

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

УДК 622.765

DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-3-24-36



СХЕМА И РЕЖИМ ФЛОТАЦИИ ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЗОЛОТА ИЗ УПОРНЫХ РУД

Евдокимов С.И., Герасименко Т.Е.

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

Аннотация. Постановка задачи. При обогащении упорных золотосодержащих руд уменьшение выхода концентратата, направляемого на вскрытие золота и последующее цианирование, значительно сокращает капитальные затраты и эксплуатационные расходы, что обеспечивает решение актуальной задачи повышения экономической эффективности производства товарной продукции. **Цель работы.** Повышение технико-экономических показателей переработки руд за счет уменьшения выхода концентрата, направляемого на биоокисление сульфидов, путем применения аэрации пульпы смесью воздуха с горячим водяным паром – флотации паровоздушными пузырьками. **Новизна.** С опорой на данные о зависимости сил гидрофильтного отталкивания и гидрофобного притяжения, обусловленных отличием структуры воды в граничных слоях минералов от структуры воды в объеме, сделан вывод о возможности изменения результатов флотации за счет повышения температуры смачивающей пленки, например путем использования теплоты конденсации водяного пара. С этой целью аэрацию пульпы осуществляют смесью воздуха с горячим водяным паром. Повышение температуры смачивающей пленки является причиной роста сил гидрофильтного отталкивания, стабилизирующих пленку, а потеря устойчивости смачивающей пленки связана с ростом сил гидрофобного притяжения. **Результат.** С использованием разработанного стенда и методики проведены измерения коэффициента теплоотдачи при различной концентрации пара в пузырьке воздуха и выявлено, что при массовой доле пара в паровоздушной смеси более $0,30 \text{ кг}\cdot\text{кг}^{-1}$ за счет теплоты его конденсации температура воды в граничном слое всплывающего пузырька увеличивается на $11\text{--}14^\circ\text{C}$, что приводит к снижению толщины смачивающей пленки, отвечающей смене знака структурной составляющей расклинивающего давления. **Практическая значимость.** На пробе упорной золотосодержащей руды проведена экспериментальная апробация разработанной технологии и показано, что при ее применении содержание золота в концентрате флотации увеличивается в 1,8 раза при уменьшении выхода флотоконцентраты на 39,5% отн. и извлечение золота от операции повышается с 76,8 до 89,9%.

Ключевые слова: упорная золотосодержащая руда, флотация, заполнение пузырьков паром, экспериментальные исследования.

© Евдокимов С.И., Герасименко Т.Е., 2021

Для цитирования

Евдокимов С.И., Герасименко Т.Е. Схема и режим флотации для извлечения золота из упорных руд // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №3. С. 24–36.
<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-3-24-36>



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

FLOTATION FLOWSHEET AND MODE FOR RECOVERY OF GOLD FROM REFRACTORY ORES

Evdokimov S.I., Gerasimenko T.E.

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

Abstract. Problem Statement. When enriching refractory gold-bearing ores, a decrease in the yield of the concentrate sent to the gold extraction and subsequent cyanidation significantly reduces capital expenses and operating costs, providing a solution to the urgent problem of increasing the production efficiency of commercial products. **Objectives.** To increase the technical and economic indicators of ore processing by reducing the yield of the concentrate sent to the biooxidation of sulfides by aerating the pulp with a mixture of air and hot water steam, namely flotation with steam-air bubbles. **Originality.** Based on the data on the dependence of the forces of hydrophilic repulsion and hydrophobic attraction caused by the difference in the structure of water in the boundary layers of minerals from the structure of water in the bulk, it was concluded that it was possible to change the results of flotation by increasing the temperature of the wetting film, for example, by using steam condensation heat. For this purpose, the pulp is aerated with a mixture of air and hot steam. An increase in the temperature of the wetting film is the cause of an increase in the hydrophilic repulsion forces that stabilize the film, and the loss of stability of the wetting film is associated with an increase in the forces of hydrophobic attraction. **Findings.** Using the developed stand and the technique, the heat transfer coefficient was measured at different vapor concentrations in the air bubble and it was revealed that when the mass fraction of steam in the steam-air mixture was more than $0.30 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ due to the heat of its condensation, water temperature in the boundary layer of the floating bubble increased by $11\text{--}14^\circ\text{C}$, leading to a decrease in thickness of the wetting film, corresponding to a change in the sign of the structural component of wedging pressure. **Practical Relevance.** An experimental testing of the developed technology was carried out on a sample of refractory gold-bearing ore and it was shown that when it was applied, the gold content in the flotation concentrate increased by 1.8 times with a decrease in the yield of the flotation concentrate by 39.5% rel. and gold recovery from the operation increased from 76.8% to 89.9%.

Keywords: refractory gold-bearing ore, flotation, steam bubble filling, experimental studies.

For citation

Evdokimov S.I., Gerasimenko T.E. Flotation Flowsheet and Mode for Recovery of Gold from Refractory Ores. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 3, pp. 24–36. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-3-24-36>

Введение

Наличие значительной сырьевой базы [1, 2] и устойчивое увеличение добычи золота из недр [3] позволило России войти в тройку крупнейших стран-продуцентов драгоценного металла [4]. Наращивание в стране производства золота происходит в основном за счет интенсивного освоения месторождений с упорными, труднообогатимыми рудами Дальнего Востока и Сибири. Увеличению добычи золота из руд собственно золоторудных месторождений способствует рост цены на металл: цена тройской унции золота превысила отметку в 2000 долл. США, что способствует увеличению добычи золота из руд собственно золоторудных месторождений. Рост цен на золото оказывает позитивное влияние на финансовое положение золотодобывающих компаний [5]: в течение последних 10 лет объем сделок M&A с золотодобывающими активами достиг максимального уровня и в стоимостном выражении составил более 18 млрд долл. США.

Однако в настоящее время золотодобывающие компании все больше вовлекают в промышленное освоение месторождения руд, золото в

которых относится к категории трудноизвлекаемого – так называемого «упорного» к извлечению цианированием [6]. Упорность золота в рудах связана с его тонкой вкрапленностью в сульфидных минералах, прежде всего в арсенопирите и пирите, а также породообразующих минералах, что является причиной потерь золота при цианировании, низких технико-экономических показателей переработки сырья.

Для обеспечения доступа выщелачивающего раствора цианида к золоту, содержащемуся в концентратах, выделенных из упорных руд методом флотации, их подвергают окислительному обжигу, автоклавному или биологическому окислению. Эти процессы длительные и дорогостоящие, требуют больших производственных площадей. Так, при наиболее перспективном процессе вскрытия сульфидов – автоклавным окислением – затраты на электроэнергию составляют более 1000 руб./т концентрата, а на реагенты ~5000 руб./т. В зависимости от химического и вещественного состава концентрата длительность процесса биоокисления по традиционной технологии составляет 4–6 суток и более.

Целью работы является повышение технико-экономических показателей переработки руд за счет уменьшения выхода концентратов, направляемого на биоокисление сульфидов, путем применения аэрации пульпы смесью воздуха с горячим водяным паром – флотации паровоздушными пузырьками.

Объект и методы исследования

В лабораторных условиях исследовательские испытания режима флотации паровоздушной смесью проведены на пробе руды Олимпиадинского месторождения.

Химический состав пробы руды позволяет отнести ее к сульфидным (первичным) рудам (**табл. 1**).

Таблица 1. Химический состав исходной пробы руды
Table 1. Chemical composition of an original ore sample

Наименование элемента и соединения	Содержание, %	Наименование элемента и соединения	Содержание, %
Cu	0,006	Fe	2,35
Pb	0,006	S	1,52
Zn	0,019	SiO ₂	48,70
As	0,36	Au	2,95±0,14 г/т
Sb	0,03	Ag	2,4 г/т

Сульфидные минералы в пробе исходной руды представлены (в порядке убывания) пирротином, пиритом, арсенопиритом, халькопиритом, сфалеритом и антимонитом. Породообразующими минералами пробы исходной руды являются кварц, карбонаты и слюды.

Из результатов рационального анализа на формы золота, приведенного в **табл. 2**, следует, что в тонкоизмельченной руде из всего золота на свободное золото приходится 15,0% и больше половины находится в сростках и связано с сульфидами.

Оптические исследования выполнены с применением поляризационного микроскопа Leica DM 2700P, для изучения минералогического состава использован оптический стереомикроскоп Olympus модели SZ51, электронно-зондовый микроанализатор EPMA-1720/1720Н использован для рентгеноспектрального микроанализа минералов. Содержание золота определяли пробирным концентрированием благородных ме-

таллов в свинцовый сплав и пробирно-атомно-абсорбционным методом.

Для измерения коэффициента теплоотдачи при барботировании воды паром разработан стенд (**рис. 1**) с ячейкой-калориметром 4 в виде рабочей зоны флотационной машины механического типа.

Парогенератор установки выполнен в виде котла 1 с рабочим объемом 12,0 дм³ с двумя U-образными электронагревателями (ТЭНами) мощностью по 315 кВт. Давление пара в котле плавно регулируется изменением мощности ТЭНов релейным способом. Электрические контакты на ТЭНах замыкаются при заполнении котла до датчика верхнего уровня воды.

Котел соединен со шлюзовой камерой ячейки-конденсатора (калориметром) паровой магистралью с пароперегревателем из никромовой проволоки. Теплопроводом служит гибкий сильфонный шланг, экранированный от теплопотерь шнуром из асбеста. В шлюзовую камеру входит пневмопровод, сообщающийся с атмосферой через ротаметры и регулирующие вентили расхода воздуха. Шлюзовая камера предназначена для смешения пара и воздуха в заданном соотношении.

Калориметр изготовлен из стали марки 12Х18Н10Т в виде цилиндра с площадью основания 0,011 м² и высотой 0,3 м.

Через герметичную верхнюю крышку калориметра в ячейку-конденсатор с сальниковыми уплотнениями из фторопласта помещен блок импеллера лабораторной флотационной машины механического типа с регулируемым числом оборотов привода 4. Вход аэрационной трубы блока импеллера сообщен со шлюзовой камерой, а выход – с узким зазором между статором и импеллером. Импеллер выполнен в виде диска Ø 0,068 м со ступицей с 4-мя радиальными лопатками. В зазоре из-за вращения импеллера давление понижено и сюда из шлюзовой камеры поступает паровоздушная смесь. При максимальном числе оборотов импеллера в рабочую зону поступает до 4,1 м³/(мин·м²) воздуха.

Ячейка проточная: в рабочую зону из напорного бака при постоянном давлении может поступать и удаляться в дренаж до 1,2 м³/(мин·м²) воды. При минимальных расходах воды время пребывания (задержки) потока в рабочей зоне ячейки составляет до 100 с.

Таблица 2. Результаты рационального анализа форм золота в пробе исходной руды
Table 2. Rational analysis of ore forms in the original ore sample

Наименование продукта	Содержание золота, г/т (%)					
	Золото свободное	Золото в сростках	Золото в «рубашке»	Золото в кварце	Золото в сульфидах	Общее содержание золота
Проба исходной руды, измельченная до крупности 85% кл. -71 мкм	0,45(15,0)	0,98(32,7)	0,37(12,4)	0,34(11,2)	0,86(28,7)	3,0(100,0)

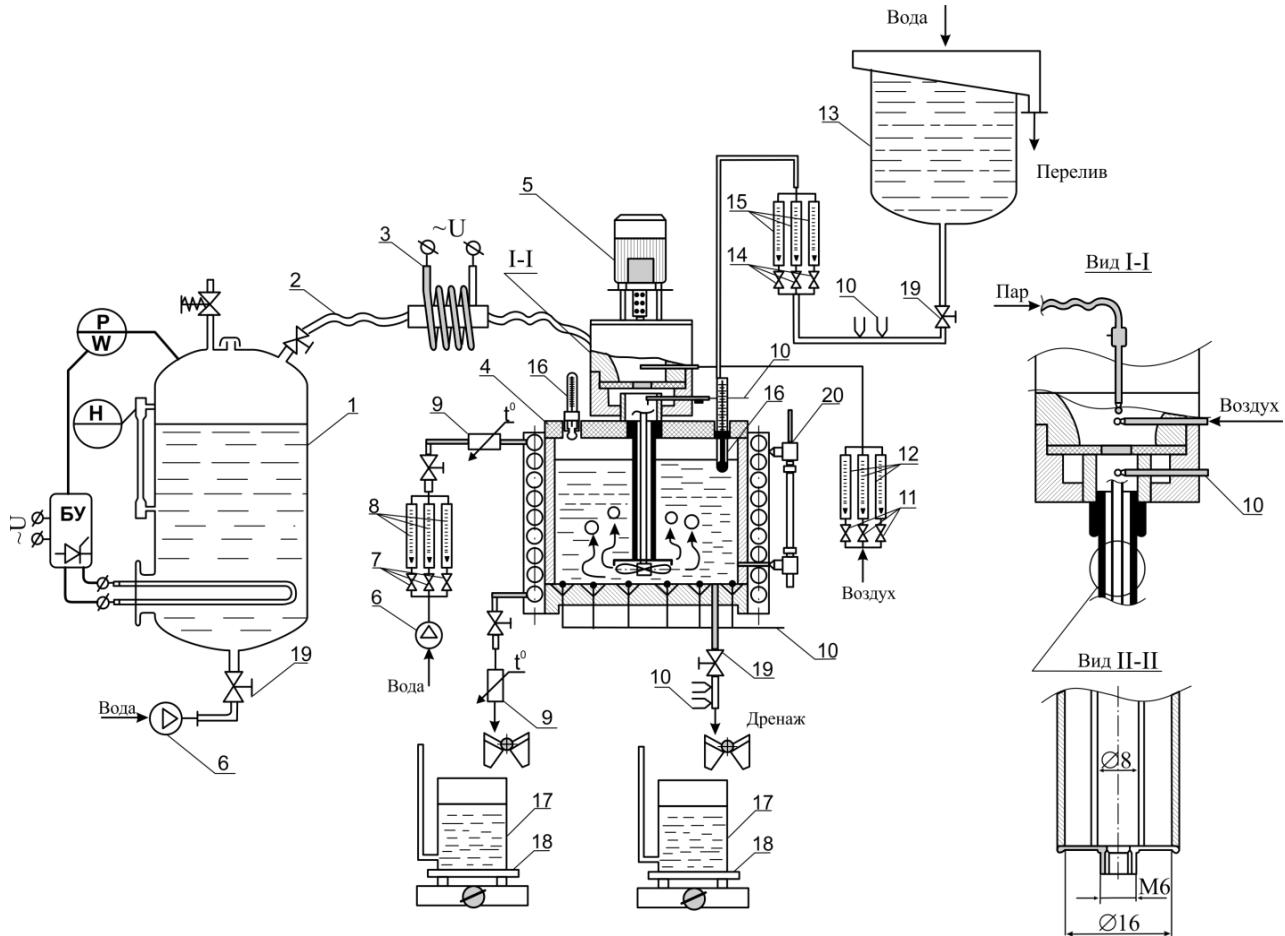


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 – котел парогенератора; 2 – паропровод с электрическим пароперегревателем 3; 4 – ячейка-калориметр с приводом блока импеллера 5; 6–9 – гидросистема с водяным насосом 6, регулирующими вентилями расхода воды 7, ротаметрами 8, термопарой 9; 10 – термометр сопротивления; 11, 12 – пневмосистема с регулирующими вентилями расхода воздуха 11 и ротаметрами 12; 13–15 – контур подачи воды из бака постоянного напора 13 с регулирующими вентилями расхода воды 14, ротаметрами 15; 16 – система термометрии; 17 – мерная емкость; 18 – весы; 19 – вентиль; 20 – уровнемер; вид I-I – фрагмент разреза входа аэрационной трубы с камерой смешения воздуха с паром, вид II-II – фрагмент разреза насадки

Fig. 1. Diagram of the experimental stand: 1 is a boiler of a steam generator; 2 is a steam pipeline with electrical superheater 3; 4 is a cell-calorimeter with a drive of impeller unit 5; 6–9 is a hydraulic system with water pump 6, water flow control valves 7, rotameters 8; thermocouple 9; 10 is a resistance thermometer; 11, 12 is a pneumatic system with air flow control valves 11 and rotameters 12; 13–15 is a water supply circuit from constant-head tank 13 with water flow control valves 14, rotameters 15; 16 is a temperature measurement system; 17 is a measuring container; 18 is a scale; 19 is a valve; 20 is a level gauge; view I-I is a part of the section of the entry of the aeration tube and a chamber of mixing air and steam, view II-II is a part of the section of a nozzle assembly

На аэрационную трубу блока импеллера может накручиваться насадка в виде коаксиально установленных трубок из стали марки 12Х18Н10Т с внутренними диаметрами 16 и 8 мм (см. рис. 1, вид I-I). Насадка заканчивается резьбовым сходом М6×0,75 для установки сопел разного диаметра. Воздушный зазор между трубками в насадке предотвращает конденсацию пара перед соплом.

Экспериментальная ячейка помещена в кольцевой трубопровод с системой подвода

6–9 и отвода 9, 17, 18 воды, по температуре которой определяют момент наступления стационарного режима работы стенда и тепловой поток на стенку ячейки.

Для измерения температуры холодного и горячего теплоносителя в состав установки входит система термометрии на основе хромель-копелевых термопар (ТХК) и ртутных погружных термометров типа СП-73 с диапазоном измерения температуры +8...+38°C и с ценой деления

ния 0,2°C; регистрацию напряжения на термопарах осуществляют цифровым вольтметром типа Щ 1516 и потенциометрами ЭПД-07 и ПП-63 с классом точности 0,05.

Температуру паровоздушной смеси на входе в аэрационную трубу определяли в шлюзовой камере с помощью запаянной в стальную гильзу термопары. Для измерения температуры потока воды на выходе (дренажа) из калориметра в 6 сечениях через колодцы с наружным Ø 0,9 мм из нержавеющей стали в дно ячейки вмонтированы горячие спаи кабельных хромель-копелевых термопар Ø 0,2 мм. Их холодные спаи термостатировали при температуре таяния льда из дистиллированной воды в сосуде Дьюара.

Для измерения температуры потока воды на входе и выходе змеевика гидросистемы использовали термометры сопротивления КТСП-Н.

Бездемонтажную калибровку термопар и термометров сопротивления осуществляли с помощью эталонного платинового термометра сопротивления ТСП-ОМ. Расход пара определяли весовым методом – взвешиванием мерной емкости объемом 0,5 дм³ на технических весах модели Меттлер Толедо с грузоподъемной чашкой SmartPan и линейки ВЛЭ-С с дискретностью показаний 0,01 г. Температуру насыщенного пара контролировали по величине его давления с использованием манометра типа ЭДМ с диапазоном измерений 0–1 МПа. Относительную влажность воздуха определяли с использованием цифрового гигрометра типа «Волна-5П» с погрешностью ±2,5%.

Условия определения величины коэффициента теплоотдачи соответствовали режиму флотации во флотомашине колонного типа: центробежный критерий Рейнольдса $Re = (74-148) \cdot 10^6$; температура холодного теплоносителя – воды – 18–20°C; расход воды – от 0,3 до 1,2 м³/мин на 1 м² сечения ячейки-калориметра; расход воздуха – от 0,8 до 4,1 м³/мин на 1 м² сечения ячейки-калориметра; расход пара – от 0,21 до 1,05 кг/т воды через 1 м² сечения ячейки-калориметра; температура пара 104°C при давлении 0,10 ± 0,010 МПа и плотности 0,625 кг·м⁻³.

Полученные экспериментальные результаты обрабатывали по методике, изложенной в работе [7].

За счет теплоты конденсации пара Q_k , кВт, температура потока воды G_v , кг·с⁻¹, в ячейке-калориметре увеличивается от T_{K1} на входе до T_{K2} на выходе. При низкой температуре эксперимента потери в окружающую среду от излучения теплоты корпусом калориметра незначительны. Поэтому плотность теплового потока

$$Q_k = G_v \cdot c_p \cdot \Delta T, \quad (1)$$

где c_p – изобарная теплоемкость воды, Дж·кг⁻¹·К⁻¹; $\Delta T = (T_{K2} - T_{K1})$, К.

Тепло от смешения воды с конденсатом пара составляет <1% и для практических расчетов пренебрежимо мало. Тогда, согласно закону Ньютона-Рихмана, при температуре насыщения паровоздушной смеси T_s и выходе температуры потока воды на стационарный режим при температуре стенки T_c значение коэффициента теплоотдачи α , кВт·м⁻²·К⁻¹, определяется по формуле

$$\alpha = \frac{Q_k}{F(T_s - T_c)}, \quad (2)$$

где F – площадь поверхности, воспринимающей теплоту Q_k , м².

При статистической обработке группы результатов измерений доверительные границы измеряемой величины Δx рассчитывали в виде произведения табличного значения критерия Стьюдента t_T при доверительной вероятности $P = 0,95$ и среднего квадратического отклонения среднего арифметического $S_{\bar{x}}$:

$$\Delta x = t_T \cdot S_{\bar{x}}. \quad (3)$$

Постановка и метод решения задачи

В работе решается задача повышения эффективности переработки минерального сырья методом флотации путем модификации технологических свойств пузырьков воздуха тепловым воздействием.

Тонкие слои воды под влиянием молекулярного действия твердого тела приобретают состояние и свойства, отличные от объемных [8]. Силы, действующие в этих граничных слоях, относят к поверхностным силам [9]. Поверхность твердого тела действует на более удаленные слои не на расстоянии, а путем передачи структурной информации от слоя к слою на расстояние до десятых долей микрона [10], в том числе вблизи поверхности золота [11].

В зависимости от знака изменения свободной энергии при утончении смачивающей пленки до толщины граничного слоя с измененной структурой между телами возникают силы притяжения или силы отталкивания [12]. Первый случай называют гидрофобным взаимодействием [13, 14]. Поэтому для второго случая естественно предположить название гидрофильного взаимодействия. Последнее способно обеспечить длительную устойчивость гидрофильных частиц.

Структура воды с повышением температуры изменяется (уменьшается мольная доля соединенных водородными связями молекул по Nemethy и Scheraga [15, 16], заполняются пустоты тетраэдрического каркаса несвязанными молекулами воды по Самойлову, Danford и Levy [15, 16], водородная связь искажается у большей доли молекул по Pople [15, 16]), но в объеме больше, чем в защищенных поверхностю от теплового действия граничных слоях. В результате свободная энергия структуры граничного слоя уменьшается медленнее, чем в объеме, что является причиной роста величины сил гидрофобного притяжения и гидрофильного отталкивания при повышении температуры. Таким образом, для повышения эффективности разделения минералов методом флотации достаточно повысить температуру в разделяющем частицу и пузырек слое жидкости (толщиной порядка 10–20 нм), в пределах которого локализовано действие поверхностных сил, а не всего объема пульпы. Сопряженные процессы нагрева межфазного слоя жидкости и контакта частицы с пузырьком должны протекать в одном интервале времени (соизмеримом со временем индукции [17–19]).

Силы гидрофильного отталкивания могут быть сведены к избыточному осмотическому давлению между гидрофильными поверхностями [20], а избыточное осмотическое давление окружающей воды (пониженное осмотическое давление (декомпрессия [21]) между поверхностями) – к силам гидрофобного притяжения.

Поставленная задача решается путем применения для аэрации пульпы при флотации смеси воздуха с горячим водяным паром. При внезапном контакте пузырька пара с холодной пульпой пар конденсируется и тепловой поток отводится из пузырька в граничный слой жидкости, а при контакте пузырька пара с твердой частицей – в смачивающую пленку.

При коэффициенте температуропроводности пара $a = 18,58 \text{ м}^2/\text{с}$ время выравнивания температуры пара в пузырьках размером $R = (1,0 - 1,5) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ с площадью поверхности $F = (12,56 - 18,84) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ в неравновесном тепловом процессе их взаимодействия с холодной водой составляет 0,7–1,0 с.

Однако добавка к пару неконденсирующегося газа – воздуха – приводит к значительному снижению скорости теплообмена и конденсационной мощности [22].

Увеличение в присутствии неконденсирующегося воздуха времени перехода пара от метастабильного состояния к состоянию, близкому к равновесному, позволяет предположить, что передача теплоты от пара в пузырьке к воде и взаимодействие пузырька с частицей при флотации происходят в одном интервале времени.

Характеристика предмета исследования

Экспериментально установлено, что при увеличении концентрации пара в паровоздушной смеси до ~0,30 кг/кг значение коэффициента теплоотдачи практически не изменяется, оставаясь на уровне 0,004–0,005 кВт/(м²·К) (рис. 2).

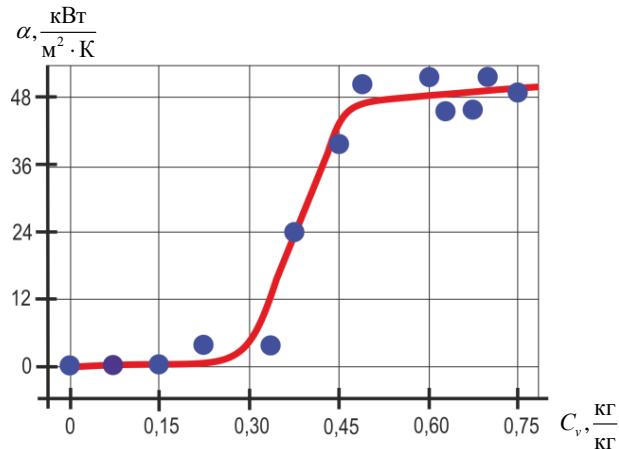


Рис. 2. Коэффициент теплоотдачи α как функция концентрации пара C_v

Fig. 2. Heat transfer coefficient α as a function of steam concentration C_v

При дальнейшем увеличении концентрации пара в паровоздушной смеси в достаточно узком интервале концентраций (0,30–0,45 кг/кг) следует резкое увеличение величины коэффициента теплоотдачи до его максимального значения (~48 кВт/(м²·К)).

Внезапный контакт пузырька пара с холодной водой можно представить так, как если бы непроницаемая теплоизолирующая перегородка между водой и ее горячим паром была мгновенно удалена (рис. 3). В течение нескольких миллисекунд между температурой воды в граничном слое и пара устанавливается разность в 2–3°C [23–26].

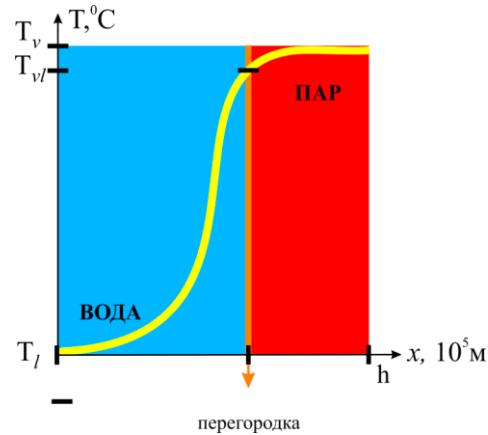


Рис. 3. Схема изменения температуры воды в граничном слое

Fig. 3. Water temperature changes in a boundary layer

В присутствии тяжелого неконденсирующегося газа (воздуха, азота) мощность теплоотвода к охлаждающему теплоносителю снижается [22] в результате ухудшения условий для конденсации.

В паровоздушном пузырьке (**рис. 4**) при совместном тепломассообмене плотность теплового потока $j = j^+ - j^-$ складывается из теплового потока к межфазной поверхности j^- , $\text{кВт}\cdot\text{м}^{-2}$, и встречного потока молекул испаряющегося вещества несущей жидкой фазы j^+ , $\text{кВт}\cdot\text{м}^{-2}$.

При небольших концентрациях пара в паровоздушной смеси передача теплоты от конденсирующегося пара к межфазной поверхности затруднена термическим сопротивлением, оказываемым наличием вблизи нее слоя неконденсирующегося воздуха: высокая частота и вероятность столкновения воздуха с паром сводит к минимуму интенсивность тепломассообмена. Пар концентрируется в центре пузырька и преодоление слоя неконденсирующегося воздуха возможно только за счет диффузии (**рис. 4, а**). С увеличением массовой доли пара в паровоздушной смеси (более $0,30 \text{ кг}\cdot\text{кг}^{-1}$) слой неконденсирующегося воздуха утончается и становится разреженным, и тепловой поток на границе раздела фаз газ-жидкость резко увеличивается (**рис. 4, б**).

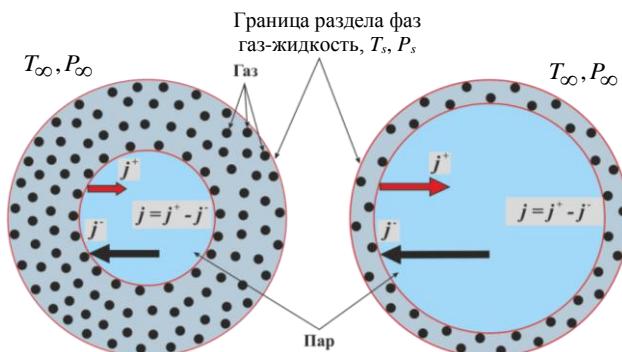


Рис. 4. Схема тепловых потоков $\rightarrow (j^-)$ и $\rightarrow (j^+)$ в присутствии неконденсирующихся газов (воздуха)

Fig. 4. Diagram of heat flows $\rightarrow (j^-)$ and $\rightarrow (j^+)$ in presence of noncondensable gases (air)

При переходе от неподвижной границы тепломассообмена (см. **рис. 3**) к подвижной на межфазной поверхности устанавливается температура T_{gl} , выражение для которой получено решением уравнения теплопроводности [26] в виде

$$T_{gl}(x, t) = T_0 + \frac{1}{\lambda} \sqrt{\frac{a}{\pi}} \int_0^t q(\tau) \exp\left(-\frac{x^2}{4at}\right) \frac{d\tau}{\sqrt{\tau}}, \quad (4)$$

где x – координата, м; $q(\tau)$ – плотность теплового потока со стороны газовой фазы, рассчитываемая по закону Фурье, $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}$; λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{град}^{-1}$; a – коэффициент температуропроводности пара, $\text{м}^2\cdot\text{с}^{-1}$; t – время движения пузырька, с; τ – время наступления регулярного теплового режима, с [27, 28].

По нашим оценкам, при подъеме пузырька размером $R = 1\cdot10^{-3}$ м на $H = 1$ м со скоростью $v = 0,136$ м/с разница ΔT между температурой воды на поверхности пузырька T_{gl} и в объеме жидкости T_∞ составляет $\Delta T = T_{gl} - T_\infty = 11-14^\circ\text{C}$; толщина температурного слоя h_{gl} пузырька пара составляет $h_{gl} = D / 2\sqrt{Re} = 0,1$ мм (при числе Рейнольдса $Re = 100$).

Результаты исследования и их анализ

При флотации пробы золотосодержащих руд апробирован режим флотации с подачей в аэратор флотомашины колонного типа пара, исходя из $0,34 \text{ кг}\cdot\text{т}^{-1}$ исходной пульпы.

С применением схемы и реагентного режима, рекомендуемого для обогащения руд [29], из пробы руды в концентрат, содержащий $86,78 \text{ г/т}$ золота при выходе $2,98\%$, извлечено $85,07\%$ металла.

Повышение достигнутых технологических показателей обогащения руд возможно путем оптимизации условий разделения в операциях основной флотации и перечистки чернового концентрата.

В существующих схемах флотации в операцию основной флотации направляют хвосты I перечистки и концентрат контрольной флотации, что объясняется примерно одинаковым содержанием в них извлекаемого компонента. Однако извлекаемые минералы в исходном сырье и промежуточных продуктах различаются по флотируемости: скорость флотации медленно флотируемой фракции ценного компонента и быстро флотируемой фракции подавляемого минерала выравниваются и фракции примерно с одинаковой интенсивностью переходят в концентрат. Появление при смешении распределения извлекаемых минералов по флотируемости (понижение контрастности) приводит к увеличению их потерь с хвостами флотации.

В работе для повышения контрастности материала по флотируемости в операции основной флотации в нее направляют концентрат, для выделения которого из материала промпродуктов схему флотации дополняют операцией промпродуктовой флотации.

Следствием извлечения ценных минералов в концентрат с различной интенсивностью (при смешении флотоактивных минералов в питании с трудно извлекаемыми (упорными) формами минералов в промпродуктах) является появление

их распределения по времени пребывания во флотомашине. Отсутствие распределения извлекаемых минералов по времени пребывания во флотомашине и близость результата разделения к результату периодического процесса (с высоким извлечением и качеством концентрата) является отличием аппарата с идеальным вытеснением от аппарата с идеальным перемешиванием. Минимальная скорость радиального перемешивания во флотомашине колонного типа позволяет рассматривать ее как аппарат с идеальным вытеснением с характерными для него преимуществами.

С целью повышения достигнутых технологических показателей перечистку концентрата основной флотации выполняли в колонной флотационной машине с аэратором конфузор-диффузорного типа для подачи смеси воздуха с водяным паром (рис. 5).

Измельчение руд осуществляли в две стадии (до 40,3% кл. -74 мкм в первой и до 85,7% кл. -74 мкм во второй) в стержневой мельнице размешением $D \times L = 163 \times 220$ мм при отношении Т:Ж = 1:1 и загрузке в нее 9 кг стержней Ø 15–30 мм. Из продуктов измельчения на концентрационных столах (типа 30А-КЦМ в операции основной концентрации и СКЛ2 в операции перечистки концентрата) выделен гравиоконцентрат с содержанием золота 73,19 г/т Au при извлечении 20,08%.

Флотацию хвостов гравитации осуществляли во флотомашине механического типа с объемом камеры 3 дм³ при числе оборотов импеллера 1863 об/мин (вогнутый диск Ø 68 мм с четырьмя радиальными лопатками и ступицей) и расходе воздуха 1,14 м³/мин на 1 м³ объема камеры. Золото извлекали бутиловым ксантогенатом калия и Т-80 в щелочной среде (загрузка соды до pH 8,5–8,7) после активации сульфидов медным купоросом. Получен черновой концентрат с содержанием 26,73 г/т Au при извлечении 68,69%.

Черновой концентрат перечищали во флотационной колонне Ø 6,4 см с высотой зоны минерализации 2,1 м и высотой зоны очистки – 0,60 м при противоточном движении исходного питания и газовой фазы. В пневмогидравлическом аэраторе рабочий газовый поток через конфузор Ø 1 мм поступает в коническую камеру смешения (с горловиной) с расширяющимся диффузором Ø 5,1 мм на выходе общей длиной 15,2 см. В камеру смешения через патрубок Ø 1,47 мм подается раствор ксантоцина под давлением 12,7 кПа. Аэратор вынесеный, боковой, донный.

Производительность колонны по пульпе при перечистке чернового концентрата составляла 31,5 кг·с⁻¹ на 1 м² сечения колонны. На аэрацию подавали $26,1 \cdot 10^{-3}$ кг·с⁻¹ воздуха из расчета на 1 м² сечения колонны и $10,7 \cdot 10^{-3}$ кг·с⁻¹ пара с темпера-

турой 104°C и давлением 218 кПа (0,34 кг·с⁻¹ исходной пульпы). Из водного баланса колонны следует, что при расходе промывной воды 0,34 м³/мин на 1 м² сечения колонны поток воды в хвосты превышал поток воды в питание на 7–8%, что позволяло подавлять механический вынос нефлотируемых минералов в концентрат.

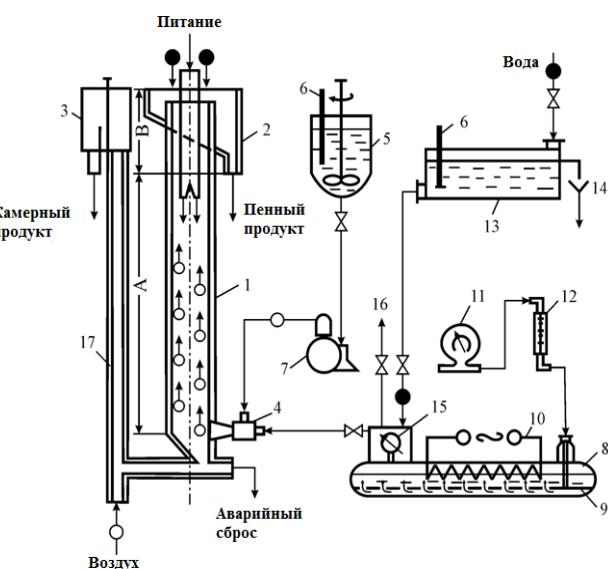


Рис. 5. Схема цепи аппаратов лабораторного стенда для флотации паровоздушной смесью:

1 – флотационная колонна; 2, 3 – приемники продуктов разделения; 4 – пневмо-гидравлический аэратор конфузор-диффузорного типа; 5–7 – линия инжекции раствора пенообразователя; 8–10 – парогенератор (8) с системой барботажа воздуха (9) и электронагрева воды (10); 11, 12 – линия подачи и контроля расхода воздуха; 13, 14 – линия подачи воды с постоянным напором; 15, 16 – линия контроля расхода (15) и сброса избытка (16) паровоздушной смеси

Fig. 5. Diagram of devices of the laboratory stand for the flotation with a steam-air mixture:

1 is a flotation column; 2, 3 are receiving containers of products of separation; 4 is a pneumatichydraulic aerator of a confuser-diffuser type; 5–7 is a foam former solution injection line; 8–10 is a steam generator (8) with an air bubbling system (9) and an electrical water heating system (10); 11, 12 is an air supply and consumption control line; 13, 14 is a constant head water supply line; 15, 16 is a steam-air mixture consumption control line (15) and an excess mixture relieve line (16)

На перечистку подавали бутиловый ксантоцинат калия из расчета 25 мг/дм³. Давление воздуха на входе в эрлифт 0,14 МПа при расходе 0,045 м³ на 1 м² удаляемой в хвосты пульпы. Удельный расход электроэнергии 0,34 кВт/м³ пульпы.

На рис. 6 приведена рекомендуемая качественно-количественная схема флотации руд, полученная по результатам флотации в условиях, моделирующих замкнутый цикл. Опыт со-

стоял из 6 заворотов промежуточных продуктов, при которых была достигнута стабилизация содержания золота в отвальных хвостах.

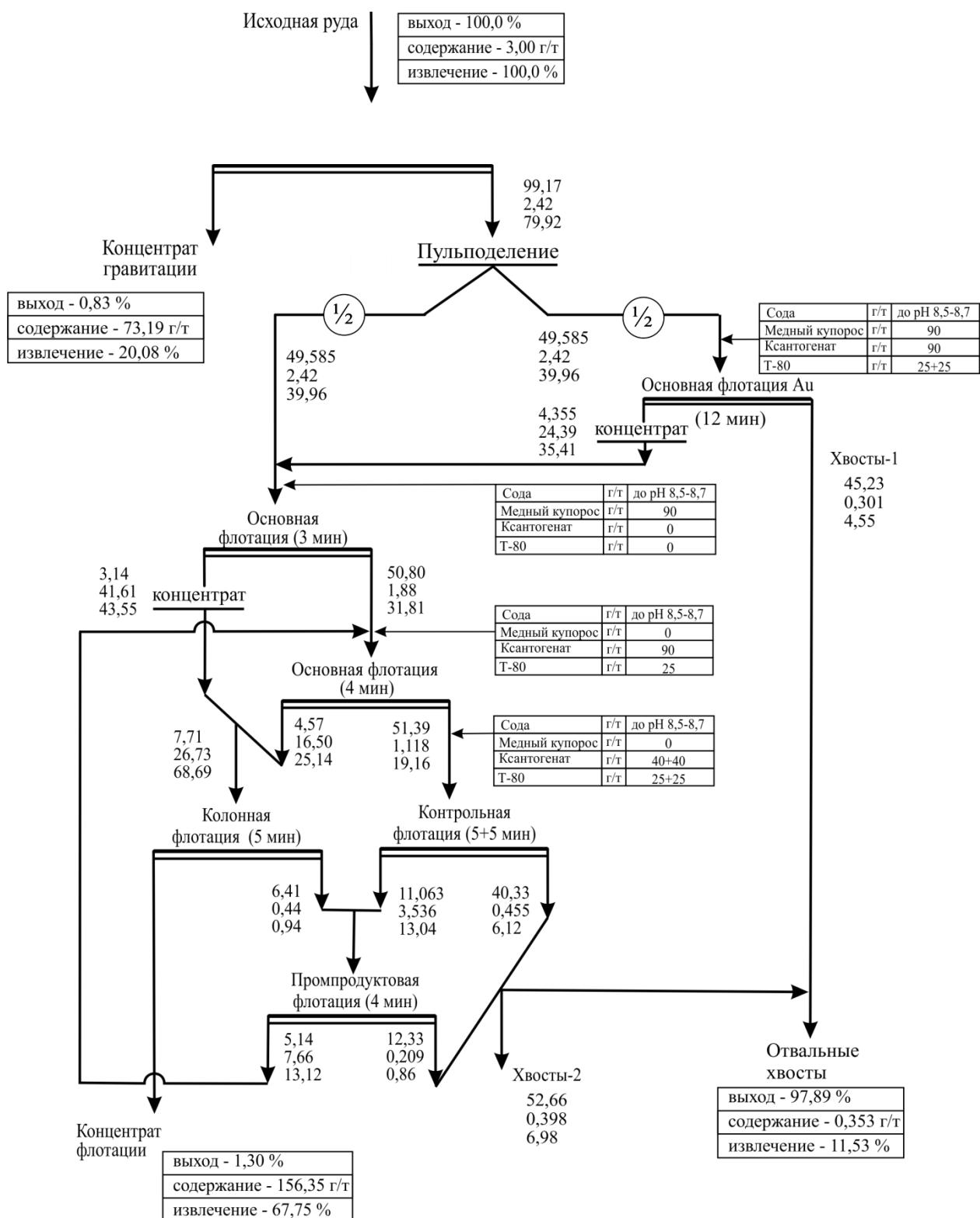


Рис. 6. Качественно-количественная схема флотации руд
Fig. 6. Production and weighted flowsheet of ore flotation

Сравнение достигнутых показателей обогащения руд (см. **рис. 6**) с ранее полученными [29, 30] позволяет сделать следующие выводы.

В концентрат извлечено 88,47% золота (в том числе 20,72% – в концентрат гравитации); при выходе концентрата 2,11% в нем содержится 125,79 г/т золота.

Применение одной перечистки чернового концентрата в колонной флотомашине вместо двух перечисток во флотомашинках механического типа позволило увеличить извлечение золота от операции с 76,8 до 89,9%; содержание золота в концентрате флотации увеличилось в 1,8 раза при уменьшении выхода флотоконцентрата на $\left(100 - \frac{1,30}{2,15} \cdot 100\right) = 39,5\%$ отн.

Введение операции флотации промпродуктов – хвостов I перечистки и концентрата контрольной флотации – позволило уменьшить разубоживание питания основной флотации путем уменьшения на >38% отн. выхода промпродуктов, возвращаемых в операцию основной флотации. В результате извлечение золота во флотоконцентрят увеличилось на 2,76% (с 64,99 до 67,75%) за счет уменьшения потерь золота с отвальным хвостами на $\left(100 - \frac{11,53}{14,93} \cdot 100\right) = 22,8\%$ отн.

Заключение

При гидрофобизации поверхности структурное притяжение увеличивается, а силы структурного отталкивания ослабляются, что является причиной снижения равновесной толщины смачивающей пленки, потери ее устойчивости. Кроме гидрофобизации поверхности перевод смачивающих пленок в метастабильное состояние возможен за счет нагрева воды в тонком заре между частицей и пузырьком, например путем использования теплоты конденсации водяного пара. С этой целью аэрацию пульпы осуществляют смесью воздуха с горячим водяным паром. Повышение температуры смачивающей пленки является причиной роста сил гидрофильного отталкивания, стабилизирующих пленку, а потеря устойчивости смачивающей пленки связана с ростом сил гидрофобного притяжения. Силы гидрофильного отталкивания могут быть сведены к избыточному осмотическому давлению между гидрофильными поверхностями, а избыточное осмотическое давление окружающей воды (пониженное осмотическое давление (декомпрессия) между поверхностями) – к силам гидрофобного притяжения.

С использованием разработанного стенда и методики проведены измерения коэффициента теплоотдачи при различной концентрации пара в пузырьке воздуха. Установлено, что при массовой доле пара в паровоздушной смеси более 0,30 кг·кг⁻¹ тепловой поток на границе раздела фаз газ-жидкость резко увеличивается. На неподвижной границе раздела фаз газ-жидкость в течение нескольких миллисекунд между температурой воды в граничном слое и пара устанавливается разность в 2–3°C; в граничном слое всплывающего пузырька температура воды на 11–14°C выше, чем в объеме воды.

Разработанный режим аэрации пульпытвержден в лабораторных условиях в операции перечистки чернового концентрата при флотации золотосодержащих руд. Сравнение достигнутых показателей с ранее достигнутыми позволяет рекомендовать способ флотации паровоздушной смесью для применения в практике обогащения золотосодержащих руд с целью повышения технологических показателей их обогащения.

Список литературы

1. Минерально-сырьевая база золота России: состояние и перспективы развития / Михайлов Б.К., Иванов А.И., Вартанян С.С., Беневольский Б.И. // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2014. № 6. С. 9–13.
2. Панов Р.С. О результатах и проблемах развития минерально-сырьевой базы России по итогам работ АО «Росгеология» в 2018 г. // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2019. №1. С. 4–5.
3. Алексеев Я.В., Корчагина Д.А Сырьевая база рудного золота России: состояние освоения и перспективы развития до 2040 г. // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2020. №4–5. С. 3–7.
4. Кашуба С.Г. Золотодобывающая отрасль России: состояние и перспективы // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2020. №4–5. С. 48–52.
5. Заернюк В.М., Черникова Л.И., Забайкин Ю.В. Тенденции, проблемы и перспективы развития золотодобывающей отрасли России // Финансовая аналитика: проблемы и решения. 2017. Т. 10. №9. С. 972–986.
6. Евдокимов С.И., Герасименко Т.Е., Троценко И.Г. Технико-экономическое обоснование эффективности совместной переработки руд и россыпей золота // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т. 18. №4. С. 12–23.
7. Шихалев С.В., Минухин Л.А., Решетников И.Ф. Процессы тепло- и массоотдачи при конденсации пара из парогазовой смеси на горизонтальной плоской поверхности аппаратов с рубашкой // Техника и

- технология пищевых производств. 2014. №3. С. 103–107.
8. Miller J.D., Wang X., Jin J., Shrimali K. Interfacial water structure and the wetting of mineral surfaces // International Journal of Mineral processing. 2016. Vol. 156. P. 62–68.
9. Boinovich L., Emelyanenko A. Wetting and surface forces // Advances in Colloid and Interface Science. 2011. Vol. 165. No. 2. P. 60–69.
10. Zheng J.-m., Chin W-C., Khijniak E., Khijniak E., Pollock G.H. Surfaces and interfacial water: Evidence that hydrophilic surfaces have long-range impact // Advances in Colloid and Interface Science. 2006. Vol. 127. Issue 1. P. 19–27.
11. Pan L., Jung S., Yoon R.-H. Effect of hydrophobicity on the stability of the wetting films of water formed on gold surfaces // Journal of Colloid and Interface Science. 2011. Vol. 361. Issue 1. P. 321–330.
12. Liang Y., Hilal N., Langston P., Starov V. Interaction forces between colloidal particles in liquid: Theory and experiment // Advances in Colloid and Interface Science. 2007. Vol. 134–135. P. 151–156.
13. Liu J., Cui X., Xie L., Huang J., Zeng H. Probing effects of molecular-level heterogeneity of surface hydrophobicity on hydrophobic interactions in air/water/solid systems // Journal of Colloid and Interface Science. 2019. Vol. 557. P. 438–449.
14. Mishchuk N. The model of hydrophobic attraction in the framework of classical DLVO forces // Advances in Colloid and Interface Science. 2011. Vol. 168. Issues 1–2. P. 149–166.
15. Эйзенберг Д., Кауцман В. Структура и свойства воды. Л.: Гидрометиздат, 1975. 280 с.
16. Евдокимов С.И., Паньшин А.М., Солоденко А.А. Минералургия. В 2-х т. Т. 2. Успехи флотации. Владикавказ: ООО НПКП «МАВР», 2010. 992 с.
17. Verrelli D.I., Koh P.T.L., Bruckard W.J., Schwarz M.P. Variations in the induction period for particle–bubble attachment // Minerals Engineering. 2012. Vol. 36–38. P. 219–230.
18. Xia W. Role of surface roughness in the attachment time between air bubble and flat ultra-low-ash coal surface // International Journal of Mineral Processing. 2017. Vol. 168. P. 19–24.
19. Albijanic B., Ozdemir O., Nguyen A.V., Bradshaw D. A review of induction and attachment times of wetting thin films between air bubbles and particles and its relevance in the separation of particles by flotation // Advances in Colloid and Interface Science. 2010. Vol. 159. P. 1–21.
20. Ролдугин В.И. О едином механизме действия поверхностных сил различной природы // Коллоидный журнал. 2015. Т. 77. №2. С. 214–218.
21. Ролдугин В.И., Харитонова Т.В. Осмотическое давление или декомпрессия? // Коллоидный журнал. 2015. Т. 77. №6. С. 783–791.
22. Экспериментальные исследования условий конденсации пара в присутствии неконденсирующегося газа на вертикальном многорядном коридорном пучке слабонаклоненных змеевиковых труб / Тарасов Г.И., Синицын А.Н., Бабин В.А., Большухин М.А., Антипин С.Г., Белин А.В., Васяткин А.Г. // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2010. №4. С. 209–215.
23. Лежкин С.И., Сорокин А.Л., Прибатурина Н.А. Эволюция давления и температуры при внезапном контакте холодной воды и насыщенного пара // Труды Института механики УНЦ РАН. 2007. С. 261–266.
24. Лежкин С.И., Сорокин А.Л. Моделирование эволюции импульса разрежения при контакте холодной жидкости и насыщенного пара // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17. №3. С. 397–400.
25. Эволюция межфазной поверхности тепломассообмена в барботируемом слое / Жуков В.П., Барочкин Е.В., Ненаездников А.Ю., Беляков А.Н., Росляков А.Н. // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2012. Вып. 4. С. 1–5.
26. Крюков А.П., Ястребов А.К. Тепломассоперенос через пленку пара с учетом движения межфазной поверхности жидкость–пар и роста температуры границы раздела фаз // Теплофизика высоких температур. 2006. Т. 44. №4. С. 560–567.
27. Логинов В.С., Озерова И.П. Оценка нестационарной теплоотдачи при пленочной конденсации пара на вертикальной стенке // Известия Томского политехнического университета. 2003. Т. 306. №6. С. 67–69.
28. Петушков В.А., Мельситов А.Н. Двухфазное парожидкостное течение в переходных режимах // Математическое моделирование. 2003. Т. 15. №10. С. 109–128.
29. Евдокимов С.И., Дацьев М.С., Подковыров И.Ю. Разработка новой схемы и способа флотации руд Олимпиадинского месторождения // Изв. вузов. Цветная металлургия. 2014. №1. С. 3–11.
30. Евдокимов С.И., Герасименко Т.Е. Извлечение золота из руд флотацией в условиях тепломассообмена между фазами // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т. 15. №4. С. 10–18.

References

1. Mikhailov B.K., Ivanov A.I., Vartanyan S.S., Benevol'sky B.I. Mineral resource base of gold in Russia: state and development prospects. *Mineralnye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie* [Mineral Resources of Russia. Economics and Management], 2014, no. 6, pp. 9–13. (In Russ.)
2. Panov R.S. On the results and problems of the development of the mineral resource base of Russia based on the operating results of JSC Rosgeologia in 2018. *Mineralnye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie* [Mineral Resources of Russia. Economics and Management], 2019, no. 1, pp. 4–5. (In Russ.)
3. Alekseev Ya.V., Korchagina D.A. Raw material base of ore gold in Russia: the state of development and development prospects until 2040. *Mineralnye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie* [Mineral Resources of Russia. Economics and Management], 2020, no. 4-5, pp. 3–7. (In Russ.)

4. Kashuba S.G. Gold mining industry in Russia: state and prospects. *Mineralnye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie* [Mineral Resources of Russia. Economics and Management], 2020, no. 4-5, pp. 48–52. (In Russ.)
5. Zaernyuk V.M., Chernikova L.I., Zabaykin Yu.V. Trends, problems and prospects for the development of the gold mining industry in Russia. *Finansovaya analitika: problemy i resheniya* [Financial Analytics: Problems and Solutions], 2017, vol. 10, no. 9, pp. 972–986. (In Russ.)
6. Evdokimov S.I., Gerasimenko T.E., Trotsenko I.G. Feasibility study of the joint processing of gold ores and placers. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2020, vol. 18, no. 4, pp. 12–23. (In Russ.)
7. Shikhalev S.V., Minukhin L.A., Reshetnikov I.F. The processes of heat and mass transfer during condensation of steam from a steam-gas mixture on a horizontal flat surface of facilities with a jacket. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv* [Food Processing: Techniques and Technology], 2014, no. 3, pp. 103–107. (In Russ.)
8. Miller J.D., Wang X., Jin J., Shrimali K. Interfacial water structure and the wetting of mineral surfaces. *International Journal of Mineral processing*, 2016, vol. 156, pp. 62–68.
9. Boinovich L., Emelyanenko A. Wetting and surface forces. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2011, vol. 165, no. 2, pp. 60–69.
10. Zheng J.-M., Chin W.-C., Khijniak E., Khijniak E., Pollack G.H. Surfaces and interfacial water: Evidence that hydrophilic surfaces have long-range impact. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2006, vol. 127, issue 1, pp. 19–27.
11. Pan L., Jung S., Yoon R.-H. Effect of hydrophobicity on the stability of the wetting films of water formed on gold surfaces. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2011, vol. 361, issue 1, pp. 321–330.
12. Liang Y., Hilal N., Langston P., Starov V. Interaction forces between colloidal particles in liquid: Theory and experiment. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2007, vol. 134-135, pp. 151–156.
13. Liu J., Cui X., Xie L., Huang J., Zeng H. Probing effects of molecular-level heterogeneity of surface hydrophobicity on hydrophobic interactions in air/water/solid systems. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2019, vol. 557, pp. 438–449.
14. Mishchuk N. The model of hydrophobic attraction in the framework of classical DLVO forces. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2011, vol. 168, issues 1–2, pp. 149–166.
15. Eisenberg D., Kauzmann W. *Struktura i svoystva vody* [Structure and properties of water]. Leningrad: Gidrometrioizdat, 1975, 280 p. (In Russ.)
16. Evdokimov S.I., Panshin A.M., Solodenko A.A. *Mineralurgiya* [Minerallurgy], in 2 volumes, vol. 2, Achievements of Flotation. Vladikavkaz: OOO NPKP MAVR, 2010, 992 p. (In Russ.)
17. Verrelli D.I., Koh P.T.L., Bruckard W.J., Schwarz M.P. Variations in the induction period for particle–bubble attachment. *Minerals Engineering*, 2012, vol. 36–38, pp. 219–230.
18. Xia W. Role of surface roughness in the attachment time between air bubble and flat ultra-low-ash coal surface. *International Journal of Mineral Processing*, 2017, vol. 168, pp. 19–24.
19. Albijanic B., Ozdemir O., Nguyen A.V., Bradshaw D. A review of induction and attachment times of wetting thin films between air bubbles and particles and its relevance in the separation of particles by flotation. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2010, vol. 159, pp. 1–21.
20. Roldugin V.I. On a single mechanism of action of surface forces of different nature. *Kolloidny zhurnal* [Colloid Journal], 2015, vol. 77, no. 2, pp. 214–218. (In Russ.)
21. Roldugin V.I., Kharitonova T.V. Osmotic pressure or decompression? *Kolloidny zhurnal* [Colloid Journal], 2015, vol. 77, no. 6, pp. 783–791. (In Russ.)
22. Tarasov G.I., Sinitsyn A.N., Babin V.A., Bolshukhin M.A., Antipin S.G., Belin A.V., Vasyatkin A.G. Experimental studies of the conditions of vapor condensation in the presence of non-condensable gas on a vertical multi-row in-line bundle of weakly inclined coil pipes. *Izv. vuzov. Yadernaya energetika* [News of Higher Educational Institutions. Nuclear Power Engineering], 2010, no. 4, pp. 209–215. (In Russ.)
23. Lezhnin S.I., Sorokin A.L., Pribaturin N.A. Evolution of pressure and temperature upon a sudden contact of cold water and saturated steam. *Trudy Instituta mehaniki UNTS RAN* [Proceedings of the Institute of Mechanics of the Ufa Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2007, pp. 261–266. (In Russ.)
24. Lezhnin S.I., Sorokin A.L. Simulation of the evolution of the rarefaction pulse upon contact of cold liquid and saturated vapor. *Teplofizika i aeromechanika* [Thermophysics and Aeromechanics], 2010, vol. 17, no. 3, pp. 397–400. (In Russ.)
25. Zhukov V.P., Barochkin E.V., Nenaezdnikov A.Yu., Belyakov A.N., Roslyakov A.N. Evolution of the interfacial surface of heat and mass transfer in the bubbling layer. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Bulletin of Ivanovo State Power Engineering University], 2012, issue 4, pp. 1–5. (In Russ.)
26. Kryukov A.P., Yastrebov A.K. Heat and mass transfer through a vapor film taking into account the motion of the liquid-vapor interface and an increase in the temperature of the phase interface. *Teplofizika vysokikh temperatur* [High Temperature Thermal Physics], 2006, vol. 44, no. 4, pp. 560–567. (In Russ.)
27. Loginov V.S., Ozerova I.P. Assessment of unsteady heat transfer in film condensation of steam on a vertical wall. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Tomsk Polytechnic University], 2003, vol. 306, no. 6, pp. 67–69. (In Russ.)

28. Petushkov V.A., Melsitov A.N. Two-phase vapor-liquid flow in transient modes. *Matematicheskoe modelirovaniye* [Mathematical Modeling], 2003, vol. 15, no. 10, pp. 109–128. (In Russ.)
29. Evdokimov S.I., Datsiev M.S., Podkorytov I.Yu. Development of a new scheme and method for flotation of ores of the Olimpiada deposit. *Izv. vuzov. Tsvetnaya metallurgiya* [News of Higher Educational Institutions. Non-Ferrous Metallurgy], 2014, no. 1, pp. 3–11. (In Russ.)
30. Evdokimov S.I., Gerasimenko T.E. Extraction of gold from ores by flotation in the conditions of heat and mass transfer taking place between the phases. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2017, vol. 15, no. 4, pp. 10–18. (In Russ.)

Поступила 02.06.2021; принята к публикации 30.06.2021; опубликована 27.09.2021
Submitted 02/06/2021; revised 30/06/2021; published 27/09/2021

Евдокимов Сергей Иванович – доцент, кандидат технических наук, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Россия. Email: eva-ser@mail.ru

Герасименко Татьяна Евгеньевна – кандидат технических наук, начальник отдела интеллектуальной собственности, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Россия. Email: gerasimenko_74@mail.ru

Sergey I. Evdokimov – PhD (Eng.), Associate Professor, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia. Email: eva-ser@mail.ru

Tatiana E. Gerasimenko – PhD (Eng.), Head of the Intellectual Property Department, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia. Email: gerasimenko_74@mail.ru