ПП, %	Массовая доля меди в ПП, %	Извлечение меди, %
10	2,49	0,91	36,55	15,6	72,8
15	2,99	0,94	31,44	15,4	74,2
20	3,11	0,96	30,87	15,3	75,3
30	3,37	1,05	29,41	14,7	77,5
40	3,58	1,13	28,39	13,9	79,4
50	3,89	1,26	28,06	13,4	81,4
60	4,29	1,34	27,40	11,4	81,8

Причинами снижения качества концентрата является уменьшение интенсивности удаления из пены избыточной водной фазы, содержащей значительное количество шламовых классов нерудных минералов. Результаты расчетов показано, что качество флотационного концентрата существенно уменьшается при концентрации вспенивателя более 50 мг/л.

Выбор оптимального режима по расходу концентрации вспенивателя также определяется технико-экономическим анализом, сравнивающим потери от качества концентрата со стоимостью дополнительно извлекаемой меди при переходе к режиму скоростной флотации. При наличии «запаса» по качеству концентрата вполне целесообразно использовать режим скоростной флотации, обеспечивающий повышение извлечения меди от 5,6 до 9,0%.

Реализация режима высокоскоростной флотации требует поддержания режима, обеспечивающего стекание механически захваченной воды из аэрофлокул в сформированном пенном продукте. Рациональным конструктивным решением поставленной задачи является применение флотационных машин с модернизированной формой зоны транспортирования–вторичной концентрации, обеспечивающей требуемый режим стекания избыточной водной фазы из пенного слоя. Требуемый результат достигается путем увеличения диаметра этой зоны относительно зоны аэрации–флотации, обеспечивающем снижение скорости подъема пены при равной продолжительности пребывания в зоне транспортирования–вторичной

концентрации. Так в модернизированной флотомашине КФМ-1400 ВМГ с целью сохранения оптимальных условий вторичной концентрации флотируемых минералов в пенном продукте при реализации высокоскоростного режима флотации было достигнуто пропорциональное увеличение диаметра верхней части корпуса (рис. 5).

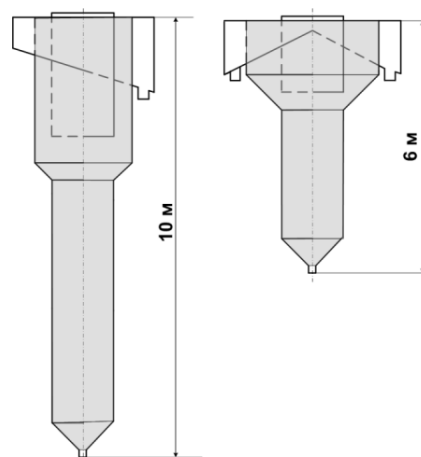


Рис. 5. Изменение пропорций рабочей камеры флотомашины КФМ при модернизации: а – КФМ-1400; б – КФМ-1400ВМГ

Fig. 5. Changes in the proportions of the working chamber of the KFM flotation machine during modernization: a is KFM-1400; b is KFM-1400VMG

Результаты промышленных испытаний, проведенных на медных рудах ГОКов АО «Святогор» показали, что за счет описанных изменений конструкции при переходе на высокоскоростной режим пенной флотации удалось обеспечить сохранение требуемых кондиций получаемого концентрата (табл. 5).

Таблица 5. Сравнение конструктивных параметров, производительности и показателей флотации до и после модернизации флотационной машины КФМ-1400

Table 5. Comparison of the design parameters, capacity, and flotation performance indicators before and after modernization of the KFM-1400 flotation machine

Показатели	Флотомашины	
	КФМ-1400	КФМ-1400ВМГ
Объем камеры флотомашины, м ³	19,0	15,1
Высота флотомашины, м	10,0	6,0
Площадь пенообразования, м ²	3,8	7,1
Максимальный расход сжатого воздуха, м ³ /ч	180	250
Удельная производительность по пенному продукту, т/ч·м ³	0,371	0,985
Извлечение меди в концентрат, %	88,7	88,9
Массовая доля меди в концентрате, %	15,3	15,1

Отмеченное изменение основных технологических показателей (извлечение меди в концентрат и качество концентрата) незначительно показывает возможность достижения основного показателя скоростной флотации – удельной производительности по пенному продукту. Практическим результатом модернизации флотомашины КФМ (модель КФМ-1400ВМГ) путем увеличения диаметра верхней части корпуса стало в конечном итоге увеличение ее производительности с 0,371 до 0,985 т/ч м³ при сохранении требуемого качества медного концентрата.

Выводы

С применением минеральных люминофоров-имитаторов флотируемых и нефлотируемых минералов определены закономерности и установлен эффект механического выноса нерудных минералов в пенный продукт пневматической флотации при увеличении расхода воздуха и концентрации вспенивателя. Обоснована необходимость корректировки режимов пневматической флотации в части выбора расхода воздуха и концентрации вспенивателя, не вызывающих резкого увеличения извлечения в пенный продукт нерудных минералов.

Результатами анализа параметров пенного слоя и показателей флотации медной руды подтвержден эффект увеличения выхода пенного продукта, повышение извлечения меди и снижение содержания меди в пенном продукте вследствие сокращения времени пребывания аэрофлокул в зоне транспортирования – вторичной концентрации при увеличении расхода воздуха и концентрации вспенивателя.

Показано, что реализация режима скоростной флотации требует поддержания режима, обеспечивающего уменьшение выхода в пенный продукт механически захваченной аэрофлокулами водной фазы, содержащей нерудные минералы. Решение поставленной задачи достигается увеличением времени пребывания пены в зоне транспортирования – вторичной концентрации флотационных машин. В модернизированной флотомашине КФМ-1400ВМГ данная цель достигнута уменьшением высоты рабочей зоны и пропорциональным увеличением диаметра верхней части корпуса. За счет модернизации конструкции удалось реализовать высокоскоростной режим пенной флотации при сохранении высокого извлечения меди и требуемого качества получаемого концентрата.

Список источников

1. Froth recovery of industrial flotation cells / Yianatos J.B., Moysb M.H., Contrerasa F., Villanuevac A. // *Minerals Engineering*. 2008, no. 21, pp. 817–825.
2. Jameson G.J. New directions in flotation machine design // *Minerals Engineering*. 2010, no. 23, pp. 835–841.
3. Информационно-аналитические материалы: Мировые достижения развития методов, техники и технологий переработки минерального сырья. Серия: Обогащение минерального сырья. М.: Изд-во ВИМС, 2020. 52 с.
4. Обзор рынка флотационных установок для переработки минерального сырья в России. Исследовательская группа «Инфомай». 2023. 165 с.
5. Особенности работы флотомашины серии КФМ в промышленных схемах обогащения медных, медно-цинковых и свинцово-цинковых руд / Видуецкий М.Г., Мальцев В.А., Паньшин А.М., Йочев И.Щ. // *Цветные металлы*. 2017. № 6. С. 12-21.
6. Колонные пневматические флотационные машины. Эволюция / Видуецкий М.Г., Гарифулин И.Ф., Мальцев В.А., Пургин А.П. Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2020. 149 с.
7. Калугин А. И., Лебедок А. В., Маркворт Л. Эффективная технология пневматической флотации. Возможности технической модернизации флотационного процесса для горнохимического сырья // *Рациональное освоение недр*. 2021. № 1. С. 56-59.
8. Опыт разработки и эксплуатации колонных флотационных машин НПО «СОМЭК» для обогащения апатит-нефелиновых руд Хибинских месторождений / Никитин А.Ю., Елисеева Р.А., Юшина Т.И., Калугин А.И. // *Горный журнал*. 2021. №12. С.37-43. DOI: 10.17580/gzh.2021.12.07.
9. Farrokhpay S., Filippov L., Fornasiero D. Flotation of fine particles: A review. // *Miner Process Extract Metallurg Rev.* 2021, no. 42, pp. 473–83. DOI: 10.1080/08827508.2020.1793140.
10. Flotation Performance and Gas Dispersion Properties in a Laboratory Flotation Cell / Femenias F., Maldonado M., Miranda N., Gutierrez L. // *Minerals*. 2022, no. 12. 1351. <https://doi.org/10.3390/min12111351>.
11. A methodology for gangue management in the flotation of a PGM-bearing ore through laboratory tests, mineralogical analysis and circuit modeling / McFadzean B., Becker M.,

- Geldenhuis S., Sweet J. // Minerals Engineering. 2024, no. 208, pp. 1–10. doi.org/10.3390/min12111351.
12. 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 ЗабГУ. 2024. Т. 30. № 4. С. 55-70.
13. Моделирование и оптимизация гидроаэродинамического режима в зоне транспортирования – вторичной концентрации в колонных флотационных машинах / Метелев А.А., Видуцкий М.Г., Гарифулин И.Ф., Пургин А.П., Морозов В.В. // Руды и металлы. 2025. №4. С. 88–100.
14. Wang D., Liu Q. Aggregating fine hydrophilic materials in froth flotation to improve separation efficiency through a homo-aggregation flotation process // Advances in Colloid and Interface Science. 2024, no. 325, pp. 1-12, 103110. DOI: 10.1016/j.cis.2024.103110
15. Вилкова Н.Г. Свойства пен и методы их исследования. Пенза, ПГУАС, 2013. 120 с.
16. Zhang W. The Effects of Frothers and Particles on the Characteristics of Pulp and Froth Properties in Flotation—A Critical Review // Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering. 2016, no. 4, pp. 251-269.
17. Wang D., Liu Q. Influence of aggregation/dispersion state of hydrophilic particles on their entrainment in fine mineral particle flotation // Minerals Eng. 2021, no. 166, 106835. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.106835.
18. Martinez J., Maldonado M., Gutierrez L. A Method to Predict Water Recovery Rate in the Collection and Froth Zone of Flotation Systems // Minerals. 2020, no. 10, 630; doi:10.3390/min10070630.
19. Modification of Diamond Spectrum Pattern Using Lumiphore-Containing Agents with Zinc and Cadmium Chalcogenides / Chanturia V.A., Morozov V.V., Dvoichenkova G.P., Chanturia E.L., Podkamenny Y.A. // Journal of Mining Science. 2022, vol. 58, no. 4, pp. 599–609. DOI: 10.1134/S1062739122040093.
20. lead-zinc ores. *Tsvetnye metally* [Non-Ferrous Metals]. 2017;(6):12-21. (In Russ.)
6. Viduyetskiy M.G., Garifulin I.F., Maltsev V.A., Purgin A.P. *Kolonnnye pnevmaticheskie flotatsionnye mashiny. Evolyutsiya* [Column pneumatic flotation machines. Evolution]. Yekaterinburg: UrFU Publishing House, 2020, 149 p. (In Russ.)
7. Kalugin A.I., Lebedok A.V., Markvort L. Effective pneumatic flotation technology. Possibilities for technical modernization of the flotation process for mining and chemical raw materials. *Ratsionalnoe osvoenie nedr* [Rational Development of Mineral Resources]. 2021;(1):56-59. (In Russ.)
8. Nikitin A.Yu., Eliseeva R.A., Yushina T.I., Kalugin A.I. Experience in the development and operation of column flotation machines of the SOMEX Research and Production Association for processing apatite-nepheline ores of the Khibiny deposits. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal]. 2021;(12):37-43. DOI: 10.17580/gzh.2021.12.07. (In Russ.)
9. Farrokhpay S., Filippov L., Fornasiero D. Flotation of fine particles: A review. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2021;(42):473-483. DOI: 10.1080/08827508.2020.1793140.
10. Femenias F., Maldonado M., Miranda N., Gutierrez L. Flotation performance and gas dispersion properties in a laboratory flotation cell. Minerals. 2022;(12):1351. DOI: 10.3390/min12111351.
11. McFadzean B., Becker M., Geldenhuis S., Sweet J. A methodology for gangue management in the flotation of a PGM-bearing ore through laboratory tests, mineralogical analysis and circuit modeling. Minerals Engineering. 2024;(208):1-10. doi.org/10.3390/min12111351.
12. Arabadzhi Ya.N., Orekhova N.N., Abdrakhmanov K.I., Abdrakhmanov E.I. Aspect analysis of mechanisms of contamination of sulfide concentrates with slimes from host rocks and review of methods for its reduction. *Vestnik ZabGU* [Transbaikal State University Bulletin]. 2024;30(4):55-70. (In Russ.)
13. Metelev A.A., Viduyetskiy M.G., Garifulin I.F., Purgin A.P., Morozov V.V. Modeling and optimization of the hydrodynamic regime in the transport-secondary concentration zone of column flotation machines. *Rudy i metally* [Ores and Metals]. 2025;(4):88-100. (In Russ.)
14. Wang D., Liu Q. Aggregating fine hydrophilic materials in froth flotation to improve separation efficiency through a homo-aggregation flotation process. Advances in Colloid and Interface Science. 2024;(325):1-12, 103110. DOI: 10.1016/j.cis.2024.103110.
15. Vilkova N.G. *Svoystva pen i metody ikh issledovaniya* [Properties of froth and methods of investigation]. Penza: PSUACE, 2013, 120 p. (In Russ.)
16. Zhang W. The effects of frothers and particles on the characteristics of pulp and froth properties in flotation - A critical review. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering. 2016;(4):251-269.
17. Wang D., Liu Q. Influence of aggregation/dispersion state of hydrophilic particles on their entrainment in fine mineral particle flotation. Minerals Engineering. 2021;(166):106835. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.106835.
18. Martinez J., Maldonado M., Gutierrez L. A method to predict water recovery rate in the collection and froth zone

References

1. Yianatos J.B., Moysb M.H., Contreras F., Villanuevac A. Froth recovery of industrial flotation cells. Minerals Engineering. 2008;(21):817-825.
2. Jameson G.J. New directions in flotation machine design. Minerals Engineering. 2010; (23):835-841.
3. *Informatsionno-analiticheskie materialy: Mirovye dostizheniya razvitiya metodov, tekhniki i tekhnologiy pererabotki mineralnogo syrya. Seriya: Obogashchenie mineralnogo syrya* [Information and analytical materials: World achievements in the development of methods, equipment and technologies for mineral processing. Series: Mineral Processing]. Moscow: VIMS Publishing House, 2020, 52 p. (In Russ.)
4. *Obzor rynka flotatsionnykh ustanovok dlya pererabotki mineralnogo syrya v Rossii* [Review of the market of flotation equipment for mineral processing in Russia]. Research Group InfoMine, 2023, 165 p. (In Russ.)
5. Viduyetskiy M.G., Maltsev V.A., Panshin A.M., Yochev I.Sh. Features of operation of KFM flotation machines in industrial processing flowsheets of copper, copper-zinc and

- of flotation systems. Minerals. 2020;(10):630. DOI: 10.3390/min10070630.
19. Chanturia V.A., Morozov V.V., Dvoichenkova G.P., Chanturia E.L., Podkamenny Y.A. Modification of diamond spectrum pattern using luminophore-containing agents with zinc and cadmium chalcogenides. Journal of Mining Science. 2022;58(4):599-609. DOI: 10.1134/S1062739122040093.

Поступила 29.01.2026; принята к публикации 16.03.2026; опубликована 30.09.2026
Submitted 29/01/2026; revised 16/03/2026; published 30/09/2026

Метелёв Алексей Анатольевич – главный инженер,
Научно-исследовательский и проектный институт обогащения и механической обработки полезных ископаемых АО «Уралмеханобр», Екатеринбург, Россия.
Email: Metelev_AA@umbr.ru. Scopus ID: 57195473641.

Закиричный Виталий Николаевич – заместитель генерального директора по науке,
Научно-исследовательский и проектный институт обогащения и механической обработки полезных ископаемых АО «Уралмеханобр», Екатеринбург, Россия.
Scopus ID: 57216488615.

Гарифулин Игорь Фагимьянович – ведущий научный сотрудник,
Научно-исследовательский и проектный институт обогащения и механической обработки полезных ископаемых АО «Уралмеханобр», Екатеринбург, Россия.
Scopus ID: 55826770400.

Пургин Александр Петрович – заведующий отделом,
Научно-исследовательский и проектный институт обогащения и механической обработки полезных ископаемых АО «Уралмеханобр», Екатеринбург, Россия.
Scopus ID: 6603243105.

Морозов Валерий Валентинович – профессор кафедры общей неорганической химии,
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» Минобрнауки РФ, Москва, Россия.
E-mail: dchmggu@mail.ru. ORCID: 0000-0003-4105-944X.

Alexey A. Metelev – Chief Engineer,
Scientific Research and Design Institute for the Enrichment and Mechanical Processing of Minerals (JSC Uralmexhanobr), Yekaterinburg, Russia.
Email: Metelev_AA@umbr.ru. Scopus ID: 57195473641.

Vitaly N. Zakirnichny – Deputy Director General for Science,
Scientific Research and Design Institute for the Enrichment and Mechanical Processing of Minerals (JSC Uralmexhanobr), Yekaterinburg, Russia.
Scopus ID: 57216488615.

Igor F. Garifulin – Leading Researcher,
Scientific Research and Design Institute for the Enrichment and Mechanical Processing of Minerals (JSC Uralmexhanobr), Yekaterinburg, Russia.
Scopus ID: 55826770400

Alexander P. Purgin – Head of the Department,
Scientific Research and Design Institute for the Enrichment and Mechanical Processing of Minerals (JSC Uralmexhanobr), Yekaterinburg, Russia.
Scopus ID: 6603243105.

Valery V. Morozov – Professor of the Department of General Inorganic Chemistry,
The National University of Science and Technology MISIS, Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Moscow, Russia.
Email: dchmggu@mail.ru. ORCID: 0000-0003-4105-944X.