

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

УДК 622.765

DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-3-33-42



РАЗРАБОТКА МЕТОДА И УСТАНОВКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАЗМЕРА ПУЗЫРЬКОВ В УСЛОВИЯХ, МОДЕЛИРУЮЩИХ РЕЖИМ ПАРОВОЗДУШНОЙ ФЛОТАЦИИ

Евдокимов С.И.¹, Герасименко Т.Е.¹, Горлова О.Е.^{2,3}, Орехова Н.Н.³

¹ Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Россия

² Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

³ Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова РАН, Москва, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Работа направлена на повышение селективности разделения минералов методом флотации и увеличение полноты извлечения ценного компонента за счет новых способов построения схемы флотации и режима аэрации пульпы. **Цель работы.** Исследование изменения размера паровоздушных пузырьков при их внезапном контакте с холодной жидкостью в процессах флотации. **Используемые методы.** Разработан метод и установка для измерения размера пузырьков в условиях, моделирующих режим паровоздушной флотации. **Новизна.** Обосновано, что размер пузырька может быть определен по объему газовой фазы, отнесенной к числу индукционных сигналов, вызванных движением паровоздушного пузырька («немагнитной дырки») вдоль витков катушек индуктивности в магнитной жидкости, квазиутяжеленной внешним неоднородным магнитным полем. Величина самого индукционного сигнала зависит от размера паровоздушного пузырька. **Результат.** Экспериментально установлено, что при увеличении температуры на границе раздела фаз газ-жидкость за счет теплоты конденсации водяного пара размер пузырьков уменьшается в 2-2,5 раза. Разработана технология обогащения золотосодержащих руд, отличительной особенностью которой является выделение черного концентрата в «три приема» с использованием режима аэрации пульпы паровоздушной смесью в течение короткого времени (15-25% от общего). Натурные эксперименты выполнены на руде Олимпиадинского месторождения. **Практическая значимость.** При использовании разработанной технологии прирост извлечения золота составил 2,72% (за счет уменьшения содержания золота в хвостах от 0,514 до 0,409 г/т) при увеличении качества концентрата от 72,94 до 97,07 г/т. Важным преимуществом новой технологии является уменьшение на 24,9 отн. % выхода концентрата, направляемого на дорогостоящую гидрометаллургическую переработку.

Ключевые слова: руда, золото, флотация, струйная схема, паровоздушная смесь, размер пузырька, измерение, магнитная жидкость, показатели флотации

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках соглашения № 23-27-00093 «Теоретическое и экспериментальное обоснование механизма поверхностных сил в процессах коагуляции и флотации в условиях теплового воздействия на смачивающие пленки для создания и промышленного освоения технологических процессов эффективного извлечения микродисперсией золота из руд и россыпей».

© Евдокимов С.И., Герасименко Т.Е., Горлова О.Е., Орехова Н.Н., 2024

Для цитирования

Разработка метода и установки для измерения размера пузырьков в условиях, моделирующих режим паровоздушной флотации / Евдокимов С.И., Герасименко Т.Е., Горлова О.Е., Орехова Н.Н. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №3. С. 33-42. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-33-42>



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

DEVELOPMENT OF A BUBBLE SIZE MEASUREMENT METHOD AND SYSTEM UNDER CONDITIONS SIMULATING THE VAPOR-AIR FLOTATION MODE

Evdokimov S.I.¹, Gerasimenko T.E.¹, Gorlova O.E.^{2,3}, Orekhova N.N.³

¹ North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia

² Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

³ Melnikov Institute of Comprehensive Subsoil Development, the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The research is aimed at improving the selectivity of mineral separation by a flotation method and increasing the completeness of recovery of a valuable component due to new methods of flotation chart design and a pulp aeration mode. **Objectives.** The article presents the study on changes in the size of vapor-air bubbles at their sudden contact with cold liquid in flotation processes. **Methods Applied.** The authors developed a bubble size measurement method and system under conditions simulating the vapor-air flotation mode. **Originality.** The article contains the rationale describing that the size of a bubble can be determined by the volume of the gas phase related to the number of induction signals caused by the motion of a vapor-air bubble (“nonmagnetic hole”) along the turns of inductance coils in a magnetic liquid made quasi-heavy by an external inhomogeneous magnetic field. The value of the induction signal depends on the size of the vapor-air bubble. **Result.** It has been experimentally established that with increasing temperature at the gas-liquid interface due to the heat of condensation of water vapor, the size of bubbles decreases by 2.0-2.5 times. The authors developed technology of gold-bearing ore enrichment, whose distinctive feature was the separation of a rough concentrate in “three steps” using the mode of pulp aeration with a vapor-air mixture for a short time (15-25% of the total period). Field experiments were performed on ore from the Olimpiada deposit. **Practical Relevance.** Using the developed technology, the increase in gold recovery was 2.72 % (due to the reduction of gold content in tailings from 0.514 to 0.409 g/t) with an increase in the concentrate quality from 72.94 to 97.07 g/t. An important advantage of the new technology is a 24.9% reduction in the relative yield of the concentrate supplied for expensive hydrometallurgical processing.

Keywords: ore, gold, flotation, jetting scheme, vapor-air mixture, bubble size, measurement, magnetic fluid, flotation performance

Acknowledgments: *The study was supported by the Russian Science Foundation under agreement No.23-27-00093 “Theoretical and experimental substantiation of the mechanism of surface forces in the processes of coagulation and flotation under conditions of the thermal action on wetting films for designing and industrial development of technological processes for the efficient extraction of gold microdispersions from ores and placers”.*

For citation

Evdokimov S.I., Gerasimenko T.E., Gorlova O.E., Orekhova N.N. Development of a Bubble Size Measurement Method and System Under Conditions Simulating the Vapor-Air Flotation Mode. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 3, pp. 33-42. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-33-42>

Введение

При флотации взаимодействие минералов с жидкой фазой пульпы заключается в образовании на их поверхности пленок жидкости [1-5]. В пленках различные параметры структуры жидкости отличаются от объемных значений [6-8]. Изменения структуры жидкости являются причиной появления сил, которые могут быть как силами отталкивания (в случае гидрофильных поверхностей), так и силами гидрофобного притяжения; закон их изменения близок к экспоненциальному [9-11]. Только за пределами радиуса действия поверхностных сил жидкость приобретает свойства изотропной объемной фазы [12-16]. Дальнейшее действие сил гидрофобного притяжения объясняется образованием между поверхностями термодинамически устойчивых микрополостей, заполненных парами несущей жидкости [17-20]. Присутствием

газовых зародышей объясняют пониженную, по сравнению с объемной, плотность воды в граничном слое жидкости [21-24].

Гидрофобное притяжение – процесс эндотермический. Всякое нарушение гидрофобного взаимодействия будет процессом экзотермическим, который будет увеличиваться с ростом температуры. Экзотермичность же является следствием увеличения концентрации молекул, не соединенных водородными связями (по Немети и Шерага, Грьетгейму и Круг-Мое [25, 26]), движения молекул в процессе разрыва водородных связей из кристаллической решетки в полости (по Самойлову, Дэнфорду и Леви [25, 26]), сближения ближайших соседей молекулы за счет изгиба водородных связей (по Поплу [25, 26]).

В граничных слоях пузырьков плотность воды понижена, а диполи воды ориентированы параллель-

но поверхности, как и в граничных слоях типично гидрофобных твердых поверхностей [27, 28]. Следовательно, для изменения результата флотации достаточно увеличить температуру воды в граничных слоях пузырьков, внутри которых локализовано действие поверхностных сил (от 1 до 65 нм) [29, 30]. С этой целью в настоящей работе воздух, подаваемый во флотомашину для аэрации пульпы, смешивают с горячим ($> 104^{\circ}\text{C}$) водяным паром.

Целью работы является исследование изменения размера пузырьков при их заполнении горячим водяным паром и влияние этого эффекта на технологические показатели флотации золотосодержащих руд.

Теоретические положения

Размер пузырька измеряли по объему газовой фазы, отнесенной к числу индукционных сигналов, вызванных движением паровоздушной смеси вдоль витков катушек индуктивности в квазиутяжеленной внешним неоднородным магнитным полем магнитной жидкости (рис. 1). Величина самого индукционного сигнала зависит от размера паровоздушного пузырька – «немагнитной дырки» в объеме ферромагнитной жидкости.

На немагнитную частицу в магнитной жидкости действует магнитная пондеромоторная сила \vec{F} , описываемая формулой Розенцвейга:

$$\vec{F} = -\mu_0 \oint_S \left(\int_0^H M(H') dH' \right) \vec{n} dS - \mu_0 \oint_S \frac{M_n^2}{2} \vec{n} dS, \quad (1)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная постоянная, Гн/м; S – поверхность тела; H – напряженность магнитного поля, А/м; M – намагниченность магнитной жидкости, А/м; \vec{n} – вектор нормали к поверхности тела S ; $M_n = \vec{M} \cdot \vec{n}$.

Для магнитной пондеромоторной силы \vec{F} в неоднородном магнитном поле

$$\vec{F} = \text{grad} (\vec{\rho}_m \cdot \vec{B}), \quad (2)$$

или с учетом того, что при $V \rightarrow 0$

$$\vec{J} = \lim \left(\frac{\vec{\rho}_m}{V} \right). \quad (3)$$

Получим

$$\vec{F} = \text{grad} (\vec{J} \cdot \vec{B}), \quad (4)$$

где $\vec{\rho}_m$ – магнитный момент частицы, Дж/Тл; \vec{B} – магнитная индукция, Тл; \vec{J} – вектор намагниченности, А/м.

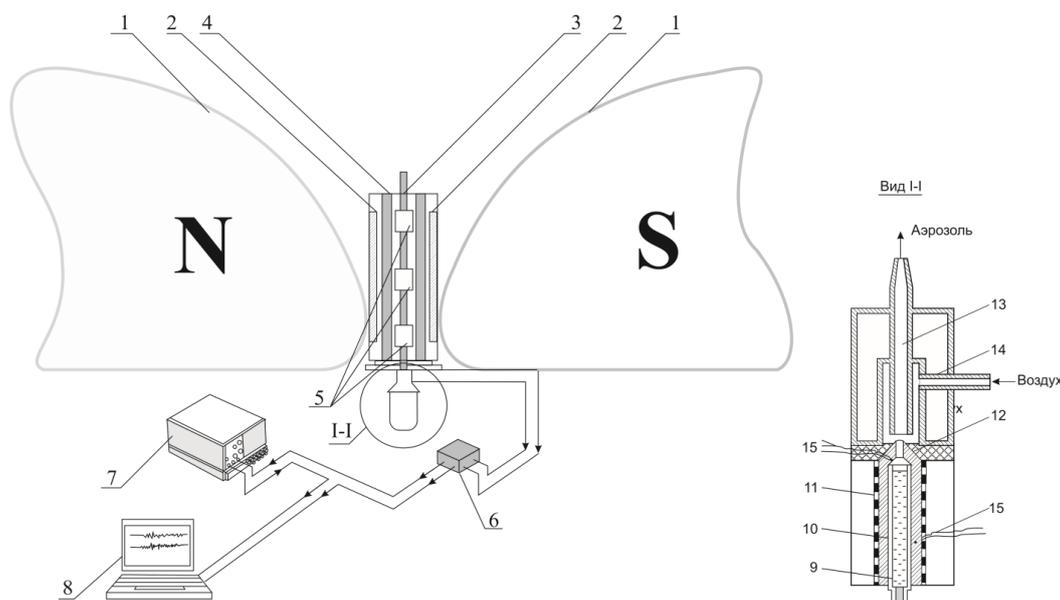


Рис. 1. Измерительная система: 1 – полюсные наконечники магнитопровода электромагнитной системы; 2 – металлические вставки; 3 – стеклянная трубка с ферромагнитной жидкостью и системой катушек индуктивности; 4 – ферромагнитная жидкость; 5 – катушки индуктивности; 6, 7 – усилитель сигнала с цифровым осциллографом; 8 – компьютер; 9 – патрон; 10 – медная трубка ($\varnothing 10$ мм); 11 – нагреватель; 12 – канал ($\varnothing 1,4$ мм); 13 – камера смешения с соплом; 14 – штуцер; 15 – термопара

Fig. 1. A measurement system: 1 is pole tips of the magnetic conductor of the electromagnetic system; 2 are metallic inserts; 3 is a glass tube with ferromagnetic liquid and a system of inductance coils; 4 is ferromagnetic liquid; 5 is inductance coils; 6, 7 is a signal amplifier and a digital oscilloscope; 8 is a computer; 9 is a holder; 10 is a copper tube ($\varnothing 10$ mm); 11 is a heater; 12 is a channel ($\varnothing 1.4$ mm); 13 is a mixing chamber with a nozzle; 14 is a coupling; 15 is a thermocouple

При совпадении по направлению вектора напряженности магнитного поля \vec{H} и вектора намагниченности \vec{J} имеем

$$\vec{F} = \vec{F}_x + \vec{F}_y = J_s \left(\frac{\partial B_x}{\partial x} \cos \beta + \frac{\partial B_y}{\partial x} \sin \beta \right) \vec{i} + J_s \left(\frac{\partial B_x}{\partial y} \cos \beta + \frac{\partial B_y}{\partial y} \sin \beta \right) \vec{j}, \quad (5)$$

где β – угол между осью Ox и вектором магнитной индукции \vec{B} .

Следствием появления в объеме ферромагнитной жидкости паровоздушного пузырька – «дырки» – является искажение начального магнитного потока, а движение немагнитного включения – индукционного сигнала в катушках. Индуцированный в катушках ток вызывал на осциллограмме периодические всплески, частота появления которых соответствовала числу, а амплитуда – размеру пузырька.

Материалы и оборудование

Измерения в ферромагнитной жидкости выполнены с использованием электромагнитной системы сепаратора ФГС-40 (рис. 2).

В работе использованы образцы магнитной жидкости, синтезированной на основе наномagnetита, полученного методом гетерогенной химической конденсации (по Зигмонди) – путем увеличения надмолекулярного размера устойчивых центров конденсации до 7-10 нм (с соблюдением правила Веймарна). Его агрегативную устойчивость обеспечивали методом Флер-Ликлема, добавляя к наномagnetиту с незащищенной стабилизатором поверхностью наномagnetит с двойным избытком стабилизатора на поверхности (табл. 1).

Таблица 1. Физические параметры магнитной жидкости типа наномagnetит+керосин (ТС-1)+олеиновая кислота
Table 1. Physical parameters of magnetic liquid consisting of nano-magnetite +kerosene (ТС-1)+oleic acid

Магнитные и физико-химические свойства	
Плотность, г/см ³	1,4
Концентрация частиц:	
об. %	12
м ⁻¹	1,61 · 10 ²³
Намагниченность насыщения, кА/м	50,7
Начальная магнитная восприимчивость	6,1
Динамическая вязкость, мПа·с	27,3

Результаты исследования намагниченности наномagnetита, полученного методом гетерогенной химической конденсации, приведены на рис. 3.

Конструкция устройства для генерации паровоздушного пузырька в ферромагнитной жидкости (см. рис. 1, вид I-I) моделирует работу форсунки, в которой рабочий поток пара инжектирует поток воздуха с образованием пузырьков, заполненных горячим водяным паром. В устройстве наполненный водой патрон 9 из нержавеющей стали вставлен в толстостенную (с толщиной стенки 4 мм) медную трубку 10 с внутренним диаметром 10 мм. Медная трубка внутри с наполненным водой патроном помещена в нагреватель 11. Через канал 12 диаметром 1,4 мм поток пара из патрона 9 поступает в камеру смешения с соплом 13; патрон 9 и камера смешения 13 установлены соосно с зазором в 2 мм. Через штуцер 14 в этот зазор в камеру смешения 13 поступает воздух. Циркулирующей воды от термостата типа U-10 осуществляют термостатирование (с контролем температуры термopарами 15) камеры смешения 13.

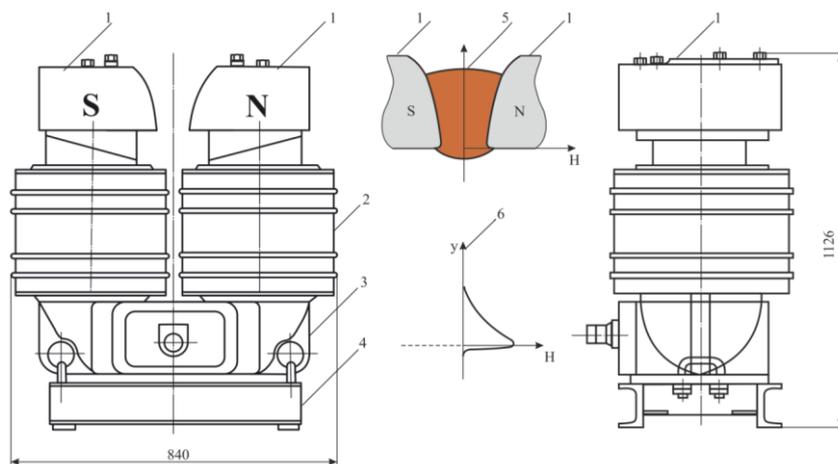


Рис. 2. Магнитогравиметрический сепаратор: 1 – полюсные наконечники с катушками возбуждения 2 и магнитопроводом 3 на раме 4; 5 – слой ферромагнитной жидкости; 6 – изменение напряженности магнитного поля по высоте слоя ферромагнитной жидкости

Fig. 2. A magnetic gravity separator: 1 is pole tips with excitation coils 2 and magnetic conductor 3 on frame 4; 5 is a layer of ferromagnetic liquid, 6 is change in magnetic field strength along the height of the ferromagnetic liquid layer

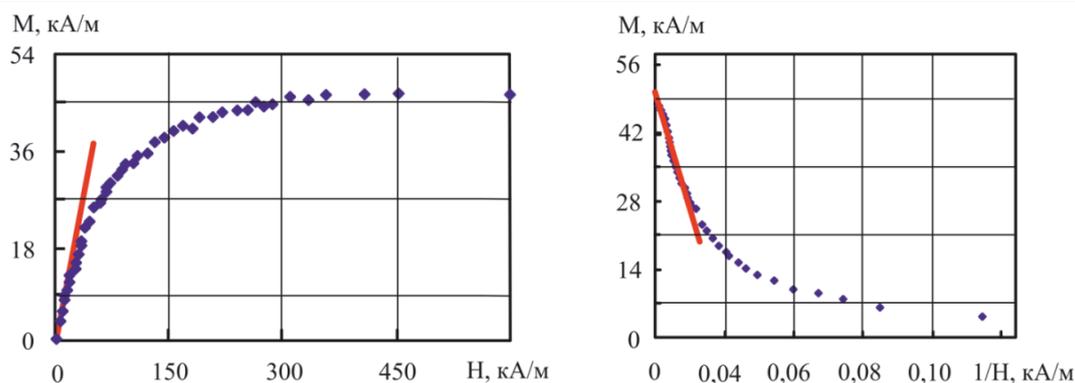


Рис. 3. Кривые намагничивания магнитной жидкости от напряженности магнитного поля
Fig. 3. Magnetization curves of magnetic liquid from magnetic field strength

Пневмосистема для подачи воздуха приведена на **рис. 4**. Сжатый воздух в сатурационную колонку 8 (с фильтром Шотта № 4 тонкой очистки 6 и резиновой манжетой 7) попадает из баллона 1 через редуктор высокого давления 2, фильтр ФВ-2 грубой очистки 3 и редуктор РДВ-2 низкого давления 4. Слянки Дрекселя 9 и 12 предусмотрены для каплеулавливания и возможных выбросов воды из сатуратора 8 и газового реометра 11. Зажим Мора 5 служит для предотвращения попадания капельного уноса из сатуратора 8 в систему механизмов 1-4 и вместе с регулируемым зажимом 10 сглаживает пульсации давления. Стеклоплавные краны 14 и 15 предназначены для выравнивания сопротивления в пневмосистеме и генераторе пузырьков.

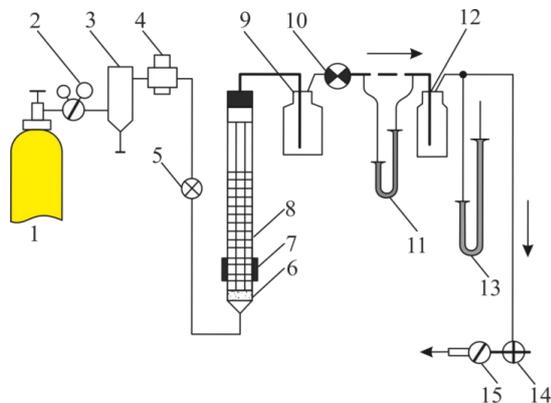


Рис. 4. Пневмосистема для подачи воздуха
Fig. 4. Air supply pneumatic system

Результаты и их обсуждение

На **рис. 5** приведена осциллограмма, полученная при барботировании ферромагнитной жидкости пузырьками, заполненными паровоздушной смесью с температурой 95°C.

На **рис. 6** приведены гистограммы, полученные при барботировании ферромагнитной жидкости пузырьками воздуха, заполненными паром с температурой 20°C (а) и 104°C (б).

Влияние увеличения температуры пара проявляется в уменьшении размера пузырька при его внезапном контакте с холодной жидкостью.

Эффективность разрабатываемой технологии оценена по результатам флотации сульфидных руд Олимпиадинского месторождения (с содержанием 3,10 г/т Au). При определении рациональных расходов флотационных реагентов использовали метод планирования эксперимента и результаты предыдущих исследований [31-35].

Базовая схема флотации руд включала цикл флотации первичной руды и цикл флотации промпродуктов. Первый цикл состоял из операции основной флотации с двумя перемычками выделенного черного концентрата, а также две операции контрольной флотации на хвостах основной операции флотации. Дофлотацию золота осуществляли из промпродукта, составленного из хвостов I перемычки и концентрата I контрольной флотации. В результате при выходе концентрата 3,57% с содержанием золота 72,94 г/т в него извлечено 84,0% металла.

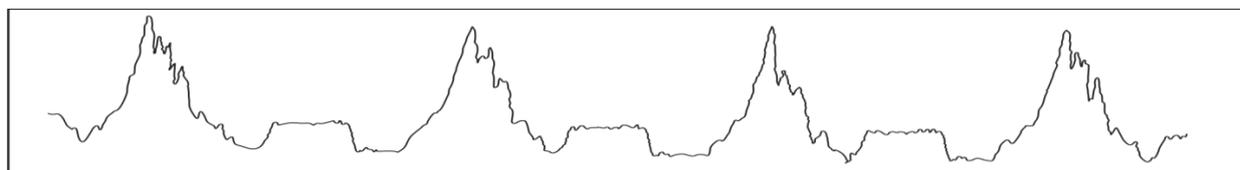


Рис. 5. Характерные всплески на осциллограмме, вызванные током, индуцированным в измерительных катушках при появлении паровоздушного пузырька в объеме ферромагнитной жидкости
Fig. 5. Characteristic bursts on the oscillogram caused by current induced in the measuring coils by a vapor-air bubble in the volume of ferromagnetic liquid

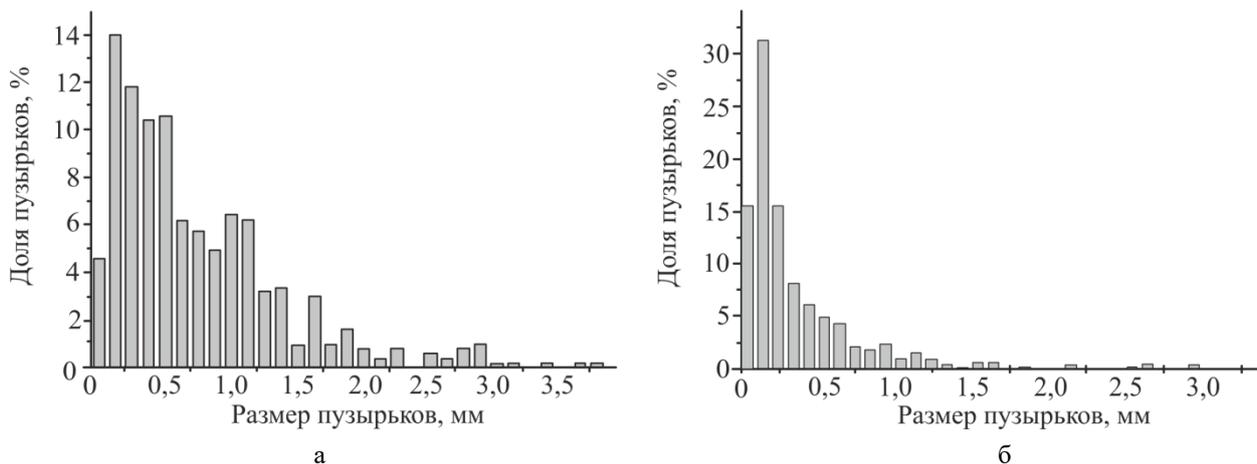


Рис. 6. Гистограммы распределения пузырьков по крупности
Fig. 6. Histograms of a bubble size distribution

Увеличение содержания золота в питании флотации добивались путем струйного противоточного движения черного концентрата и исходного питания. Уменьшение доли крупных пузырьков получено за счет перехода от аэрации пульпы воздухом к паровоздушной флотации. Качественно-количественная схема цикла основной флотации приведена на рис. 7.

В цикле основной флотации при выделении черного концентрата по схеме струйной флотации в режиме аэрации пульпы паровоздушной смесью операционное извлечение золота увеличилось от 76,27 отн. % (I струя флотации) до 91,36 отн. % (III струя флотации).

После отработки реagentного режима операции основной флотации поставлен опыт, моделирующий замкнутый цикл процесса (из 7 параллельных навесок руды). Установлено, что при переходе на технологию с выделением черного концентрата в «три приема» (см. рис. 7) прирост извлечения золота в готовый концентрат составил 2,72 % (содержание золота в хвостах уменьшилось от 0,514 до 0,409 г/т) при увеличении качества концентрата от 72,94 до 97,07 г/т. Важным технологическим эффектом от использования новой технологии является уменьшение на 24,9 отн. % выхода концентрата.

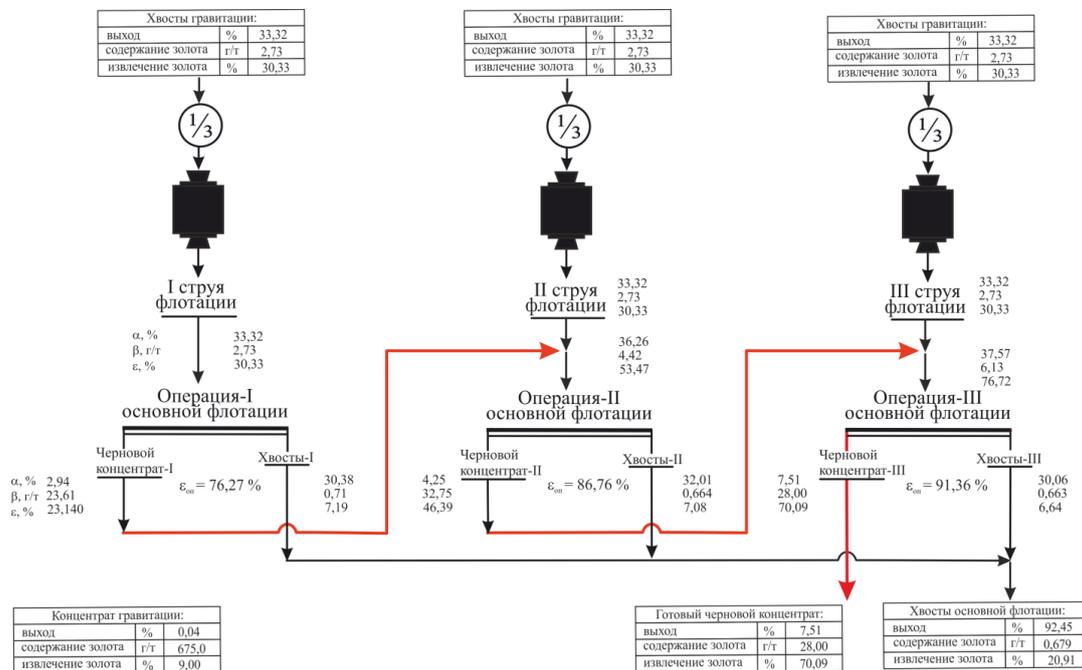


Рис. 7. Результаты выделения черного концентрата при флотации руд Олимпиадинского месторождения по схеме струйной флотации в режиме аэрации пульпы паровоздушной смесью

Fig. 7. Results of the rough concentrate separation at flotation of ores of the Olimpiada deposit according to the chart of the jet flotation and in the mode of pulp aeration with a vapor-air mixture

Заключение

Для изменения результата флотации достаточно увеличить температуру воды в граничных слоях пузырьков, внутри которых локализовано действие поверхностных сил. В настоящей работе температуру воды в граничных слоях пузырьков повышали за счет теплоты конденсации горячего водяного пара. Для этого воздух, подаваемый (нагнетаемый воздуходувкой или засасываемый блоком-импеллером) во флотомашину для аэрации пульпы, смешивают с водяным паром ($>104^{\circ}\text{C}$). При внезапном контакте с холодной пульпой пар в пузырьке конденсируется, и теплота конденсации за счет высокой теплопроводности воды в течение короткого промежутка времени отводится через границу раздела фаз газ-жидкость, затрачиваясь на нагрев воды в граничном слое пузырька.

Обосновано, что размер пузырька воздуха может быть определен по величине индукционного сигнала, появляющегося при пересечении им магнитного потока. Разработана установка и проведено измерение размера пузырька воздуха, заполненного водяным паром и всплывающего в магнитной жидкости вдоль индукционных катушек. Экспериментально установлено, что при увеличении температуры на границе раздела фаз газ-жидкость за счет теплоты конденсации водяного пара размер пузырьков уменьшается в 2-2,5 раза.

Натурные испытания разработанной технологии выполнены на пробе первичной (сульфидной) руды Олимпиадинского месторождения. Из результатов опыта, моделирующего замкнутый цикл процесса флотации (7 параллельных навесок руды), следует, что при выделении черного концентрата по схеме струйной флотации в режиме аэрации пульпы паровоздушной смесью технологическим эффектом является уменьшение на 24,9 отн. % выхода концентрата за счет увеличения содержания в нем золота от 72,94 до 97,07 г/т. Содержание золота в хвостах флотации уменьшилось от 0,514 до 0,409 г/т, что соответствует приросту извлечения золота в концентрат на 2,72 абс. %.

Список источников

- Enhancing flotation separation of fine copper oxide from silica by microbubble assisted hydrophobic aggregation / Long Q., Wang H., Jiang F., Tan W., Xu Z. // *Minerals Engineering*. 2022, vol. 189, article 107863.
- Агеев А.И., Осипцов А.Н. Макро- и микрогидродинамика вязкой жидкости вблизи супергидрофобной поверхности // *Коллоидный журнал*. 2022. Т. 84. №4. С. 380-395.
- Товбин Ю.К. Линейное и поверхностное натяжения в области контактного угла трехагрегатной системы и время релаксации // *Журнал физической химии*. 2020. Т. 94. №8. С. 1131-1142.
- Кондратьев С.А., Мошкин Н.П. Поведение флотационного комплекса «минеральная частица-пузырек» в слабовязкой жидкости в процессе флотации // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2024. №1. С. 143-154.
- Единый подход к расклинивающему давлению в жидких и паровых прослойках в рамках метода функционала плотности / Щекин А.К., Гоства Л.А., Лебедева Т.С., Татьяненко Д.В. // *Коллоидный Журнал*. 2021. Т. 83. №2. С. 235-241.
- Teisala H., Butt H.J. Hierarchical structures for superhydrophobic and superoleophobic surfaces // *Langmuir: the ACS journal of surfaces and colloids*. 2019, vol. 35, no. 33, pp. 10689-10703.
- Оценка протяженности граничных слоев воды у поверхности частиц монодисперсного золя кремнезема в 0,15 М растворе NaCl при различных значениях pH / Голикова Е.В., Чернобережский Ю.М., Молодкина Л.М., Кузьмин В.Д. // *Коллоидный журнал*. 2018. Т. 80. №4. С. 387-398.
- Есипова Н.Е., Ицков С.В., Соболев В.Д. Гистерезис краевого угла на твердых кристаллических поверхностях // *Коллоидный журнал*. 2023. Т. 85. №2. С. 158-166.
- Nikolov A., Lee J., Wasan D. DLVO surface forces in liquid films and statistical mechanics of colloidal oscillatory structural forces in dispersion stability // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2023, vol. 313, article 102847.
- Емельяненко К.А., Емельяненко А.М., Бойнович Л.Б. Обзор современного состояния исследований адгезионных явлений на границах твердых тел с твердыми и жидкими водными средами // *Коллоидный журнал*. 2022. Т. 84. №3. С. 274-300.
- Gomez-Flores A., Solongo S.K., Heyes G.W. Bubble-particle interaction with hydrodynamics, XDLVO theory, and surface roughness for flotation in an agitated tank using CFD simulations // *Minerals Engineering*. 2020, vol. 152, article 106368.
- Unraveling the hydrophobic interaction mechanisms of hydrocarbon and fluorinated surfaces / Gong L., Wu F., Yang W., Huang C., Li W., Wang X., Wang J., Tang T., Zeng H. // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2023, vol. 635, pp. 273-283.
- Surface interaction mechanisms in mineral flotation: Fundamentals, measurements, and perspectives / Xie L., Wang J., Lu Q., Hu W., Zeng H. // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2021, vol. 295, article 102491.
- Guo H., Kovscek A.R. Investigation of the effects of ions on short-range non-DLVO forces at the calcite/brine interface and implications for low salinity oil-recovery processes // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2019, vol. 552, pp. 295-311.
- A review of non-DLVO interactions in environmental colloidal systems / Grasso D., Subramaniam K., Butkus M., Strevett K., Bergendahl J. // *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*. 2002, vol. 1, pp. 17-38.
- Bal V. Stability characteristics of nanoparticles in a laminar linear shear flow in the presence of DLVO and non-

- DLVO forces // *Langmuir: the ACS journal of surfaces and colloids*. 2019, vol. 35, no. 34, pp. 11175-11187.
17. Simonsen A.C., Hansen P.L., Klosgen B. Nanobubbles give evidence of incomplete wetting at a hydrophobic interface // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2004, vol. 73, pp. 291-299.
 18. Hampton M.A., Nguyen A.V. Nanobubbles and the nanobubble bridging capillary force // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2010, vol. 154, iss. 1-2, pp. 30-55.
 19. Danov K.D., Kralchevsky P.A. Capillary forces between particles at a liquid interface: General theoretical approach and interactions between capillary // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2010, vol. 154, no. 1-2, pp. 91-103.
 20. Jialin Wang J., Yoon R.-H., Morris J. AFM surface measurements conducted between gold surface treated in xanthate solutions // *International Journal of Mineral Processing*. 2013, vol. 122, pp. 13-21.
 21. Interaction force between an air bubble and a hydrophilic spherical particle in water, measured by the colloid probe technique / Englert A.H., Krasowska M., Formasiero D., Raiston J., Rubio J. // *International Journal of Mineral Processing*. 2009, vol. 92, no. 3-4, pp. 121-127.
 22. Attraction between hydrophobic surfaces studied by atomic force microscopy / Nguyen A., Nalaskowski J., Miuller J.D., Butt H.-J. // *International Journal of Mineral Processing*. 2003, vol. 72, iss. 1-4, pp. 215-225.
 23. Surface nanobubbles on the rare earth fluorocarbonate mineral synchysite / Owens C.L., Schachb E., Heinigb T., Rudolphb M., Nasha G.R. // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2019, vol. 552, pp. 66-71.
 24. Aqueous dispersions of nanobubbles: Generation, properties and feature / Azevedo A., Etchepare R., Calgaroto S., Rubio J. // *Minerals Engineering*. 2016, vol. 94, pp. 29-37.
 25. Interfacial water structure and the wetting of mineral surfaces / Miller J.D., Wang X., Jin J., Shrimali K. // *International Journal of Mineral Processing*. 2016, vol. 156, pp. 62-68.
 26. Unusual properties of water at hydrophilic/hydrophobic interfaces / Gunko V.M., Turov V.V., Bogatyrov V.M., Zarko V.I., Chuiko A.A. // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2005, vol. 118, iss. 1-3, pp. 125-172.
 27. Smith A.M., Borkovec M., Trefalt G. Forces between solid surfaces in aqueous electrolyte solutions // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2020, vol. 275, 102078.
 28. Studying flotation of gold microdispersions with carrier minerals and pulp aeration with a steam-air mixture / Evdokimov S.I., Golikov N.S., Pryalukhin A.F., Kondratiev V.V., Mishedchenko A., Kuzina A.V., Bryukhanova N.N., Karlina A.I. // *Minerals*. 2024, vol. 14, no. 1, pp. 108.
 29. Studying the flotation of gold-bearing ores using carrier minerals / Evdokimov S.I., Golikov N.S., Zadkov D.A., Voitovich E.V., Kondratiev V.V., Petrovskiy A.A., Konyukhov V.Y., Gladkikh V.A. // *Minerals*. 2024, vol. 14, no. 1, pp. 88.
 30. Механизм коагуляции в условиях флотации микродисперсий золота минералами-носителями / Евдокимов С.И., Гусева Е.А., Константинова М.В., Вайтекунене Е.Л., Филюшина Е.В. // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2023. №11-1. С. 190-206.
 31. Поисковые исследования собирателя для повышения извлечения золота в медном цикле флотации колчеданных и порфириновых руд / Сабанова М.Н., Леонтьева Е.В., Орехова Н.Н., Горлова О.Е. // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2020. №4. С. 239-249.
 32. Повышение полноты извлечения золота из лежащих отходов переработки золотосодержащих руд / Горлова О.Е., Шадрунова И.В., Жилина В.А., Чекушина Т.В. // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2020. №1. С. 193-210. DOI: 10.46689/2218-5194-2020-1-1-193-210
 33. Влияние реагентов на основе диалкилдитиофосфатов на флотацию меди из пиритсодержащих шлаков / Сабанова М.Н., Орехова Н.Н., Горлова О.Е., Глаголева И.В. // *Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия*. 2018. №4. С. 4-14. DOI: 10.17073/0021-3438-2018-4-4-14
 34. Заварухина Е.А., Орехова Н.Н. Влияние дополнительного собирателя на селективность флотационного разделения сульфидов меди и цинка // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2017. №3. С. 305-311.
 35. Чантурия В.А., Шадрунова И.В., Горлова О.Е. Инновационные процессы глубокой и экологически безопасной переработки техногенного сырья в условиях новых экономических вызовов // *Устойчивое развитие горных территорий*. 2021. Т. 13. №2(48). С. 224-237. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-2-224-237

References

1. Long Q., Wang H., Jiang F., Tan W., Xu Z. Enhancing flotation separation of fine copper oxide from silica by microbubble assisted hydrophobic aggregation. *Minerals Engineering*. 2022;189:Article ID 107863.
2. Ageev A.I., Osiptsov A.N. Macro- and microhydrodynamics of viscous liquid near a superhydrophobic surface. *Kolloidnyi zhurnal [Colloid Journal]*. 2022;84(4):380-395. (In Russ.)
3. Tovbin Yu.K. Linear and surface tension in the contact angle region of a three-aggregate system and relaxation time. *Zhurnal fizicheskoy khimii [Journal of Physical Chemistry]*. 2020;94(8):1131-1142. (In Russ.)
4. Kondratyev S.A., Moshkin N.P. Behavior of the flotation complex "mineral particle-bubble" in low viscosity liquid in the process of flotation. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh [Physical and Technical Problems of*

- Mineral Resources Development]. 2024;(1):143-154. (In Russ.)
5. Shchekin A.K., Gostva L.A., Lebedeva T.S., Tatyankin D.V. A unified approach to disjoining pressure in liquid and vapor interlayers in the framework of the density functional method. *Kolloidnyi zhurnal* [Colloid Journal]. 2021;83(2):235-241. (In Russ.)
 6. Teisala H., Butt H.J. Hierarchical structures for superhydrophobic and superoleophobic surfaces. *Langmuir: the ACS Journal of Surfaces and Colloids*. 2019;35(33):10689-10703.
 7. Golikova E.V., Chernoberezhskiy Yu.M., Molodkina L.M., Kuzmin V.D. Assessment of the extent of water boundary layers near the surface of particles of monodisperse silica sol in 0.15 M NaCl solution at different pH values. *Kolloidnyi zhurnal* [Colloid Journal]. 2018;80(4):387-398. (In Russ.)
 8. Esipova N.E., Itskov S.V., Sobolev V.D. Edge angle hysteresis on solid crystalline surfaces. *Kolloidnyi zhurnal* [Colloid Journal]. 2023;85(2):158-166. (In Russ.)
 9. Nikolov A., Lee J., Wasan D. DLVO surface forces in liquid films and statistical mechanics of colloidal oscillatory structural forces in dispersion stability. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2023;313:Article ID 102847.
 10. Emelyanenko K.A., Emelyanenko A.M., Boinovich L.B. Review of the current state of research on the adhesion phenomena on the boundaries of solids with solid and liquid aqueous media. *Kolloidnyi zhurnal* [Colloid Journal]. 2022;84(3):274-300. (In Russ.)
 11. Gomez-Flores A., Solongo S.K., Heyes G.W. Bubble-particle interaction with hydrodynamics, XDLVO theory, and surface roughness for flotation in an agitated tank using CFD simulations. *Minerals Engineering*. 2020;152:Article ID 106368.
 12. Gong L., Wu F., Yang W., Huang C., Li W., Wang X., Wang J., Tang T., Zeng H. Unraveling the hydrophobic interaction mechanisms of hydrocarbon and fluorinated surfaces. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2023;635:273-283.
 13. Xie L., Wang J., Lu Q., Hu W., Zeng H. Surface interaction mechanisms in mineral flotation: Fundamentals, measurements, and perspectives. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2021;295:Article ID 102491.
 14. Guo H., Kovscek A.R. Investigation of the effects of ions on short-range non-DLVO forces at the calcite/brine interface and implications for low salinity oil-recovery processes. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2019;552:295-311.
 15. Grasso D., Subramaniam K., Butkus M., Strevett K., Bergendahl J. A review of non-DLVO interactions in environmental colloidal systems. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*. 2002;1:17-38.
 16. Bal V. Stability characteristics of nanoparticles in a laminar linear shear flow in the presence of DLVO and non-DLVO forces. *Langmuir: the ACS Journal of Surfaces and Colloids*. 2019;35(34):11175-11187.
 17. Simonsen A.C., Hansen P.L., Klossen B. Nanobubbles give evidence of incomplete wetting at a hydrophobic interface. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2004;73:291-299.
 18. Hampton M.A., Nguyen A.V. Nanobubbles and the nanobubble bridging capillary force. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2010;154(1-2):30-55.
 19. Danov K.D., Kralchevsky P.A. Capillary forces between particles at a liquid interface: General theoretical approach and interactions between capillary. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2010;154(1-2):91-103.
 20. Jialin Wang J., Yoon R-H., Morris J. AFM surface force measurements conducted between gold surfaces treated in xanthate solutions. *International Journal of Mineral Processing*. 2013;122:13-21.
 21. Englert A.H., Krasowska M., Formasiero D., Raiston J., Rubio J. Interaction force between an air bubble and a hydrophilic spherical particle in water, measured by the colloid probe technique. *International Journal of Mineral Processing*. 2009;92(3-4):121-127.
 22. Nguyen A., Nalaskowski J., Miuller J.D., Butt H.-J. Attraction between hydrophobic surfaces studied by atomic force microscopy. *International Journal of Mineral Processing*. 2003;72(1-4):215-225.
 23. Owens C.L., Schachb E., Heinigb T., Rudolphb M., Nasha G.R. Surface nanobubbles on the rare earth fluorocarbonate mineral synchysite. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2019;552:66-71.
 24. Azevedo A., Etchepare R., Calgaroto S., Rubio J. Aqueous dispersions of nanobubbles: Generation, properties and feature. *Minerals Engineering*. 2016;94:29-37.
 25. Miller J.D., Wang X., Jin J., Shrimali K. Interfacial water structure and the wetting of mineral surfaces. *International Journal of Mineral Processing*. 2016;156:62-68.
 26. Gunko V.M., Turov V.V., Bogatyrov V.M., Zarko V.I., Chuiko A.A. Unusual properties of water at hydrophilic/hydrophobic interfaces. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2005;118(1-3):125-172.
 27. Smith A.M., Borkovec M., Trefalt G. Forces between solid surfaces in aqueous electrolyte solutions. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2020;275:Article ID 102078.
 28. Evdokimov S.I., Golikov N.S., Pryalukhin A.F., Kondratiev V.V., Mishedchenko A., Kuzina A.V., Bryukhanova N.N., Karlina A.I. Studying flotation of gold microdispersions with carrier minerals and pulp aeration with a steam-air mixture. *Minerals*. 2024;14(1):Article ID 108.
 29. Evdokimov S.I., Golikov N.S., Zadkov D.A., Voitovich E.V., Kondratiev V.V., Petrovskiy A.A., Konnyukhov V.Y., Gladkikh V.A. Studying the flotation of gold-bearing ores using carrier minerals. *Minerals*. 2024;14(1):Article ID 88.

30. Evdokimov S.I., Guseva E.A., Konstantinova M.V., Vaitekunene E.L., Filyushina E.V. Mechanism of coagulation under flotation of gold microdispersions with carrier minerals. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tehnichesky zhurnal)* [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. 2023;(11-1):190-206. (In Russ.)
31. Sabanova M.N., Leontieva E.V., Orekhova N.N., Gorlova O.E. Search studies of the collector to increase gold recovery in the copper flotation cycle of flotation of cuprous and porphyry ores. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle* [Proceedings of Tula State University. Earth Sciences]. 2020;(4):239-249. (In Russ.)
32. Gorlova O.E., Shadrinova I.V., Zhilina V.A., Cherkushina T.V. Increasing the completeness of gold recovery from stale waste of processing gold-containing ore. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle* [Proceedings of Tula State University. Earth Sciences]. 2020;(1):193-210. (In Russ.) DOI: 10.46689/2218-5194-2020-1-1-193-210
33. Sabanova M.N., Orekhova N.N., Gorlova O.E., Glagoleva I.V. Influence of reagents based on dialkyl dithiophosphates on the flotation of copper from pyrite-containing slags. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tsvetnaya metallurgiya* [News of Higher Educational Institutions. Non-Ferrous Metallurgy]. 2018;(4):4-14. (In Russ.) DOI: 10.17073/0021-3438-2018-4-4-14
34. Zavarukhina E.A., Orekhova N.N. Influence of an additional collector on the selectivity of the flotation separation of copper and zinc sulfides. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tehnichesky zhurnal)* [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. 2017;(3):305-311. (In Russ.)
35. Chanturiya V.A., Shadrinova I.V., Gorlova O.E. Innovative processes of deep and environmentally safe processing of man-caused raw materials under the conditions of new economic challenges. *Ustoychivoe razvitiye gornyykh territoriy* [Sustainable Development of Mountain Territories]. 2021;13(2(48)):224-237. (In Russ.) DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-2-224-237

Поступила 25.04.2024; принята к публикации 06.06.2024; опубликована 30.09.2024
Submitted 25/04/2024; revised 06/06/2024; published 30/09/2024

Евдокимов Сергей Иванович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Россия. Email: eva-ser@mail.ru. ORCID 0000-0002-2960-4786

Герасименко Татьяна Евгеньевна – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Россия. Email: gerasimenko_74@mail.ru. ORCID 0000-0001-7048-4379

Горлова Ольга Евгеньевна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия; Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова РАН, Москва, Россия. Email: gorlova_o_e@mail.ru.

Орехова Наталья Николаевна – доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова РАН, Москва, Россия. Email: n_orehova@mail.ru.

Sergey I. Evdokimov – PhD (Eng.), Lead Researcher, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia. Email: eva-ser@mail.ru. ORCID 0000-0002-2960-4786

Tatiana E. Gerasimenko – PhD (Eng.), Lead Researcher, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia. Email: gerasimenko_74@mail.ru. ORCID 0000-0001-7048-4379

Olga E. Gorlova – DrSc (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Geology, Surveying and Mineral Processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia; Melnikov Institute of Comprehensive Subsoil Development, the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. Email: gorlova_o_e@mail.ru

Natalia N. Orekhova – DrSc (Eng.), Associate Professor, Lead Researcher, Melnikov Institute of Comprehensive Subsoil Development, the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. Email: n_orehova@mail.ru