

АНАЛИЗ КИНЕТИКИ ТЕЧЕНИЯ СМАЧИВАЮЩИХ ПЛЕНОК В ПРОЦЕССАХ ФЛОТАЦИИ

С.И. Евдокимов¹, Е.А. Гусева², М.В. Константинова², Е.В. Филюшина^{3,4}, Я.А. Тынченко^{3,4}

¹ Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Россия, e-mail: eva-ser@mail.ru

² Иркутский Национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

³ Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнёва, Красноярск, Россия

⁴ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

Аннотация: Работа направлена на получение новых знаний в области гидродинамического взаимодействия гидрофобных поверхностей с целью повышение извлечения микродисперсий минералов методом флотации. Для повышения извлечения мелкодисперсного золота использован эффект высокой скорости налипания мелких частиц на крупные путем введения в пульпу минералов-носителей в виде черного концентрата, выделенного из части руды. В этом режиме разделения минералов во флотационной системе одновременно увеличивается содержание целевого компонента, что способствует росту его извлечения в товарный продукт. Причем в операции, выдающей товарный продукт, аэрацию флотационной системы в течение короткого времени (примерно 15–25% от общего) осуществляют пузырьками воздуха, заполненными теплоносителем – горячим водяным паром – с целью дополнения сил, участвующих в разделении минералов, поверхностными силами структурного происхождения. В принятом режиме флотации влияние поверхностных течений под действием касательных напряжений – капиллярно-концентрационного, термокапиллярного и термоосмотического потоков – на кинетику утончения и прорыва межфазной пленки предложено учитывать в виде поправки к длине скольжения жидкости в гидрофобном зазоре. Величина поправки выражается в долях предельной толщины смачивающей пленки, определяемой из условия неизменности ее толщины при равенстве потоков в межфазном зазоре – вытекающего (за счет действия прижимной силы) и втекающего (течений Марангони и термоосмотического потока). На пробах золотосодержащих руд двух месторождений выполнены эксперименты по флотации золота в условиях, моделирующих непрерывный процесс. Показаны технологические преимущества разработанной схемы и режима флотации микродисперсий золота в сравнении с базовой технологией.

Ключевые слова: микродисперсии золота, флотация, минералы-носители, смачивающая пленка, устойчивость, скольжение, поправка, кинетика течения, непрерывные процесс.

Благодарность: Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (соглашение № 23-27-00093).

Для цитирования: Евдокимов С. И., Гусева Е. А., Константинова М. В., Филюшина Е. В., Тынченко Я. А. Анализ кинетики течения смачивающих пленок в процессах флотации // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 11-1. – С. 207–225. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_111_0_207.

Analysis of the kinetics of the flow of wetting films in flotation processes

S.I. Evdokimov¹, E.A. Guseva², M.V. Konstantinova², E.V. Filushina^{3,4}, Ya.A. Tynchenko^{3,4}

¹ North Caucasus Mining-and-Metallurgy Institute (State Technological University), Vladikavkaz, Republic of North Ossetia-Alania, Russia, e-mail: eva-ser@mail.ru

² Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

³ Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia

⁴ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Abstract: The work is aimed at obtaining new knowledge in the field of hydrodynamic interaction of hydrophobic surfaces in order to increase the extraction of mineral microdispersions by the flotation method. In this work, to increase the recovery of finely dispersed gold, the effect of a high rate of sticking of small particles to large ones was used by introducing carrier minerals into the pulp in the form of a crude concentrate isolated from a part of the ore. In this mode of separation of minerals in the flotation system, the content of the target component simultaneously increases, which contributes to the growth of its extraction into a commercial product. Moreover, in the operation that produces a commercial product, the flotation system is aerated for a short time (approximately 15–25% of the total) with air bubbles filled with a coolant – hot water vapor – in order to supplement the forces involved in the separation of minerals with surface forces of structural origin. In the accepted flotation mode, the influence of surface flows under the action of shear stresses – capillary-concentration, thermocapillary and thermoosmotic flows – on the kinetics of thinning and breakthrough of the interfacial film is proposed to be taken into account in the form of a correction to the slip length of the liquid in the hydrophobic gap. The correction value is expressed in fractions of the limiting thickness of the wetting film, which is determined from the condition of invariance of its thickness when the flows in the interfacial gap are equal – outflowing (due to the action of clamping force) and inflowing (Marangoni flows and thermoosmotic flow). On samples of gold-bearing ores from two deposits, experiments were carried out on gold flotation under conditions simulating a continuous process. The technological advantages of the developed scheme and regime of gold microdispersion flotation are shown in comparison with the basic technology.

Key words: gold microdispersions, flotation, carrier minerals, wetting film, stability, slip, correction, flow kinetics, continuous process.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation, Grant No. 23-27-00093.

For citation: Evdokimov S. I., Guseva E. A., Konstantinova M. V., Filushina E. V., Tynchenko Ya. A. Analysis of the kinetics of the flow of wetting films in flotation processes. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(11-1):207-225. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_111_0_207.

Введение

В процессах флотации на этапе столкновения частицы с пузырьком их взаимодействие через слои жидкости, внутри которых сохраняются свойства объемной фазы, определяется гидродинамическими силами [1, 2].

Количественной характеристикой транспортной стадии гидродинамического взаимодействия частиц с пузырьком (рис. 1, а) является коэффициент захвата E , который принято определять отношением сечения столкновения σ — сечения трубки радиусом b_c , ограничен-

ного предельными линиями (поверхностями) тока течения жидкости

$$\sigma = \pi b^2, \quad (1)$$

создаваемого всплывающим пузырьком, при движении по которым частица еще захватывается поверхностью пузырька радиусом R_b :

$$E = \frac{b_{cr}^2}{R_b^2}. \quad (2)$$

Величина b характерна в том отношении, что при $b < b_{cr}$ частица соударяется с поверхностью пузырька; при $b > b_{cr}$ взаимодействие частицы и пузырька заканчивается без соударения.

На этапе закрепления, когда частица сближается с поверхностью пузырька до расстояний, на которых перекрываются поверхностные межфазные слои со свойствами, отличными от объемных, начинают преобладать поверхностные силы [3–5]. Главным критерием и одновременно следствием наступления перекрытия поверхностных слоев служит появление расклинивающего давления.

Однако гидродинамические силы продолжают действовать на расстояниях, на которых основная роль принадлежит поверхностным силам. Прежде всего, к ним добавляются силы, определяющие скорость утончения смачивающей пленки и образования краевого угла смачивания — необходимого и достаточного условия закрепления частицы на поверхности пузырька. Толщина смачивающей пленки снижается тем быстрее, чем больше скорость удаления жидкости из межфазного зазора, разделяющего частицу и поверхность пузырька. Требуемая для закрепления частицы на поверхности пузырька скорость межфазного потока определяется временем контакта двух фаз при столкновении, которое не превышает 5–10 мс [6].

При снижении гидрофильности твердой поверхности происходит усиление структурного притяжения и ослабление структурного отталкивания, что и приво-

дит к снижению толщины смачивающей пленки, отвечающей смене знака структурной составляющей расклинивающего давления.

Минимальное время, необходимое для закрепления частицы на пузырьке, оценивают по экспериментально определяемому времени индукции [7, 8].

При большой толщине устойчивой смачивающей пленки и времени закрепления, превышающем время контакта, взаимодействие частицы и пузырька завершается без образования флотокомплекса.

При флотации в зависимости от физико-химических свойств поверхности в дефектах граней минералов удерживаются пузырьки воздуха (размером 10^{-3} – 10^{-1} мм) или, наоборот, микротрещины и микроканалы на поверхности минералов могут быть заполнены жидкостью. Первый случай относят к режиму гетерогенного смачивания твердой (шероховатой) поверхности Касси-Бакстера и второй — к гомогенному смачиванию Венцеля-Дерягина [9–11].

Во флотационной пульпе растворено до 5×10^{-3} М воздуха. При гидродинамическом взаимодействии гидрофобных поверхностей реакцией флотационной системы на их сближение (ограничение размерности объемной жидкости) может быть ее переход в метастабильное состояние — выделение в наноразмерном межфазном зазоре растворенного воздуха с образованием поверхностного газо-жидкостного слоя с пониженной по сравнению с жидкостью в объеме вязкостью [12–14].

При течении смачивающих пленок вдоль гидрофобной поверхности экспериментально наблюдаемый поток жидкости превышает ожидаемый при выполнении граничного условия прилипания. Полученные результаты интерпретируют с привлечением граничного условия скольжения. Скольжение обусловлено на-

личием на твердой поверхности «гидрофобного покрытия» в виде газожидкостного слоя с пониженной вязкостью. При переходе от режима движения «жидкость — твердая» поверхность (условие прилипания [15]) к режиму движения «жидкость — газ» (условие скольжения [16]) напряжение сдвига (коэффициент трения) уменьшается, что интенсифицирует течение жидкости.

При наличии градиента температуры другими причинами, влияющими на течение смачивающих пленок, являются напряжения сдвига, обусловленные перераспределением адсорбированного поверхностно-активного вещества по поверхности пленки — термокапиллярные и термоосмотические потоки (потоки Марангони [17]), а также не связанный с градиентом поверхностного натяжения термоосмотический поток [18].

Направление и интенсивность поверхностных течений оказывает влияние на истечение жидкости из межфазного зазора под влиянием перепада давления, вызванного силой инерции сближающейся с пузырьком частицы, и в итоге — на предельную толщину смачивающей пленки и минимальное время, необходимое для закрепления частицы (время индукции [19]).

В настоящем исследовании кинетика поверхностных течений, вызванных указанными выше механизмами, является предметом теоретической оценки. Кинетика течения межфазных жидкостей — симметричных и смачивающих пленок [20] — в условиях действия поверхностных сил [21 — 24] является научной основой для решения ряда актуальных задач практики. Одной из важнейших задач среди них является задача обогащения руд флотацией [25 — 28].

Частным случаем такой задачи является извлечение золота [29 — 32], кондиционирование вод и очистка промышленных стоков и др.

Целью работы является исследование влияния течения смачивающих пленок на результат извлечения из руд микродисперсий минералов методом флотации разработанным способом с использованием минералов-носителей и присадкой теплоносителя к воздуху, подаваемому для аэрации флотационной системы.

Материалы и объект исследования

Натурные эксперименты по флотации разработанным способом выполнены на пробах руд месторождения Наталка (Магаданская обл.) и Олимпиада (Красноярский край).

По данным скантинилляционного спектрального анализа золото в пробе руд месторождения Наталка распределено по классам крупности хаотично.

Максимальный размер частиц достигает 0,8 мм. По массе преобладает тонкое золото размером 0 — 5 мкм. Его доля составляет практически 30% от общей массы металла. Порядка 20% ценного компонента представлено частицами размером 5 — 10 мкм. По 12,8% золота сосредоточено в классах крупности 20 — 38 и 150 — 250 мкм. Около 7% металла составляют зерна крупностью 250 — 500 мкм. В других классах крупности присутствует менее 5% золота. Суммарное количество «крупного» золота размером более 0,071 мм составляет 32%.

Частицы металла имеют ярко-желтую окраску, в редких случаях покрыты тонкой пленкой гидроксидов железа. Размер зерен колеблется от первых микрометров до 250 мкм, преобладают частицы размером 10 — 30 мкм. Проба золота в руде — 801‰.

При изучении микрорельефа выполнены снимки частиц золота в режиме излучения обратно отраженных электронов (рис. 1).

В пробе руд месторождения Олимпиада с вкрапленной текстурой сульфид-

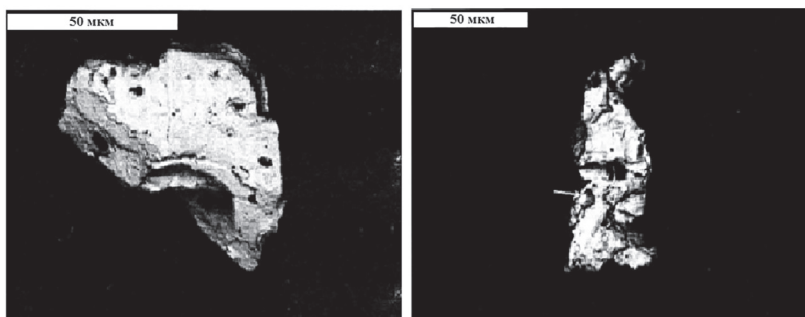


Рис. 1. Морфология золота руд месторождения Наталка: субидиоморфная частица с гексагональными включениями кварца и ортогональными включениями пирита (а) и интерстициальная золотина размером 35×75 мкм с протогенетическим включением галенита (отмечено стрелкой) (б)

Fig. 1. Morphology of gold from the Natalka deposit: a subhedral particle with hexagonal inclusions of quartz and orthogonal inclusions of pyrite (a) and interstitial gold 35×75 μm in size with a protogenetic inclusion of galena (marked with an arrow) (b)

ды представлены арсенопиритом, пирротинном и антимонитом, размещенными в виде незначительной примеси в массе нерудных минералов — кальцита (35–40%), кварца (30–43%), мусковита (8–10%) и биотита (10–15%), хлорита, серицита и ряда других минералов.

В рудах 75,8% свободного золота заключено в классе крупности (–12+3) мкм, в том числе 31,7% Au имеет крупность (–5+3) мкм, 29,0% Au — (–9+5) мкм, еще 15,1% Au — (–12+9) мкм; остальное золото имеет крупность (–25+12) мкм.

Самородное золото связано с кварцем (35%), арсенопиритом (35%), пиритом и марказитом (15%), пирротинном (5%), бертьеритом и антимонитом (5%), карбонатами (5%), а также (единичные зерна) с халькопиритом, тетраэдритом и мусковитом. При измельчении руд до крупности –74 мкм содержание свободного золота составляет 15%.

Основную массу составляют зерна золота, поверхность которых подвергнута техногенному воздействию. Золото представлено раскатанными тонкими пластинками, контуры которых разорваны; отмечены зерна золота продолговатой формы. Цвет золота ярко-желтый и соломенно-желтый. Поверхность единичных зерен покрыта оксидными пленка-

ми. Текстура поверхности зерен в основном бугристая, пористая и шероховатая.

Золото высокопробное — 950‰; в виде примесей содержит ртуть, серебро, медь, железо, сурьму, мышьяк, серу.

Свободное золото определяли методом амальгамации измельченных навесок (1000 г) руды, а золото в сростках — цианированием с перемешиванием в течение 72 ч. Кислород вводили в виде перекиси бария, кроме того, склянки периодически открывали для доступа свежего воздуха.

Для определения золота, покрытого пленками («в рубашке»), хвосты I цианирования обрабатывали соляной кислотой в присутствии восстановителя — хлористого олова (для исключения растворения золота). Остаток после кислотной обработки отмывали горячей и холодной водой (до нейтральной реакции промывных вод) и подвергали II цианированию. В итоге в раствор переходило золото, покрытое пленками, а золото в кварце и сульфидах — в хвосты.

Золото в кварце определяли путем растворения сульфидов в царской водке и анализа остатка на золото. Золото в сульфидах определяли по разности между содержанием золота в материале до

разложения сульфидов царской водкой и после разложения.

Для измерения времени индукции отобраны зерна золота однотипной морфологии — доминируют чешуйки, тонкие пластинки и листочки (с коэффициентом уплощенности на уровне 5–10) ярко-желтого цвета. По данным шести микронзондовых определений уплощенные зерна золота имеют на периферии высокопробную кайму (960%) с извилистым и неровным контуром (толщиной преимущественно не более 20 мкм) и центральную часть пониженной пробы (910%). Элементами-примесями в металле являются серебро (0,19%), медь (0,20%) и ртуть (0,20%). При отсутствии сростаний с минералами россыпи и видимых гипергенных изменений рельефа поверхности зерен золота разный — шагреневый, мелкокачестый, сотовидный и др. Масса зерен золота крупностью от 40 до 250 мкм изменяется от 0,0005 до 0,04 мг; с ростом крупности зерен золота до 315 мкм их масса увеличивается до 0,1–0,8 мг.

При проведении седиментометрического анализа мелкодисперсных суспензий его точность может быть понижена в результате коагуляции частиц.

При проведении седиментометрического анализа концентратов его точность α на уровне $\alpha = 10\%$ поддерживали, исходя из следующих условий его проведения.

Поскольку броуновская коагуляция определяет изменение концентрации частиц размером до 8–9 мкм [33], то заданную точность измерений найдем как

$$t \times \tau^{-1} \leq \alpha, \quad (3)$$

где t — время седиментации (гравитационной коагуляции); τ — время полукоагуляции, входящее в уравнение Смолуховского

$$v_t = \frac{v_0}{1 + t \times \tau^{-1}}, \quad (4)$$

описывающее изменение в суспензии в течение времени t концентрации частиц от начальной v_0 до текущей v_t . С учетом выражений для t и τ [34] отношение (3) перепишем в форме

$$\frac{9kTHc}{2\pi(\rho_p - \rho_l)\rho_p g R_p^5} \leq \alpha, \quad (5)$$

которая при условии $T = 293$ К и $g = 981$ см/с² принимает вид

$$\frac{5907Hc}{(\rho_p - \rho_l)\rho_p R_p^5} \leq \alpha. \quad (6)$$

Здесь H — высота слоя суспензии; R_p — радиус частицы; ρ_p — плотность материала частицы; ρ_l — плотность жидкости; c — концентрация твердого в суспензии. Для повышения надежности получаемых данных соотношение (5) использовали при выполнении седиментометрического анализа концентратов.

Теоретические положения

При всплывании поверхность пузырька обтекают потоки жидкости. Характер обтекания — вязкий или потенциальный — определяется скоростью потока и свойствами несущей среды [35]. При сближении с пузырьком крупные частицы под действием сил инерции отклоняются от линий тока жидкости, сталкиваясь с поверхностью пузырька. Малые частицы (размером 20–30 мкм) следуют линиям тока жидкости, огибающим пузырек. Эффективный захват частицы R_p пузырьком R_b за счет сил инерции возможен при условии, что размер частицы превышает некоторый предельный размер — $R_p > R_{\text{пр}}$. Поэтому в случае крупных частиц лимитирующей стадией элементарного акта флотации является стадия прилипания, в то время как для малых частиц — перенос к поверхности пузырька [36].

В случае мелких частиц флотокомплекс образуется при сближении частицы с пузырьком на расстояние h_{cr} , соизмери-

мое с радиусом действия дальнедействующих сил притяжения [37, 38], либо за счет повышенной скорости удаления жидкости из межфазного зазора и утончения смачивающей пленки до критической толщины h_{cr} , при которой она становится метастабильной и разрушается.

К дальнедействующим силам относят поверхностные силы структурного происхождения, вызванные гидрофильным и гидрофобным взаимодействиями, связанные с отличием структуры и свойств воды в граничных слоях от их значений в объеме жидкости [39].

По Б.В. Дерягину гидрофильным взаимодействием можно назвать силы отталкивания между смачиваемыми водой поверхностями — структурной слагающей раскливающего давления, существующей независимо и параллельно от ионно-электростатической и молекулярной слагающих [20].

Действие сил гидрофобного притяжения проявляется в увеличении площади захода изотермы раскливающего давления в области его отрицательных значений и формировании значительных краевых углов смачивания ($\theta > 90^\circ$). Этот механизм образования флотокомплекса характерен для крупных частиц, траектория движения которых за счет сил инерции отклоняется от линий тока жидкости и подходит к поверхности пузырька на расстояние порядка h_{cr} .

В отсутствие поверхностного газожидкостного слоя Н.В. Чураев [23] связывает природу гидрофильного взаимодействия с нормальной ориентацией диполей воды в плотном слое жидкости вблизи гидрофильной поверхности, а гидрофобного взаимодействия — с тангенциальной ориентацией диполей в слое воды пониженной плотности вблизи гидрофобной поверхности.

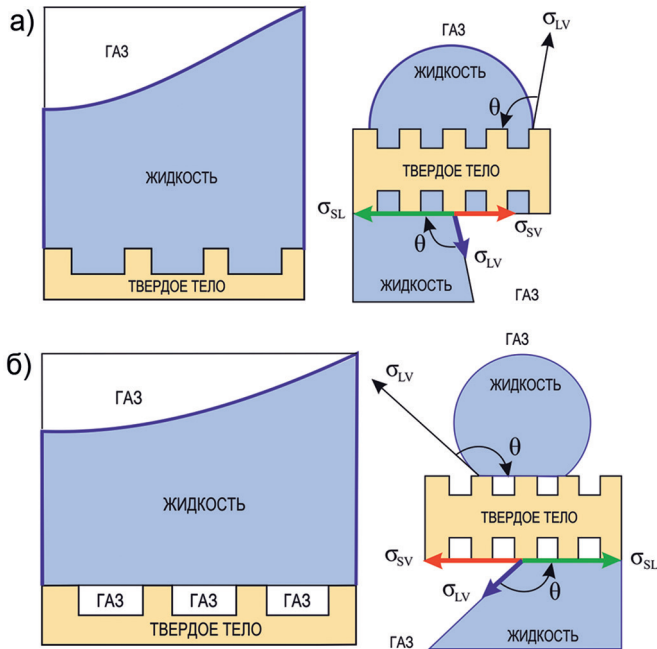


Рис. 2. Схематическое изображение смачивания поверхности минералов водой: в режиме Венцеля-Дерягина (а) и Касси-Бакстера (б)

Fig. 2. Schematic representation of wetting the surface of minerals with water: in the Wenzel-Deryagin (a) and Cassie-Baxter (b) modes

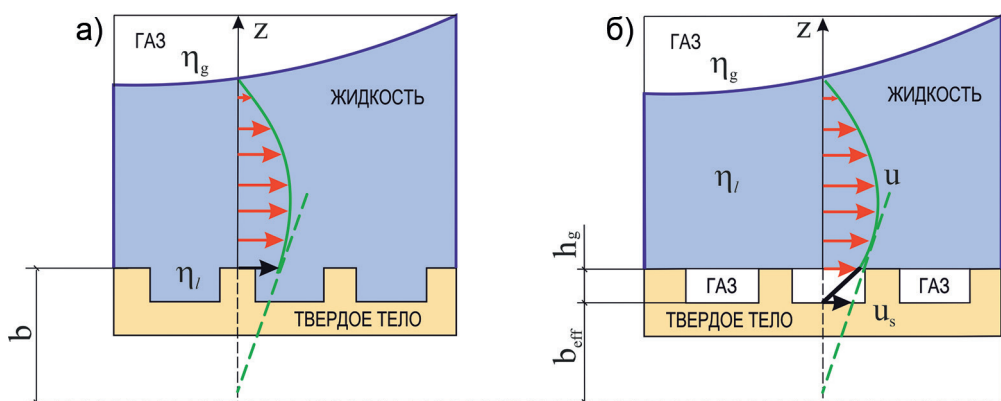


Рис. 3. Схематическое изображение молекулярного (а) и кажущегося (б) скольжения
 Fig. 3. Schematic representation of molecular (a) and apparent (b) slip

Отличие длины свободного пробега фононов, связанной с величиной энергетического барьера тепловых скачков, вблизи гидрофильной и гидрофобной поверхности приводит (по Л.Б. Бойнович) к необходимости учета «не-ДЛФО»-сил при описании устойчивости смачивающих пленок — сил структурного гидрофильного отталкивания и гидрофобного притяжения.

Поверхность минералов в зависимости от характера взаимодействия с жидкой фазой может быть смочена в режиме Венцеля-Дерягина (рис. 2, а) или Касси-Бакстера (рис. 2, б).

Режим смачивания Венцеля-Дерягина (рис. 2, а) относят к гомогенному типу, при котором образуются краевые углы смачивания небольшой величины. На поверхности минерала образуются краевые углы большой величины в случае ее гетерогенного смачивания в режиме Касси-Бакстера (рис. 2, б).

Для гомогенного смачивания характерно молекулярное (внутреннее) скольжение жидкости — увеличение потока жидкости вдоль поверхности по сравнению с ожидаемым при выполнении условия прилипания (рис. 3, а).

Гетерогенное скольжение (неточное соблюдение граничного условия прилипания-скольжение потока жидкости по

твердой поверхности) связано с наличием на гидрофобной поверхности слоя пониженной вязкости (образуемого за счет расслоения насыщенного газожидкостного раствора при утончении межфазного зазора (рис. 4, а) [40]) или микрокаверн (субмикроролостей) с удерживаемыми силами поверхностного натяжения пузырьками газа размером $10^{-4} - 10^{-2}$ см (при шероховатой поверхности (рис. 1, б) [41]).

При гетерогенном смачивании расстояние от стенки до точки, определяемой путем экстраполяции эпюры скорости до нуля (что соответствует строгому выполнению условия прилипания), представляет собой эффективную длину скольжения b_{eff} (рис. 3, б). Макроскопическое скольжение на такой поверхности является следствием пониженного трения между жидкостью и газом.

Условие скольжения Навье (при нулевой нормальной компоненте вектора скорости $u_n = 0$ касательная компонента скорости u_s пропорциональна касательному напряжению):

$$u_s = b_{\text{eff}} \left(\frac{\partial u}{\partial n} \right), \quad (7)$$

где b_{eff} — кажущаяся длина скольжения, значение которой при толщине пристенного газожидкостного слоя h_{gl} можно найти из соотношения

$$b_{eff} = h_{gl} \left(\frac{\eta_l}{\eta_{gl}} \right). \quad (8)$$

При флотации паровоздушной смесью [41–43] длина проскальзывания должна быть учтена поправкой k_E в виде

$$k_E = \frac{\Delta\sigma_{\square}}{\Delta\sigma_T}, \quad (9)$$

учитывающей появление касательных напряжений, связанных с адсорбционным слоем ПАВ

$$\Delta\sigma_T = (\partial\sigma / \partial\Gamma) \Delta\Gamma \quad (10)$$

и градиентом температуры

$$\Delta\sigma_T = (\partial\sigma / \partial T) \Delta T. \quad (11)$$

Причем скорость переноса тепла выше скорости переноса массы (число Шмидта на три порядка больше числа Прандтля), и при $k_E < 1$ адсорбционная конвекция полностью подавляется встречным тепловым течением Марангони в сторону периферии смачивающей пленки.

При $k_E \sim 1$ между встречными касательными напряжениями существует динамический баланс, при котором генерируемые концентрационный и тепловой потоки имеют примерно одинаковую интенсивность. В этих условиях при тангенциальной скорости истечения жидкости из межфазного зазора $u(r, z)$ формируется смачивающая пленка, предельная толщина которой h_{lim} определяется выражением

$$2\pi r \int_0^{h_{lim}} u(r, z) dz = 0. \quad (12)$$

При $k_E > 1$ втекающий в межфазный зазор концентрационно-капиллярный поток приводит к росту значения h_{lim} .

Физически h_{lim} соответствует предельному расстоянию, на которое частица может сблизиться с поверхностью пузырька при данных условиях их гидродинамического взаимодействия. С учетом схемы сдвигового потока [42] выражение для определения скорости u в сдвиговом потоке жидкости в точке x ,

расположенной в зазоре толщиной L (по оси Ox) между двумя параллельными пластинами, получим в виде:

$$u = u_S + u_{h_{gl}} \frac{x}{h_{gl}} \quad \text{при } 0 < x < h_{gl}, \quad (13)$$

$$u = u_S + u_{h_{gl}} + \left(\Delta u - 2u_{h_{gl}} \right) \frac{x - h_{gl}}{L - 2h_{gl}}$$

$$\text{при } h_{gl} < x < (L - h_{gl}), \quad (14)$$

$$u = u_S + \Delta u + u_{h_{gl}} \frac{x - L}{h_{gl}}$$

$$\text{при } (L - h_{gl}) < x < L. \quad (15)$$

Здесь u_S , $u_{h_{gl}}$ — скорость жидкости на поверхности твердого тела и на расстоянии толщины слоя жидкости h_{gl} с измененными по сравнению с объемом структурой и свойствами; Δu — относительная скорость потока жидкости относительно оси Oy . Отсюда

$$\eta_{gl} \frac{u_{h_{gl}}}{h_{eff}} = \eta_l \frac{\Delta u - 2u_{h_{eff}}}{L - 2h_{eff}} \quad (16)$$

и

$$\begin{aligned} \frac{u_{h_{eff}}}{h_{eff}} &= \frac{\eta_l}{\eta_{gl} L - 2h_{gl} (\eta_l - \eta_{h_{eff}})} = \\ &= \frac{\eta_l}{\eta_{gl} L + 2h_{eff} \left(\frac{\eta_l}{\eta_{gl}} - 1 \right)}. \end{aligned} \quad (17)$$

Из условия прилипания (1) выражение для длины проскальзывания получается в виде

$$b = h_{eff} \left(\frac{\eta_l}{\eta_{gl}} - 1 \right). \quad (18)$$

Здесь значение h_{eff} определяется выражением

$$h_{eff} = h_{gl} (1 + k_h), \quad (19)$$

где k_h — безразмерная толщина межфазной пленки. В качестве характерной величины использована предельная толщина пленки h_{cr}

$$k_h = \frac{h_{lim}}{h_{cr}}. \quad (20)$$

Связь между предельной толщиной межфазной пленки h_{lim} и временем контакта частицы с поверхностью пузырька

$$t_{pb} = R_b / u_b \quad (21)$$

и временем релаксации к состоянию нового равновесия пленки (определяется как время, по истечении которого объем вытекающей жидкости отличается не более чем на 1% от полного изменения объема при переходе пленки из одного состояния равновесия в другое) [43]

$$t_{rel} = (2\eta R_0^2 h_0^{m-2}) / mA \approx a^2 / D_s, \quad (22)$$

где R_0 – радиус кривизны невозмущенной пленки (мениска); A – константа Гамакера; $m = 1$ для пленки на цилиндре и $m = 2$ – на сфере, получена в виде [39]

$$h_{lim} = \frac{\gamma}{\eta} \frac{9\pi R a}{48 b} t g^2 \frac{\theta}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\mu_n^2 \left(1 + \frac{1}{2} \mu_n^2 \chi\right)}, \quad (23)$$

где $\chi = t_{pb} / t_{rel}$. При сближении с пузырьком частица преодолевает потенциальный барьер, создаваемый поверхностными силами, т.е. их гидродинамическое взаимодействие является активационным процессом. Для этих процессов (в том числе для температурной зависимости динамической вязкости жидкости – η) справедлива аппроксимация Аррениуса-Френкеля:

$$\eta = B \exp(E_a / k_B T), \quad (24)$$

где B – предэкспоненциальный множитель с размерностью вязкости; U – энергия активации вязкого течения (энергетический барьер процесса флуктуационного перехода); k_B – константа Больцмана; T – абсолютная температура, которую при анализе зависимости $h_{lim} = f(\chi)$ запишем в виде

$$\chi = B \exp(E_a / k_B T), \quad (25)$$

где

$$\chi = \frac{t_K - t_{\Sigma}}{|\varepsilon \times \cos \theta_{eff} \times t_{rel}|} = \frac{t_{ind}}{|\varepsilon \times \cos \theta_{eff} \times t_{rel}|} \quad (26)$$

Здесь t_K – время контакта частицы с поверхностью пузырька;

$$t_{\Sigma} = b / v_{\Gamma} + b / v_{\Gamma} + b / v_{\chi} -$$

поправка на проскальзывание жидкости;

$$v_{\Gamma} = R_b \eta_l^{-1} (\partial \sigma / \partial C) \Delta C -$$

скорость капиллярно-концентрационного потока [7, 8];

$$v_{\Gamma} = R_b \eta_l^{-1} (\partial \sigma / \partial T) \Delta T -$$

скорость термокапиллярного потока [7, 8];

$$v_{\chi} = 2h\chi R_b T (\partial T / \partial R_b) -$$

скорость термоосмотического потока [43];

θ_{eff} – эффективный краевой угол смачивания; ΔT , ΔC – перепад по длине межфазной пленки температуры и концентрации ПАВ; $\chi = 7,5 \times 10^{-3} \text{ см}^2/\text{с}$ – коэффициент термоосмоса для воды [43]; t_{ind} – время индукции; ε – доля прилипших частиц при заданном времени контакта t_K .

Значение краевого угла смачивания θ ($\theta \in 90 - 180^\circ$) определяется физико-химическими свойствами поверхности твердого тела, и в режиме гетерогенного смачивания шероховатой поверхности Касси-Бакстера связь эффективного краевого угла смачивания θ_{eff} с краевым углом определяется уравнением Юнга, θ_0 , дается соотношением [41]:

$$\cos \theta_{eff} = f(r \times \cos \theta_0 + 1) - 1, \quad (27)$$

где $f \in 0 \div 1$ – доля площади поверхности, смоченной в гомогенном режиме Венцеля-Дерягина; r – коэффициент, учитывающий отклонение краевого угла Юнга от краевого угла, измеряемого на шероховатой поверхности.

При $f \rightarrow 1$ режим гомогенного смачивания Венцеля-Дерягина, отвечающий граничному минимуму свободной энергии, сменяет локальный минимум, соответствующий гетерогенному смачиванию Касси-Бакстера.

И, наоборот, при $f \rightarrow 0$ минимум свободной энергии становится глобальным (меньше граничного, что приводит к уменьшению смачиваемости поверхности твердого тела.

После логарифмирования соотношения (2)

$$\ln \chi = \ln \left[\frac{t_k - t_\Sigma}{\varepsilon \times \cos \theta_{eff} \times t_{rel}} \right] = \quad (28)$$

$$= \ln A - \frac{E_a}{k_B T} = -\frac{E_a}{k_B T} + C$$

приведем его к следующей удобной форме для анализа гидродинамического взаимодействия частицы и пузырька воздуха:

$$t_k = t_\Sigma + \left| \varepsilon \times \cos \theta_{eff} \times t_{rel} \right| \times \quad (29)$$

$$\times \exp(E_a / k_B T + C)$$

Результаты и обсуждение

Получена зависимость времени индукции при прилипании пузырька воздуха к зернам кварца от температуры. В эксперименте использован стекольный кварц Благодарненского месторождения со следующим химическим составом: 97,07% SiO₂, 0,34% Fe₂O₃, 1,06% Al₂O₃, 0,09% TiO₂, 0,007% Cr₂O₇, 0,31% CaO, 0,27% MgO, 0,03% MnO, 0,14% K₂O, 0,07% Na₂O, 0,09% SO₃, 0,52% п.п.п. Фракция кварца крупностью (-0,500+0,140) мкм представлена прозрачной в проходящем свете, практически без каких-либо примесей. Зерна минерала имеют изометричную или хорошо округленную овальную форму, гладкий микрорельеф поверхности. Из мелкой фракции просмотром под бинокулярным микроскопом были удалены полупрозрачные зерна полевых шпатов и слюд, а также магнетит и другие непрозрачные минералы. Из материала также удалены зерна с мелкими и крупными сколами, трещинами, ямками выщелачивания и прочими механическими дефектами. Низкая удельная поверхность (~0,8 м²/г) кварца свидетельствовала об отсутствии микропористых зерен.

С использованием контактного прибора для измерения времени индукции

определены значения чисел адгезии при различном времени контакта зерен золота с пузырьком воздуха. За число адгезии принимали число случаев прилипания частиц к пузырьку воздуха при заданном времени контакта t_k , мс, (10 измерений).

Из полученных экспериментальных результатов следует, что переход смачивающей пленки в метастабильное состояние, необходимое для начала процесса массового прилипания частиц к поверхности пузырька, происходит с некоторой задержкой времени. Для образования флотокомплекса частица должна преодолеть потенциальный барьер, и ее взаимодействие с поверхностью пузырька является процессом активационным.

Сделанный вывод не противоречит фононному механизму поверхностных сил, в рамках которого динамические процессы, происходящие в тонких межфазных пленках, связаны с энергетическим барьером тепловых скачков, частотным спектром жидкости и влиянием на них характера взаимодействия жидкости с поверхностью (ее гидрофобности/гидрофильности).

Результаты экспериментов обработаны в координатах уравнения Аррениуса-Френкеля — $\ln \chi - 1/T$.

Установлено, что линейные уравнения в полулогарифмических координатах $\ln \chi - 1/T$ удовлетворительно (коэффициенты корреляции $R = 0,947 - 0,950$) описывают температурную зависимость исследуемой функции $\ln \chi$. С ростом крупности зерен золота линейность температурной зависимости $\ln \chi$ сохраняется. Следовательно, энергия активации E_a не зависит от величины поверхности твердого тела (в пределах ошибки графо-аналитической методики определения E_a).

В координатах $\ln \chi - 1/T$ угол наклона прямых к оси $1/T$ уменьшается при переходе от кварца крупностью (-250+

+200) мкм к молибдениту той же крупности и затем к типичному сульфиду — галениту крупностью (-250+200) и (-160+140) мкм. Полученные результаты находятся в соответствии с имеющимися представлениями о зависимости энергии активации от природы минерала и его поверхностных свойств.

С учетом уравнения (28) расчет энергии активации при прилипании пузырька воздуха к кварцу в присутствии хлористого кальция (30 мг/л) и переменного количества олеата натрия выполнен по соотношению:

$$E_a = k_b \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln \left(\frac{\chi_1}{\chi_2} \right) = k_b \frac{\Delta(\ln \chi)}{\Delta(1/T)}. \quad (30)$$

Следует отметить, что кажущаяся энергия активации не зависит от размера частиц и от дополнительных динамических воздействий (прямые $\lg t - 1/T$ параллельны).

Но кажущаяся энергия активации при переводе граничных слоев в лабильное состояние зависит от природы минералов, особенностей их генезиса и последующей подготовки — она зависит от физико-химических свойств поверхности минерала.

Введение в суспензию собирателя резко уменьшает энергию активации для перевода в лабильное состояние граничных слоев между минеральной поверхностью и пузырьком воздуха. Чем выше концентрация собирателя в растворе и, следовательно, чем больше его на минеральных гранях, тем меньше энергия активации.

Для выдавливания молекул воды из граничного слоя, даже приведенного в лабильное состояние, необходимо определенное время, и тем большее, чем тоньше должна быть остаточная пленка, толщина которой определяет притяжение частицы к пузырьку.

Сорбция собирателя на поверхности минерала приводит к глубокому нарушению строения смачивающей пленки, следствием чего является лабилизация граничных слоев.

Закрепление частицы на поверхности пузырька с образованием краевого угла смачивания возможно при толщине смачивающей пленки $h = h_{cr} \approx 10$ нм, при которой интенсивность гидрофобного взаимодействия (сил структурного притяжения) начинает нарастать, а гидрофильного взаимодействия (сил структур-

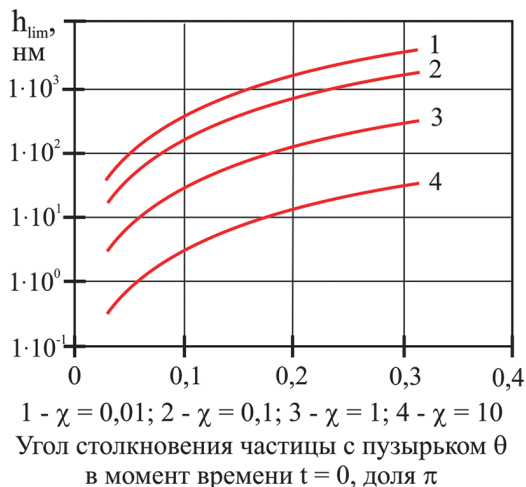


Рис. 4. Предельная толщина межфазной пленки h_{lim} как функция θ и χ

Fig. 4. Limiting thickness of the interfacial film h_{lim} as a function of θ and χ

ного отталкивания) ослабевать, что при дальнейшем утончении характеристик смачивающей пленки приводит к смене знака структурной составляющей расклинивающего давления [24, 43].

Исходя из этого условия, высокая вероятность осаждения частицы на поверхность пузырька существует только вблизи его верхнего полюса — при отклонении траектории частицы от вертикальной оси пузырька на незначительный угол $\theta_{cr} - \theta < \pi / 100 = \theta_{cr}$.

На рис. 4 приведены результаты расчета значений предельной толщины межфазной пленки h_{lim} по формуле (23) при различных факторах флотации.

Таким образом, с целью повышения эффективности процесса флотации гидрофобизацию поверхности извлекаемых минералов следует дополнить нагревом воды в поверхностном монослое пузырька воздуха. В обоих случаях имеет место ухудшение смачивания — в смачивающей пленке силы гидрофобного притяжения преобладают над силами гидрофильного отталкивания. На изотерме расклинивающего давления (рис. 5) это проявляется в виде увеличения захода изотермы в область отрицательных значений расклинивающего давления (когда площадь S_1 захода изотермы в область $\Pi > 0$ меньше площади графика S_2 в области $\Pi < 0$), что сопровождается еще большим ростом равновесного краевого угла смачивания.

В лабораторных условиях проведены исследования по оценке эффективности технологии флотационного обогащения золотосодержащих руд с использованием черного концентрата, выделенного из части руды в качестве минералов-носителей для повышения извлечения микродисперсий золота.

Извлечение золота из руд осуществляли по гравитационно-флотационной технологии, аналогичной принятой на действующей золотоизвлекательной фаб-

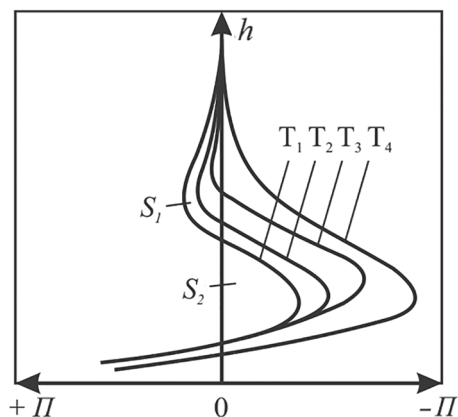


Рис. 5. Изменение формы изотермы расклинивающего давления $\Pi(h)$ смачивающих пленок на гидрофобной поверхности золота при увеличении температуры от T_1 до T_4

Fig. 5. Change in the shape of the disjoining pressure isotherm $P(h)$ of wetting films on the hydrophobic surface of gold with increasing temperature from T_1 to T_4

рике. Эксперимент выполнен по схеме, моделирующей замкнутый цикл обогащения. В «золотую головку» (817,88 г/т Au) методом гравитации извлечено 65,43% Au. Из хвостов гравитации золото доизвлекали методом флотации по схеме: операция основной флотации + две операции контрольной флотации с тремя перечистками черного концентрата. Для подавления органического углерода использовали крахмал из расчета 500 г/т, что позволяет понизить содержание углерода в концентрате от 6,1 до 1,4%, а извлечение — от 47,0 до 1,4%. Золотосодержащие сульфиды активировали сульфатом меди при загрузке карбоната натрия до pH 8,5 — 8,7. С использованием бутилового ксантогената и пенообразователя Т-92 во флотоконцентрат извлечено еще 15,28% Au.

Сравнение результатов, полученных при флотации руд месторождения Наталка с применением двух конкурирующих технологий, приводит к выводу, что одним из факторов, способствующих приросту извлечения золота, является увеличение извлечения в концентрат мел-

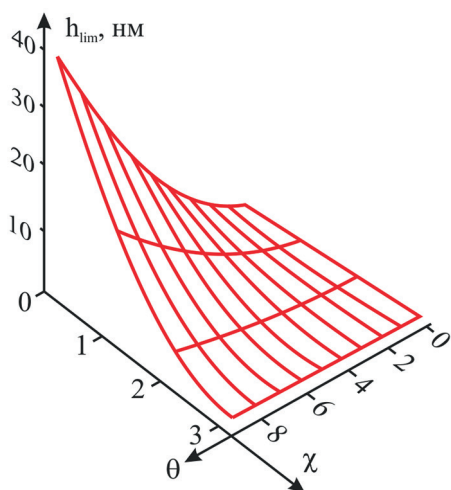


Рис. 6. Трехмерный график для системы $h_{lim}-\chi-\theta$
 Fig. 6. Three-dimensional graph for $h_{lim}-\chi-\theta$ system

ких фракций золотосодержащего материала.

Увеличение извлечения золота получено при повышении селективности процесса разделения минералов флотацией: содержание извлекаемого металла в концентрате, полученном при использовании вновь разработанной технологии составило 100,3 г/т против 65,09 г/т в базовой технологии. В результате повышения качества концентрата его выход уменьшился от 1,86 до 1,30%, что позволяет сократить затраты, связанные с его дорогостоящей металлургической подготовкой перед выщелачиванием золота.

Полученные технологические показатели в конкурирующих режимах флотации руд и результаты расчета, приведенные на рис. 6, подтверждают сделанный выше вывод о зависимости образования флотокомплекса от толщины h_{lim} : с уменьшением величины угла столкновения частицы с пузырьком θ и ростом величины параметра χ предельная толщина межфазной пленки h_{lim} уменьшается.

Снижение толщины h_{lim} обусловлено изменением изотермы структурных сил в результате смещения баланса между

силами структурного притяжения и отталкивания в сторону первых. В противном случае только в небольшой окрестности верхнего полюса пузырька частица может приблизиться к поверхности пузырька на расстояние, меньшее h_{cr} , что необходимо для прилипания.

Область углов θ , определяемых из условия

$$h_{lim}(\theta_{cr}) = h_{cr},$$

столь узка, что эффективность столкновения при условии стабилизирующего действия смачивающей пленки совершенно мала (рис. 6).

Заключение

Работа направлена на получение новых знаний в области гидродинамического взаимодействия гидрофобных поверхностей с целью повышения извлечения микродисперсий минералов методом флотации.

Гидродинамическое взаимодействие пузырька и малой частицы заключается в том, что при отсутствии явно выраженных сил инерции траектория частицы отклоняется от прямолинейной под действием поля скоростей жидкости, обтекающей пузырек, и образование флотокомплекса затрудняется. В то же время скорость налипания мелких частиц на крупные выше, чем скорость агрегации мелких частиц между собой. На примере флотации двух золотосодержащих руд показана возможность использования указанного эффекта для повышения извлечения мелкодисперсного золота при введении в пульпу минералов-носителей в виде черного концентрата, выделенного из части руды, и пузырьков воздуха, заполненных теплоносителем — горячим водяным паром.

Минералы-носители выделяют из параллельных потоков пульпы, причем исходное питание последующего потока пульпы смешивают с черновым (оборотным) концентратом, выделенным из пре-

дыдущего потока пульпы. Из последнего потока пульпы выделяют готовый черновой концентрат в режиме флотации пузырьками, заполненными горячим водяным паром, и направляют на очистку.

В принятом режиме выделения готового черного концентрата налипание мелкодисперсных минералов на крупные частицы минералов-носителей обусловлено переходом симметричной пленки между твердыми гидрофобными поверхностями в метастабильное состояние.

В случае смачивающей (несимметричной) пленки необходимым и достаточным условием образования флотокомплекса является снижение ее предельной толщины до критических значений, характерных для появления локализованных в тонком граничном слое жидкости поверхностных сил, определяющих устойчивость смачивающих пленок.

Динамический адсорбционный слой и градиент поверхностного натяжения жидкости являются причиной появления напряжений сдвига и вызванных ими поверхностных течений в смачивающей пленке, изменяющих ее равновесную толщину и устойчивость. Влияние таких течений на скорость утончения смачивающих пленок предложено учитывать в виде поправки к длине скольжения жидкости в гидрофобном зазоре.

Величина поправки выражается в долях критической толщины смачивающей пленки.

На пробах золотосодержащих руд двух месторождений выполнены эксперименты по флотации золота в условиях, моделирующих непрерывный процесс. Показаны технологические преимущества разработанной схемы и режима флотации микродисперсий золота в сравнении с базовой технологией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Xing Y., Xu M., Gui X., Cao Y., Rudolph M., Butt Y.-J., Kappl M. The role of surface forces in mineral flotation // *Current Opinion in Colloid & Interface Science*. 2019, vol. 44, pp. 143–152. DOI: 10.1016/j.cocis.2019.11.005.

2. Герасименко Т. Е., Рубаева И. О., Максимов Р. Н., Васильев В. В. Особенности взаимодействия полидисперсных частиц в процессах флотации микродисперсий золота // *Устойчивое развитие горных территорий*. – 2023. – Т. 15. – № 1. – С. 97–113. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-1-97-113.

3. Евдокимов С. И., Герасименко Т. Е., Максимов Р. Н., Клыков Ю. Г. Анализ сопряженного тепломассопереноса при аэрозольной флотации золота из россыпей // *Устойчивое развитие горных территорий*. – 2022. – Т. 14. – № 2. – С. 163–175. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-163-175.

Литературу с п. 4 по п. 27 смотри в REFERENCES.

28. Матвеева Т. Н. Флотационные реагенты для извлечения тонковкрапленного золота из труднообогатимых руд и техногенных продуктов // *Устойчивое развитие горных территорий*. – 2021. – Т. 13. – № 2. – С. 201–207. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-2-201-207.

29. Pan L., Jung S., Yoon R.-H. A fundamental study on the role of collector in the kinetics of bubble-particle interaction // *International Journal of Mineral Processing*. 2012, vol. 106-109, pp. 37–41.

30. Wang J., Yoon R.-H., Morris J. AFM surface force measurements conducted between gold surface treated in xanthate solutions // *International Journal of Mineral Processing*. 2013, vol. 122, pp. 13–21. DOI: 10.1016/j.minpro.2013.03.005.

31. Kempainen J., Aaltonen A., Sihvonen T., Leppinen J., Siren H. Xanthate degradation occurring in flotation process waters of a gold concentrator plant // *Minerals Engineering*. 2015, vol. 80. DOI: 10.1016/j.mineng.2015.05.014.

32. Санакулов К. С., Воробьев А. Е., Козырев Е. Н., Ляньцзы Ч. Физико-химические свойства наночастиц золота в рудах и катализаторах // Устойчивое развитие горных территорий. — 2022. — Т. 14. — № 4. — С. 676–684. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-4-676-684.

Литературу с п. 33 по п. 40 смотри в REFERENCES.

41. Евдокимов С. И., Герасименко Т. Е. Разработка режима флотации золотосодержащих руд смесью воздуха с водяным паром // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2021. — № 2. — С. 162–177. DOI: 10.15372/FTPRPI20210217.

42. Kondrakhin V. P., Klyuev R. V., Sorokova S. N., Efremkov E. A., Valuev D. V., Mengxu Q. Mathematical modeling and multi-criteria optimization of design parameters for the gyratory crusher // Mathematics. 2023, vol. 11, no. 10, article 2345. DOI: 10.3390/math11102345.

43. Евдокимов С. И., Панышин А. М., Солоденко А. А. Минералургия. Т. 2. Успехи флотации. — Владикавказ: ООО НПКП «МАВР», 2010. — 992 с. **PLAB**

REFERENCES

1. Xing Y., Xu M., Gui X., Cao Y., Rudolph M., Butt Y.-J., Kappl M. The role of surface forces in mineral flotation. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*. 2019, vol. 44, pp. 143–152. DOI: 10.1016/j.cocis.2019.11.005.

2. Gerasimenko T. E., Rubayeva I. O., Maksimov R. N., Vasiliev V. V. Peculiarities of poly disperse particle interaction in gold micro dispersions flotation processes. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023, vol. 15, no. 1, pp. 97–113. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-1-97-113.

3. Evdokimov S. I., Gerasimenko T. E., Maksimov R. N., Klykov Yu. G. Analysis of conjugate heat and mass transfer during aerosol flotation of gold from placers. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022, vol. 14, no. 2, pp. 163–175. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-163-175.

4. Gutarevich V. O., Klyuev R. V., Kukartsev V. A., Kukartsev V. V., Iushkova L. V., Korpacheva L. N. Reducing oscillations in suspension of mine monorail track. *Applied Sciences*. 2023, vol. 13, article 4671. DOI: 10.3390/app13084671.

5. Konyukhov V. Y., Permyakova D. N., Oparina T. A. Perspective for the use of industrial waste in lubricating compositions to reduce wear in friction pairs. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021, vol. 2061, no. 1, article 012046. DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012046.

6. Alizadeh M., Abdollahy M., Khalesi M. The effect of particle size analysis on bubble loading in column flotation using the models of sub-processes. *Journal of Mining Engineering*. 2017, vol. 12, no. 36, pp. 95–109.

7. Chen S., Zhou Y., Liu R., Zhou A., Qu J., Liu L., Zhang N., Yu Y., Zhu Z., Chang J., Tao X., Yuan X., Li Z. Comparison of attachment process of particles to air and oily bubbles in flotation. *Advanced Powder Technology*. 2023, vol. 34, no. 7, article 104059. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.08.131.

8. Zawala J., Kosior D. Dynamics of dewetting and bubble attachment to rough hydrophobic surfaces – Measurements and modelling. *Minerals Engineering*. 2016, vol. 85, pp. 112–122. DOI: 10.1016/j.mineng.2015.11.003.

9. Kondrtiev V. V., Govorkov A. S., Kolosov A. D., Gorovoy V. O. The development of a test stand for developing technological operation «flotation and separation of MD2. The deposition of nanostructures MD1» produce nanostructures with desired properties. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017, vol. 12, no. 22, pp. 12373–12377.

10. Ejenstam L., Ovaskainen L., Rodriguez-Meizoso I., Wagberd L., Pan J., Swerin A., Claesson Per. M. The effect of superhydrophobic wetting state on corrosion protection – The AKD example. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2013, vol. 412, pp. 56–64. DOI: 10.1016/j.jcis.2013.09.006.

11. Gozbenko V. E., Khomenko A. P., Kargapoltsev S. K., Minaev N. V. Creating of the alternative lubricants and practice of their use. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017, vol. 12, no. 22, pp. 12369 – 12372.
12. Feuillebois F., Bazant M. Z., Vinogradova O. I. Effective slip over superhydrophobic surfaces in thin channels. *Physical Review Letters*. 2009, vol. 102, article 026001. DOI: 10.1103/PhysRevLett.102.026001.
13. Li C., Li D., Zhang H. Surface nanobubbles on the hydrophobic surface and their implication to flotation. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2022, vol. 29, no. 8, pp. 1491 – 1492. DOI: 10.1007/s12613-021-2279-1.
14. Jadhav A., Barigou M. Bulk nanobubbles or not nanobubbles: that is the question. *Langmuir*. 2020, vol. 36, no. 7, pp. 1699 – 1708. DOI: 10.1021/acs.langmuir.9b03532.
15. Malkin A. Ya., Patlazhan S. A. Wall slip for complex liquids – Phenomenon and its causes. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2018, vol. 257, pp. 42 – 57.
16. Isametova M. E., Kononenko R. V., Skeebe V. Y., Absadykov B. N. Thermal Pulse Processing of Blanks of Small-Sized Parts Made of Beryllium Bronze and 29 NK Alloy. *Materials*. 2022, vol. 15, no. 19, article 6682. DOI: 10.3390/ma15196682.
17. Kondrat'ev V.V., Govorkov A. S., Lavrent'eva M.V., Sysoev I. A., Description of the heat exchanger unit construction, created in IRNITU. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2016, vol. 11, no. 19, pp. 9979 – 9983.
18. Balanovsky A. E., Shtayger M. G. Plasma-arc surface modification of metals in a liquid medium. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018, vol. 411, no. 1, article 012013. DOI: 10.1088/1757-899X/411/1/012013.
19. Konyuhov V. Yu., Gladkih A. M., Galyautdinov I. I., Kiseleva T. Yu. Ecological architecture: The green roofs. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019, vol. 350, no. 1, article 012035. DOI: 10.1088/1755-1315/350/1/012035.
20. Ershov V. A., Kondratiev V. V., Karlina A. I., Kolosov A. D., Sysoev, I.A. Selection of control system parameters for production of nanostructures concentrates. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018, vol. 1118, no. 1, article 012014 DOI: 10.1088/1742-6596/1118/1/012014.
21. Nikolov A., Lee J., Wasan D. DLVO surface forces in liquid films and statistical mechanics of colloid oscillatory structural forces in dispersion stability. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2023, vol. 313, article 102847. DOI: 10.1016/j.cis.2023.102847.
22. Strateichuk D. M., Klyuev R. V., Gladkikh V. A., Kukartsev V. V., Tynchenko Y. A. Morphological features of polycrystalline cds1-xsex films obtained by screen-printing method. *Crystals*. 2023, vol. 13, no. 5, article 825. DOI: 10.3390/cryst13050825.
23. Adigamov R. R., Baraboshkin K. A., Mishnev P. A. Development of rolling procedures for pipes of K55 strength class at the laboratorial mill. *CIS Iron and Steel Review*. 2022, vol. 24, pp. 60 – 66. DOI: 10.17580/cisr.2022.02.09.
24. Smith A. M., Borkovec M., Trefalt G. Forces between solid surfaces in aqueous electrolyte solutions. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2020, vol. 275, article 102078. DOI: 10.1016/j.cis.2019.102078.
25. Kondratiev V. V., Nebogin S. A., Sysoev I. A., Gorovoy V. O. Description of the test stand for developing of technological operation of nano-dispersed dust preliminary coagulation. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017, vol. 12, no. 22, pp. 12809 – 12813.
26. Liu S., Xie L., Liu G., Zhong H., Zong H. Understanding the hetero-aggregation mechanism among sulfide and oxide minerals particles driven by bifunctional surfactants: Intensification flotation of oxide minerals. *Minerals Engineering*. 2021, vol. 169, article 106928. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.106928.
27. Pan L., Yoon R.-H. Measurement of hydrophobic forces in thin liquid films of water between bubbles and xanthate-treated gold surfaces. *Minerals Engineering*. 2016, vol. 98, pp. 240 – 250. DOI: 10.1016/j.mineng.2016.09.005.

28. Matveeva T. N. Flotation reagents for finely disseminated gold extraction from unenriched ores and technogenic products. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2021, vol. 13, no. 2, pp. 201 – 207. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-2-201-207.

29. Pan L., Jung S., Yoon R.-H. A fundamental study on the role of collector in the kinetics of bubble-particle interaction. *International Journal of Mineral Processing*. 2012, vol. 106-109, pp. 37 – 41.

30. Wang J., Yoon R.-H., Morris J. AFM surface force measurements conducted between gold surface treated in xanthate solutions. *International Journal of Mineral Processing*. 2013, vol. 122, pp. 13 – 21. DOI: 10.1016/j.minpro.2013.03.005.

31. Kempinen J., Aaltonen A., Sihvonen T., Leppinen J., Siren H. Xanthate degradation occurring in flotation process waters of a gold concentrator plant. *Minerals Engineering*. 2015, vol. 80. DOI: 10.1016/j.mineng.2015.05.014.

32. Sanakulov K. S., Vorobyov A. E., Kozyrev E. N., Lianzi Zh. Physical and chemical properties of gold nanoparticles in ores and catalysts. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022, vol. 14, no. 4, pp. 676 – 684. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-4-676-684.

33. Efremkov E. A., Shanin S. A., Martyushev N. V. Development of an algorithm for computing the force and stress parameters of a cycloid reducer. *Mathematics*. 2023, vol. 11, article 993. DOI: 10.3390/math11040993.

34. Martyushev N. V., Petrenko Y. N. Effects of crystallization conditions on lead tin bronze properties. *Advanced Materials Research*. 2014, vol. 880, pp. 174 – 178. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.880.174.

35. Ivashutenko A., Martyushev N., Vidayev I., Kostikov K. Influence of technological factors on structure and properties of alumina-zirconia ceramics. *Advanced Materials Research*. 2014, vol. 1040, pp. 845 – 849. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.845.

36. Sysoev I. A., Ershov V. A., Kondrat'ev V.V. Method of controlling the energy balance of electrolytic cells for aluminum production. *Metallurgist*. 2015, vol. 59, no. 5-6, pp. 518 – 525. DOI: 10.1007/s11015-015-0134-1.

37. Ilyushin P., Kulikov A., Suslov K., Filippov, S. Consideration of distinguishing design features of gas-turbine and gas-reciprocating units in design of emergency control systems. *Machines*. 2021, vol. 9, no. 3, article 47. DOI: 10.3390/machines9030047.

38. Suslov K. V., Solonina N. N., Smirnov A. S. Smart meters for distributed filtering of high harmonics in Smart Grid. *Energy and Electrical Drives. International Conference on Power Engineering*. 2011, article 6036552. DOI: 10.1109/PowerEng.2011.6036552.

39. Feuillebois F., Bazant M. Z., Vinogradova O. I. Effective slip over superhydrophobic surfaces in thin channels. *Physical Review Letters*. 2009, vol. 102, article 026001. DOI: 10.1103/PhysRevLett.102.026001.

40. Huang W., Huang J., Guo Z., Liu W. Icephobic/anti-icing properties of superhydrophobic surfaces. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2022, vol. 304, article 102658. DOI: 10.1016/j.cis.2022.102658.

41. Evdokimov S. I., Gerasimenko T. E. Development of a flotation regime for gold ores using a mixture of air and water steam. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2021, no. 2, pp. 162 – 177. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20210217.

42. Kondrakhin V. P., Klyuev R. V., Sorokova S. N., Efremkov E. A., Valuev D. V., Mengxu Q. Mathematical modeling and multi-criteria optimization of design parameters for the gyratory crusher. *Mathematics*. 2023, vol. 11, no. 10, article 2345. DOI: 10.3390/math11102345.

43. Evdokimov S. I., Pan'shin A. M., Solodenko A. A. *Mineralurgiya*. T. 2. Uspekhi flotatsii [Mineralurgy. Vol. 2. Advances in flotation], Vladikavkaz, 2010, 992 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Евдокимов Сергей Иванович — канд. техн. наук,
доцент, e-mail: eva-ser@mail.ru,
Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(государственный технологический университет),
*Гусева Елена Александровна*¹ — канд. техн. наук,
доцент, e-mail: el.guseva@rambler.ru,
*Константинова Марина Витальевна*¹ — канд. техн. наук,
доцент, e-mail: mavikonst@mail.ru,
Филюшина Елена Владимировна^{2,3} — канд. техн. наук,
доцент, e-mail: ies_ief@mail.ru,
Тынченко Ядвига Александровна^{2,3} — аспирант,
e-mail: t080801@yandex.ru,
¹ Иркутский Национальный исследовательский
технический университет,
² Сибирский государственный университет науки
и технологий им. М.Ф. Решетнёва,
³ Сибирский федеральный университет.
Для контактов: Евдокимов С.И., e-mail: eva-ser@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

S.I. Evdokimov, Cand. Sci. (Eng.),
Assistant Professor, North Caucasus
Mining-and-Metallurgy Institute
(State Technological University),
362021, Vladikavkaz, Republic of North
Ossetia-Alania, Russia, e-mail: eva-ser@mail.ru,
*E.A. Guseva*¹, Cand. Sci. (Eng.),
Assistant Professor, e-mail: el.guseva@rambler.ru,
*M.V. Konstantinova*¹, Cand. Sci. (Eng.),
Assistant Professor, e-mail: mavikonst@mail.ru,
E.V. Filushina^{2,3}, Cand. Sci. (Eng.),
Assistant Professor, e-mail: ies_ief@mail.ru,
Ya.A. Tynchenko^{2,3}, Graduate Student,
¹ Irkutsk National Research Technical
University, 664074, Irkutsk, Russia,
² Reshetnev Siberian State University of Science
and Technology, 660037, Krasnoyarsk, Russia,
³ Siberian Federal University, 660041, Krasnoyarsk, Russia.
Corresponding author: S.I. Evdokimov, e-mail: eva-ser@mail.ru.

Получена редакцией 10.07.2023; получена после рецензии 15.09.2023; принята к печати 10.10.2023.
Received by the editors 10.07.2023; received after the review 15.09.2023; accepted for printing 10.10.2023.

