



ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДАЛЬНОДЕЙСТВУЮЩИХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СИЛ И ЛИНЕЙНОГО НАТЯЖЕНИЯ НА КРАЕВЫЕ УГЛЫ СМАЧИВАНИЯ ПРИ ФЛОТАЦИИ

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

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

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

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

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Золото в перерабатываемых в настоящее время рудах связано с минералами, крупность которых является упорной для эффективного извлечения методом флотации – мелкодисперсными фракциями. Только при наличии технологий их эффективного извлечения минеральное сырье такого качества приобретает у недропользователей и инвесторов лицензионную и инвестиционную привлекательность. **Цель работы.** Научное обоснование и разработка технологии обогащения золотосодержащих руд на основе применения нового способа построения схемы и режима флотации руд, обеспечивающих высокое извлечение мелкодисперсных фракций золота. **Используемые методы.** Разработаны метод и установка для измерения краевого угла смачивания на искусственно составленной смеси минералов при различной доле в ней гидрофобизированного самородного золота и температуре. Разработан способ построения схемы флотации, в которой для увеличения содержания золота в операции основной флотации используют противоточное движение исходного питания и чернового концентрата. Для дополнения поверхностными силами структурного происхождения сил, участвующих в селективном разделении мелкодисперсных минералов при выделении чернового концентрата, в качестве газовой фазы используют смесь воздуха с горячим водяным паром. **Новизна.** Обосновано, что одной из причин эффективности разработанного способа построения схемы флотации является рост краевого угла смачивания, а режима аэрации пульпы паровоздушной смесью – изменение знака параметра структурных сил и линейного натяжения с ростом температуры воды в граничных слоях пузырьков. **Результат.** Из результатов натуральных экспериментов по флотации золотосодержащих руд следует, что использование разработанной технологии позволяет получить прирост извлечения золота от 80,71 до 88,70% при повышении качества концентрата от 65,09 до 100,3 г/т Au за счет уменьшения выхода концентрата на 30,1 отн.%. Из результатов седиментометрического анализа следует, что при использовании разработанной технологии повышение извлечения золота является следствием снижения потерь с хвостами мелких и тонких фракций металла. **Практическая значимость.** Разработанный метод измерения краевых углов на смеси минералов может найти применение в научно-исследовательской практике. Исходя из установленных физических закономерностей, разработанный способ построения схемы флотации и режим аэрации пульпы эффективны (не имеют каких-либо ограничений) при обогащении практически любого типа руд с высоким содержанием мелких и тонких фракций ценного компонента.

Ключевые слова: поверхностные силы, краевой угол, линейное натяжение, параметр структурных сил, золотосодержащая руда, флотация, показатели

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

© Евдокимов С.И., Герасименко Т.Е., Горлова О.Е., Орехова Н.Н., 2025

Для цитирования

Исследование влияния далекодействующих поверхностных сил и линейного натяжения на краевые углы смачивания при флотации / Евдокимов С.И., Герасименко Т.Е., Горлова О.Е., Орехова Н.Н. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №1. С. 5-16. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-5-16>



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

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF LONG-RANGE SURFACE FORCES AND LINEAR TENSION ON EDGE WETTING ANGLES DURING FLOTATION

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

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

²Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

³Institute of Problems of Integrated Subsoil Development named after Academician N.V. Melnikov of the RAS, Moscow, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Gold in currently processed ores is associated with minerals, the size of which is refractory for effective extraction by flotation - fine fractions. Only in the presence of technologies for their effective extraction mineral raw materials of such quality acquire license and investment attractiveness for subsoil users and investors. **Objectives.** Scientific justification and development of technology for enrichment of gold-bearing ores on the basis of new method application of the scheme construction and mode of ores flotation, providing high extraction of fine fractions of gold. **Methods Applied.** The method and unit for measuring the wetting edge angle on the artificially composed mixture of minerals at different proportion of hydrophobized nugget gold in it and temperature are developed. A method of flotation scheme construction was developed, in which countercurrent movement of initial feed and rough concentrate is used to increase the gold content in the main flotation operation. To complement the surface forces of structural origin forces involved in the selective separation of fine minerals in the separation of the rough concentrate, a mixture of air and hot water vapor is used as the gas phase. **Originality.** It is proved that one of the reasons for the efficiency of the developed method of flotation scheme construction is the growth of the wetting edge angle, and the mode of pulp aeration by steam-air mixture is the change of the parameter sign of structural forces and linear tension with the growth of water temperature in the boundary layers of bubbles. **Result.** From the results of field experiments on flotation of gold-bearing ores it follows that the use of the developed technology allows to obtain an increase in gold extraction from 80.71 to 88.70 % with an increase in concentrate quality from 65.09 to 100.3 g/t Au due to a decrease in concentrate yield by 30.1 % rel. From the results of sedimentometric analysis it follows that when using the developed technology the increase in gold extraction is a consequence of reduction of losses with tailings of small and fine fractions of metal. **Practical Relevance.** The developed method of measuring the boundary angles on the mixture of minerals can be used in research practice. Based on the established physical regularities, the developed method of flotation scheme construction and pulp aeration mode are effective (do not have any limitations) in the enrichment of almost any type of ores with a high content of small and fine fractions of valuable component.

Keywords: surface forces, edge angle, linear tension, structural forces parameter, gold ore, flotation, indicators

The study was supported by the Russian Science Foundation under agreements No.23-27-00093 «Theoretical and experimental justification of the mechanism of surface forces in the processes of coagulation and flotation under conditions of thermal action on wetting films for the creation and industrial development of technological processes for the effective extraction of gold microdispersions from ores and placers»

For citation

Evdokimov S.I., Gerasimenko T.E., Gorlova O.E., Orekhova N.N. Investigation of the Influence of Long-range Surface Forces and Linear Tension on Edge Wetting Angles During Flotation. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 1, pp. 5-16. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-5-16>

Введение

К настоящему времени достигнуты значительные успехи в понимании роли граничных слоев жидкостей с измененной под влиянием поверхностных сил структурой в образовании краевых углов смачивания, устойчивости симметричных и смачивающих пленок [1–3]. Граничащие с обеих сторон с одинаковыми фазами симметричные пленки изучены лучше смачивающих. Специфика смачивающих пленок, обусловленная тем, что они заключены между разными фазами – газовой и твердой, определяет несимметрич-

ность полей действующих в них поверхностных сил [4–6], абсолютную величину краевого угла смачивания. Исследование этой специфики составляет фундаментальную основу для решения прикладных задач, связанных с управлением свойствами водных дисперсий минералов при их селективной флотации путем изменения краевых углов смачивания, созданием процессов водоочистки [7-10].

В теории ДЛФО [11-13] основой для количественного анализа состояния и устойчивости пленок жидкостей, дисперсных и коллоидных систем являются силы Лондона-Ван-дер-Ваальса – молекулярная

компонента расклинивающего давления и ионно-электростатические взаимодействия – электростатическая компонента расклинивающего давления.

При наличии в дисперсных системах поверхностных сил, вызванных отличием свойств и параметров структуры воды на границе раздела фаз (твердое-жидкость и газ-жидкость) от их объемных значений (гидрофобно-гидрофильными взаимодействиями), а также другими механизмами (объединенными в литературе под общим названием «не-ДЛФО»-силы [14-16]), используют расширенную теорию ДЛФО (XDLO [17, 18]) – структурную компоненту расклинивающего давления [19].

Теоретические положения

Объектом исследования в работе является краевой угол смачивания, образуемый при использовании нового способа построения схемы флотации и режима аэрации пульпы [7–9]. Зависимость свойств объекта от дальнедействующих поверхностных сил и линейного натяжения составляет предмет исследования.

В теории смачивания Фрумкина-Дерягина краевой угол Юнга θ_0 выражен через параметры изотермы расклинивающего давления смачивающих пленок $\Pi(h)$ при равновесной толщине смачивающей пленки h_0 , соответствующей α -ветви изотермы при давлении $p = p_0$ и $\Pi = 0$:

$$\sigma_{lv} \cos \theta_0 = \sigma_{lv} + p_0 h_0 + \int_{h_0}^{\infty} \Pi(h) dh, \quad (1)$$

где σ_{lv} – поверхностное натяжение на границе раздела фаз газ-жидкость.

Развитая Лифшицем макроскопическая теория дисперсионных сил для пленки толщиной h дает следующее выражение для молекулярной компоненты расклинивающего давления [13]:

$$\Pi_m(h) = -\frac{A_{123}}{6\pi h^3}, \quad (2)$$

где A_{123} – константа Гамакера.

Изотерма расклинивающего давления при расчете сил электростатического отталкивания имеет следующий вид [20]:

$$\Pi_e(h) = (2\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot k^2 \cdot \psi^2) \exp(k \cdot h), \quad (3)$$

где ε – диэлектрическая постоянная дисперсионной среды; ε_0 – электрическая постоянная; k – обратный дебаеский радиус.

Зависимость гидрофобных сил притяжения от толщины прослойки описывается уравнением [21, 22]

$$\Pi_s(h) = -K \exp(-h/\lambda), \quad (4)$$

где K и λ – параметры структурных сил, характеризующие соответственно их величину и дальнедействие.

Прилипание частицы к пузырьку возможно при критической толщине смачивающей пленки h_{cr} [23], заканчивается заходом изотермы расклинивающего давления $\Pi(h)$ в область его отрицательных значений $\Pi < 0$, что связано с преобладанием сил гидрофобного притяжения ($\Pi < 0$) над силами структурного гидрофильного отталкивания ($\Pi > 0$) и образованием краевого угла θ [22]. Однако и в этом случае поверхность минерала состоит из участков с различным режимом смачивания – Венцеля и Касси-Бакстера [24], каждый из которых отличается своим краевым углом θ . Если доля участка с краевым углом θ_i в общей поверхности минерала составляет f_i часть, то краевой угол θ над химически гетерогенной поверхностью минерала может быть определен (по Касси) [25, 26] как

$$\cos \theta = \sum_i f_i \cdot \cos \theta_i. \quad (5)$$

Для системы из N минералов соотношение (5) принимает вид

$$\cos \theta = \sum_l \sum_i f_{si} \cdot \cos \theta_i \quad (6)$$

и моделирует закрепление на пузырьке минерального агрегата (флокулы) с поверхностью частиц S , краевые углы каждой из которых определяются соотношением (5).

Исходя из соотношения (6), расход жидкости через слой осадка складывается из потоков над участками поверхности с $\theta \rightarrow 0^0$ (выполняется условие прилипания при скорости потока $u = 0$) и над участками поверхности с $\theta \rightarrow 180^0$ (выполняется условие скольжения Навье $u = b \frac{\partial u}{\partial n}$). Здесь b – длина скольжения

при касательном напряжении $\partial u / \partial n$ [27].

В работе операцию основной флотации выполняют на трех параллельных потоках (струях) пульпы, смешивая черновой концентрат 1-й струи с исходным питанием 2-й, черновой концентрат которой направляют в 3-ю струю с выделением готового чернового концентрата. В соответствии с (6), при объединении исходного питания с черновым концентратом краевой угол θ увеличивается за счет роста количества гидрофобных минералов в смеси, что является причиной экспоненциального роста сил прилипания [21].

Изменение θ возможно за счет нагрева смачивающей пленки на толщину h_{cr} [28], внутри которой локализовано действие структурных сил, отличающихся высокой температурной чувствительностью. Другим механизмом роста θ может быть появление объемных нанопузырьков в результате смешения разнотемпературных потоков (по Sherma A. [29]).

При флотации смесью воздуха с горячим ($T \geq 104^\circ\text{C}$) паром в холодной ($T = 15\text{--}20^\circ\text{C}$) пульпе температура воды в граничном слое пузырька за счет теплоты конденсации в течение $\sim 10^{-3}$ с достигает температуры насыщенного пара (оставаясь на $2\text{--}5^\circ\text{C}$ ниже). Режим паровоздушной флотации используют в потоке пульпы, выдающем готовый черновой концентрат, затрачивая 15-20% времени флотации.

В соответствии с уравнением Уошборна, записанного для горизонтально расположенного сквозного капилляра длиной l с радиусом r в виде

$$u = \frac{r^2}{8l\eta} \left[\frac{2\sigma_{lv}}{r} \cos\theta - \Delta p \right], \quad (7)$$

искомое значение θ рассчитывают по углу наклона линейной зависимости $u(\Delta p)$, полученной по скорости потока жидкости u (с вязкостью η), измеренной при различных значениях избыточного давления $\Delta p = \text{const}$.

Цель работы – научное обоснование причин высокой эффективности извлечения мелкодисперсного золота при использовании разработанной технологии.

Объект исследования и оборудование

Повышение температуры значимо влияет на величину краевого угла смачивания [30–32]. В работе для исследования температурной зависимости параметра структурных сил по величине краевого угла для его измерения разработана установка (рис. 1).

При определении θ фактически измеряется скорость фильтрации жидкости через пористую перегородку (мембрану) в виде спрессованного исследуемого материала. Конструкция установки позволяет проводить измерения при различной температуре.

В установке заполненная исследуемым материалом кассета 1 через уплотнения в опорах 3 помещена в термостатированном канале 2. Для поддержания температуры на заданном уровне установка оснащена дифференциальным манометром 4, трубкой Пито 6 и термопарами 5, 7-16. Скорость течения воды определяют по ее массовому расходу (г/с). Система измерения массы фильтрата 17, 18 включает контейнер жидкости 18, лабораторные электронные весы 17 модификации HR-202i с интерфейсом RS-232 ("A&D Co.LTD", Япония) для подключения к ПК (23, 24). Весы обеспечивают наибольший/наименьший пределы взвешивания 220/0,001 г при цене поверочного деления 1 мг в диапазоне рабочих температур от $+5$ до $+40^\circ\text{C}$. Термoeлектрический модуль включает пусковой ключ 19, реостат 20, вольтметр 21 и милливольтметр 22. Подаваемый на стенку канала 2 через реостат 20 электрический ток нагревает ее, что фиксируется вольтметром 21; ЭДС системы хромель-копелевых термопар 7-16 преобразуется в температуру, значение которой определяют по показаниям милливольтметра 22. Тепловой поток (количество теплоты) определяют по закону Джоуля-Ленца передается от стенки канала 2 в его рабочую зону (с учетом потерь в окружающую среду).

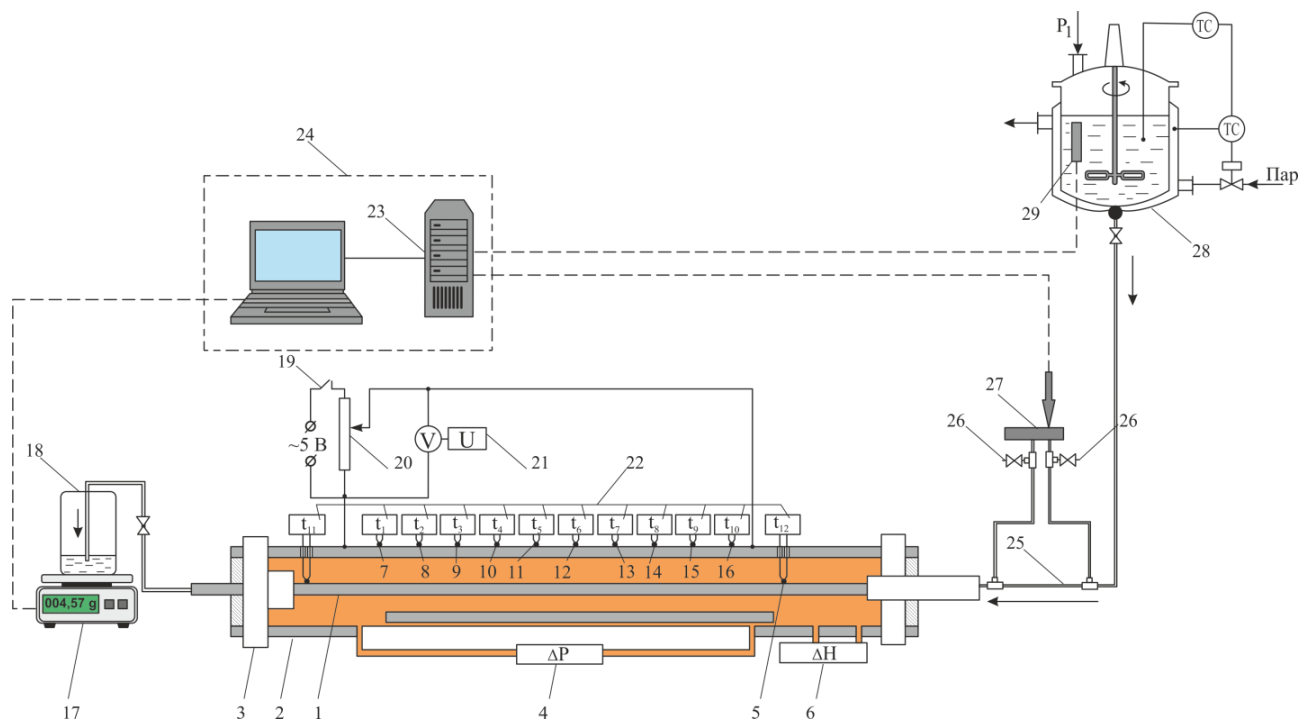


Рис. 1. Схема измерительной установки
Fig. 1. Scheme of measuring unit

Связь сигнала с датчика дифференциального давления HDP-701 (с выходным токовым сигналом от 4 до 20 мА) и погруженного в термостат 28 высокоомногобу- синкового терморезистора 29 с ПК обеспечивает через USB-интерфейс встроенный в шасси cDAQ-9172 уни- версальный модуль аналогового ввода NI-9219 С-серии (24-битный). Модуль в сравнении с АЦП Е14-440 обес- печивает повышенную точность измерений. Температу- ра в термостате поддерживается паром.

В экспериментах использовали россыпное золото. Золото мелкое: в классе крупности (-4,0+1,0) мм со- средоточено 9% металла, в классе (-1,0+0,25) мм – 36% и в классе (-0,5+0,1) мм – 55% массы золота. В морфо- логическом отношении 31,8% металла – это изомет- ричные (уплощенные, комковидные) золотины, 59% золотины – чешуйчатого морфотипа и 9,2% – прочего морфологического типа (в основном дендриты). Ха- рактерно, что если в исходных песках доля пластинча- того золота составляет около 20%, то в эфелях после промывки песков мелкая фракция (-0,1 мм) на 80-90% представлена пластинчатым, чешуйчатым и листовид- ным золотом. При шагреновой и ячеистой поверхности окатанность золотины в целом низкая, в том числе при- сутствуют золотины рудного облика.

По данным пробирного (3 определения) и атомно- абсорбционного анализа (4 определения) проба золота изменяется в широких пределах – от 834 до 993‰ (в среднем составляет 937‰). Установлено, что в состав золотины в виде микропримесей входят: медь (от 0,14 до 2,70%), селен (от 0,14 до 0,37%) и мышьяк (от 0,15 до 0,20%); в одиночном анализе выявлены палладий (0,25%), ртуть (до 4,03%), калий (0,73%) и хлор (0,91%).

При измерении краевых углов золото смешивали со стекольным кварцевым песком, содержащим до 99,8% массовой доли оксида кремния SiO₂ (песок марки ООВС-010-В); массовая доля оксида железа Fe₂O₃ была в пределах 0,010-0,03%, а оксида алюми- ния Al₂O₃ – в пределах 0,1–2,0%. Песок содержал бо- лее 5% частиц крупностью более 0,8 мм и не более 15% частиц крупностью менее 0,1 мм.

Результаты и их обсуждение

Если расклинивающее давление в смачивающей пленке представить в виде алгебраической суммы уравнений (1)-(3), то параметр K можно определить из равенства

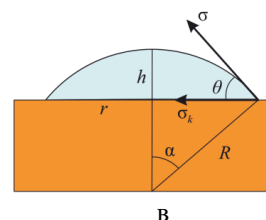
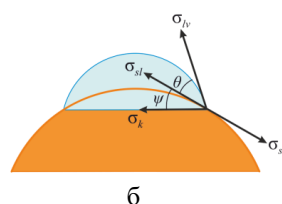
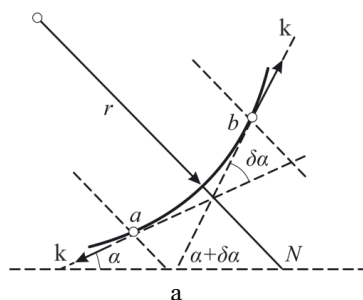


Рис. 2. К механике системы с линией трехфазного контакта
Fig. 2. Toward the mechanics of a system with a three-phase contact line

$$\cos\theta_0 = 1 + (1/\sigma_{lv}) \times \left[\frac{A_0}{12 \pi h_0^2} - \frac{\varepsilon_0 (\psi_1 - \psi_2)^2}{8 \pi h_0} + K \lambda \exp(-h_0/\lambda) \right]. \quad (8)$$

По методике, приведенной в [33], величина пара- метра K может быть найдена в виде разности между экспериментальными значениями краевых углов и рассчитанными по теории ДЛФО, учитывающей только Π_m - и Π_e -составляющую.

Далее рассмотрим систему с линией трехфазного контакта с радиусом r (рис. 2) [34], к которой прове- дем нормаль N и выберем две точки – a и b , распо- ложенные симметрично по обе ее стороны и по каса- тельным к которым действует натяжение k . Если искривление поверхности раздела фаз газ-жидкость приводит к появлению капиллярного давления p_0 , то следствием искривления линии трехфазного контакта является возникновение двумерного натяжения (или давления) σ_k .

С учетом обозначения величин, принятых на рис. 2, кривизна линии R_L в точке, к которой стягивается дуга $ab \rightarrow 0$, равна $\lim (\delta\alpha/ab) = 1/r = L_r$. Тогда выра- жение для σ_k получим в виде

$$\sigma_k = \lim_{ab \rightarrow 0} \frac{2k \sin \frac{\delta\alpha}{2}}{ab} = k \lim_{ab} \frac{\delta\alpha}{ab} = k L_r = \frac{k}{r}. \quad (9)$$

Следуя уравнению Юнга (и Неймана)

$$\sigma_{lv} \cos\theta_0 = \sigma_{sv} - \sigma_{sl} \quad (10)$$

и с учетом (6), при искривлении линии трехфазного контакта к механическому балансу межфазных натя- жений σ по периметру капли, смачивающей под уг- лом θ_0 твердую поверхность, следует добавить натя- жение σ_k :

$$\sigma_{sv} - \sigma_{sl} - \sigma_{lv} \cos\theta_0 - \sigma_k \cos\psi = 0, \quad (11)$$

или в случае $\psi = 0$

$$\sigma_{sv} - \sigma_{sl} - \sigma_{lv} \cos\theta_0 - \frac{k}{r} = 0. \quad (12)$$

Сила линейного натяжения k стремится сократить (при $k > 0$) или увеличить (при $k < 0$) длину линии трехфазного контакта, вдоль которой она действует. В то же время величина k характеризует избыток большого термодинамического потенциала (свободной энергии) в системе с линией трехфазного контакта. Таким образом, закреплению частицы на пузырьке препятствуют силовой и энергетический барьеры, являющиеся следствием линейного натяжения k , появляющегося при искривлении линии трехфазного контакта. Нижний предел размера частицы R_{cr} , при котором закрепление частицы на пузырьке заканчивается образованием периметра смачивания, определяется из выражения [32]

$$k = \sqrt{\frac{2}{3} \rho g \sigma_{lv}} (1 - \theta_0) R_{cr}^2, \quad (13)$$

где ρ – разность плотности твердого и жидкости.

На рис. 3, а приведены результаты измерений краевого угла смачивания при различной доле самородного золота в смеси со стекольным кварцем. Поверхность золота гидрофобизировали раствором (концентрацией 25 мг/л) бутиловым ксантогенатом калия.

Из результатов измерений следует, что его абсолютная величина увеличивается с ростом доли гидрофобного золота в смеси (рис. 3, а). Увеличение краевого угла связано с изменением химической гетерогенности поверхности: уменьшением доли площади поверхности с гомогенным режимом смачивания Венцеля и ростом площади участков с гетерогенным режимом смачивания Касси-Бакстера. Другим механизмом может быть интенсификация процесса заполнения паром полостей (по Ющенко В.С. [35]), образованных сдвиговым потоком жидкости [36], в результате расслоения тонкого пристенного газожидкостного слоя (по Виноградовой О.И. [27]) или изменение длины свободного пробега фононов и ориента-

ции диполей молекул воды (по Бойнович Л.Б. [35]). Рост дальнедействующих сил притяжения связан (по J. Eriksson [35]) с увеличением числа водородных связей на одну молекулу воды вблизи гидрофобной поверхности по сравнению с таковым в объемной фазе – механизмом упорядочения молекул воды, основанным на введении феноменологического параметра порядка (по S. Macelia, N. Radic [35]). Эти механизмы при увеличении доли гидрофобного золота в смеси могут быть причиной роста сил структурного (гидрофобного) притяжения при одновременной убыли сил структурного (гидрофильного) отталкивания (рис. 3, б). Эндотермический характер гидрофобного притяжения является причиной роста краевого угла и изменения знака и величины параметра K при повышении температуры (рис. 3, в).

Из теории смачивания Фрумкина-Дерягина и уравнения (4) следует, что краевой угол образуется, когда площадь захода изотермы S_2 в область $\Pi < 0$ становится больше ее площади S_1 в области $\Pi > 0$ (рис. 4, а, б): осуществляется переход от гетерофильного смачивания (рис. 4, кривые 1, 3) к гетерофобному (рис. 4, кривые 2, 4). Переход $S_1 \rightarrow S_2$ является следствием роста температуры $T_2 > T_1$ (рис. 4, б).

Следовательно, одной из причин эффективности схемы флотации, в соответствии с которой исходное питание смешивают с черновым концентратом, является увеличение краевого угла.

Инверсия знака (см. рис. 3, б, в) параметра структурных сил K (знака фоновой составляющей расклинивающего давления по Бойнович Л.Б.) позволяет предположить, что силы гидрофильного отталкивания и гидрофобного притяжения имеют одну физическую природу и связаны с изменениями структуры и свойств воды вблизи границы раздела фаз. Причем только в области $\theta > 60^\circ$ силы структурного гидрофильного отталкивания (отрицательные значения K) сменяются силами структурного гидрофобного притяжения и значения K становятся положительными.

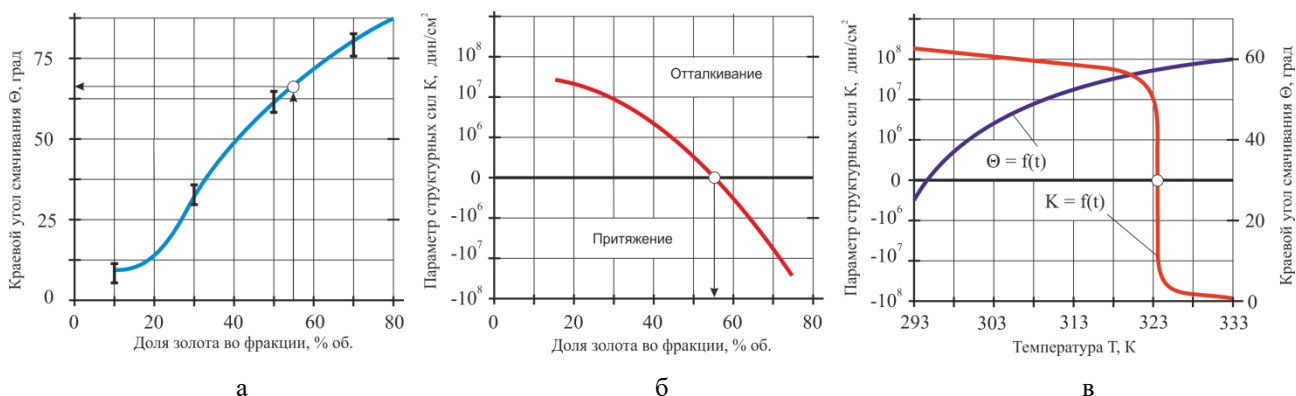


Рис. 3. Результаты измерения краевого угла (а) и расчета параметра структурных сил при различной доле золота в смеси (б) и температуре (в)

Fig. 3. Results of edge angle measurement (a) and structural force parameter calculation at different gold fraction in the mixture (б) and temperature (в)

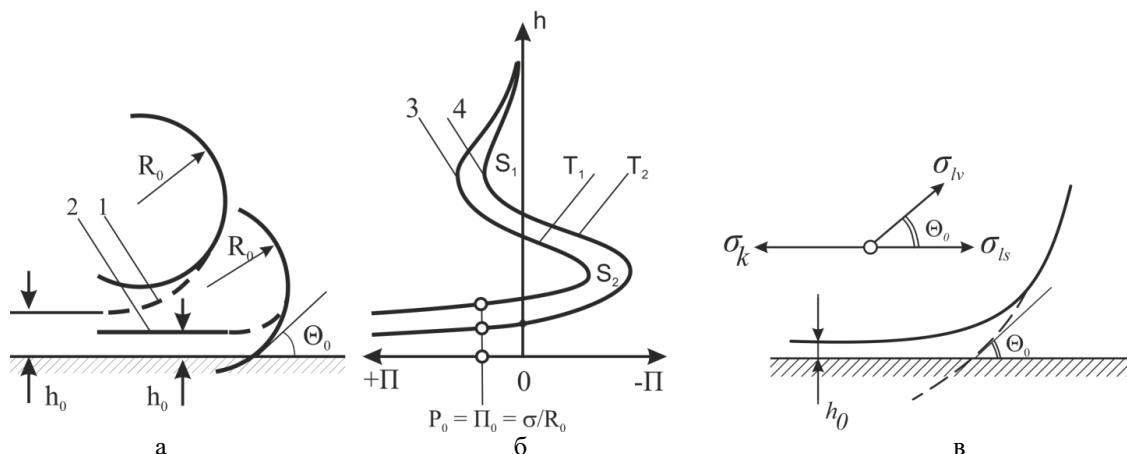


Рис. 4. Схемы равновесных состояний смачивающих пленок с объемной жидкостью
 Fig. 4. Schemes of equilibrium states of wetting films with bulk liquid

Снижение равновесной толщины смачивающей пленки h_0 на изотерме расклинивающего давления $\Pi(h)$ с ростом температуры может быть при флотации действенным технологическим приемом изменения знака параметра K .

Если в качестве модели тонкой пленки жидкости принять разделяющую поверхность Гиббса, то можно записать

$$k = 2 r_0 \sigma (\cos \theta_0 - \cos \theta_\infty), \quad (14)$$

где θ_0, θ_∞ – краевые углы для круглой смачивающей пленки радиусом r_0 и $r_0 \rightarrow \infty$ соответственно.

Увеличение краевого угла с ростом температуры (см. рис. 3, в) является причиной изменения направления действия силы линейного натяжения – знак линейного натяжения изменяется с положительного ($k \sim +10^{-9}$ Н) на отрицательный ($k \sim -10^{-9}$ Н). Физически это означает увеличение длины линии периметра контакта (понижение пиннинга [33]) в результате ослабления ее стягивания. Расширение линии трехфазного контакта способствует эффективности прилипания (рис. 4, в).

Натурные эксперименты по флотации проведены на пробе золотосодержащих руд месторождения Наталка (рис. 5). По базовой технологии извлечение золота из руд осуществляли по гравитационно-флотационной схеме. 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 операции основной флотации плюс две операции контрольной флотации с тремя перечистками чернового 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 рН 8,5–8,7. С использованием бутилового ксантогената и пенообразователя Т-92 во флотоконцентрат извлечено еще 15,28% Au.

На рис. 6 приведены результаты флотации руд (цикл основной флотации) с использованием чернового концентрата в качестве минералов-носителей для извлечения микродисперсий золота (по струйной схеме флотации).

На рис. 6 приведены результаты выделения готового чернового концентрата по схеме в «три приема» и использованием режима агитации пульпы паровоздушной смесью в третьей струе флотации. Дополнение схемы тремя перечистками чернового концентрата и двумя контрольными операциями флотации позволяет получить концентрат, содержащий 39,0 г/т Au при извлечении 31,6% Au (с учетом концентрата гравитации – 100,3 г/т Au при извлечении 88,7% Au и выходе 1,3%) и отвальные хвосты с содержанием 0,168 г/т Au при потерях 11,3% Au. Снижение выхода концентрата на 30,1 отн. % (от 1,86% по схеме на рис. 5 до 1,3% по струйной схеме) можно объяснить увеличением краевого угла с ростом концентрации извлекаемого минерала. Селективное обогащение питания, которое изменяет в благоприятном направлении отношение полезного и загрязняющего минерала, является конкурентным преимуществом в борьбе за место на поверхности пузырька: золотосодержащий пирит выдавливает из нее минералы породы, и избирательность минерализации увеличивается. При паровоздушной флотации наблюдается синергичность эффектов от роста краевого угла и «горячей» поверхности пузырька.

Из сравнения распределения золота по классам крупности в концентратах следует, что одним из факторов, способствующих приросту извлечения золота, является увеличение извлечения мелких фракций (рис. 7).

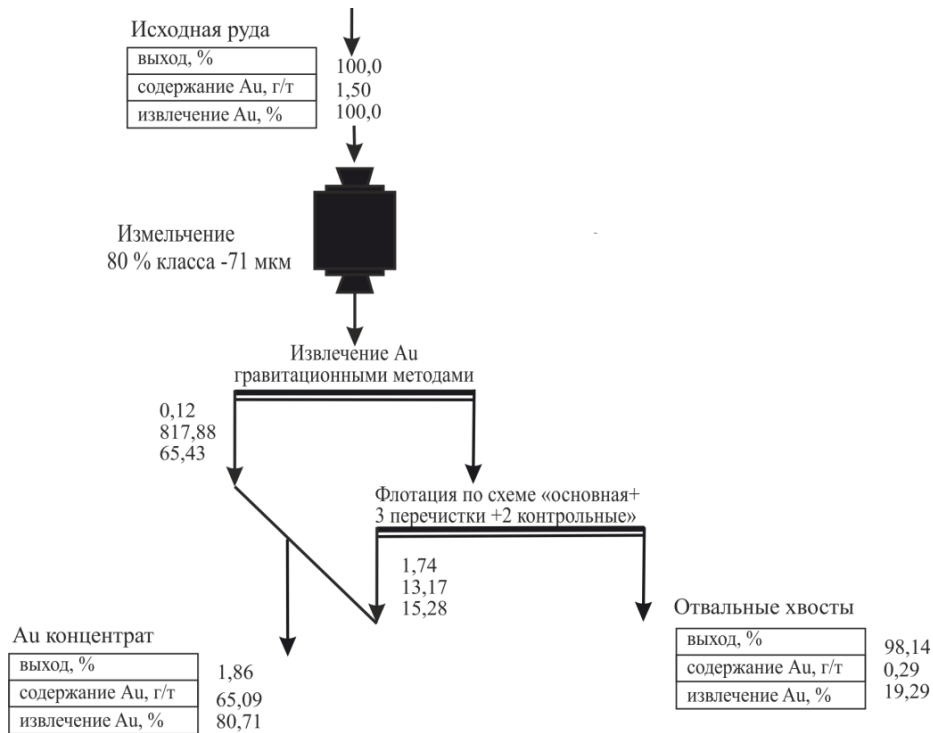


Рис. 5. Принципиальная блок-схема флотации руд месторождения Наталка по базовой технологии
 Fig. 5. Principal block diagram of flotation of ores of Natalka deposit using the basic technology

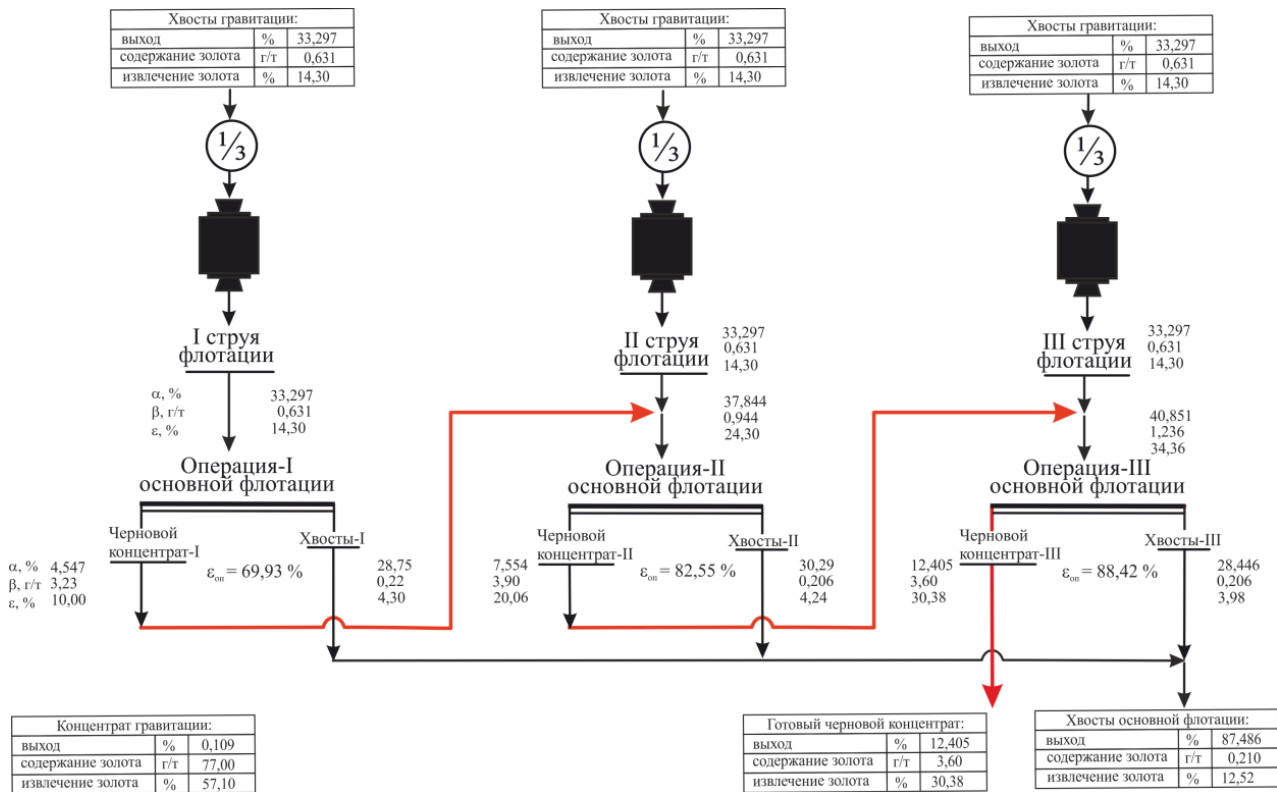


Рис. 6. Принципиальная блок-схема флотации руд месторождения Наталка с выделением черного концентрата по струйной схеме в «три приема»

Fig. 6. Principal block diagram of flotation of ores of Natalka deposit with separation of rough concentrate by jet scheme in “three steps”

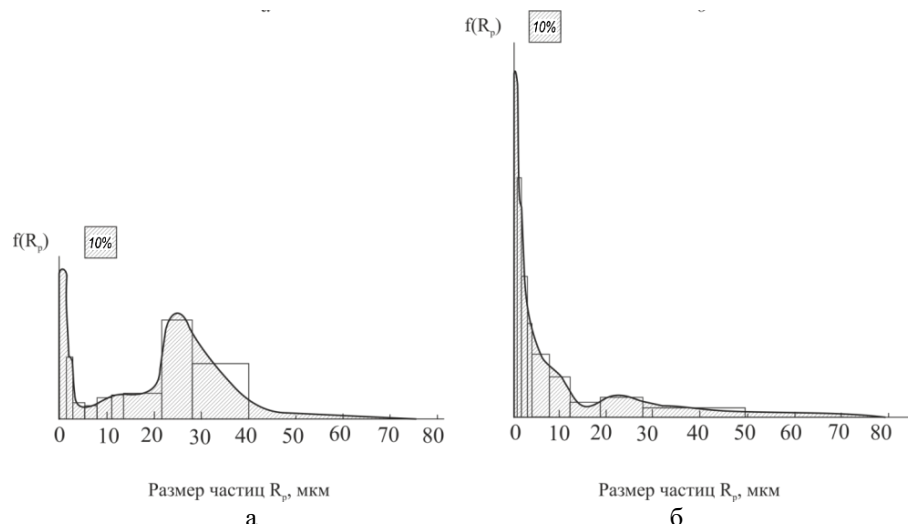


Рис. 7. Гистограммы и дифференциальные функции распределения частиц по размерам $f(R_p)$ для концентратов, полученных из золотосодержащих руд месторождения Наталка с применением базовой (а) и разработанной (б) технологий

Fig. 7. Histograms and differential functions of particle size distribution $f(R_p)$ for concentrates obtained from gold-bearing ores of Natalka deposit using basic (a) and developed (б) technologies

Заклучение

Разработаны схема и режим флотации, в соответствии с которыми черновой концентрат выделяют из трех параллельных потоков (струй) пульпы, дважды смешивая оборотный черновой концентрат с исходным питанием. В третьей струе флотации для аэрации пульпы (в течение 15–20% от времени в операции флотации) используют смесь воздуха с горячим водяным паром.

Показано, что одной из причин эффективности разработанной схемы флотации является увеличение краевого угла с ростом доли гидрофобного золота в материале. С ростом краевого угла увеличивается заход изотермы расклинивающего давления в область его отрицательных значений в результате преобладания в смачивающей пленке структурных сил притяжения над структурными силами отталкивания.

Выявленная инверсия знака параметра структурных сил позволяет предположить, что одной из причин появления структурных сил является отклонение свойств и параметров структуры воды от объемных значений.

Силовым и энергетическим барьером для извлечения мелких частиц является линейное натяжение. При повышении температуры уменьшается площадь захода изотермы в область ее положительных значений (краевой угол увеличивается), что является причиной изменения направления действия силы линейного натяжения и способствует росту эффективности извлечения мелких и тонких частиц.

Натурные эксперименты по флотации выполнены на пробе золотосодержащих руд месторождения Наталка. Использование разработанной технологии позволяет получить прирост извлечения золота от

80,71 до 88,70% при повышении качества концентрата от 65,09 до 100,3 г/т Au за счет уменьшения выхода концентрата на 30,1 отн. %. Из сравнения распределения золота по классам крупности в концентратах следует, что одним из факторов, способствующих приросту извлечения золота при использовании разработанной технологии, является увеличение извлечения в концентрат мелких фракций золотосодержащего материала.

Список источников

1. Surface interaction mechanisms in mineral flotation: Fundamentals, measurements, and perspectives / Xie L., Wang J., Lu Q., Hu W., Yang D., Qiao C., Peng X., Peng Q., Wang T., Sun W., Liu Q., Zhang H., Zeng H. // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2021, vol. 295, article 102491.
2. Determination of the typical interactions among dispersed phases relevant to flotation applications: A review / Li D., Wang H., Li C., Liang Y., Yan X., Zhang H. // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2021, vol. 288, article 102359.
3. Theory of surface forces in multivalent electrolytes / Misra R.P., De Souza J.P., Blankschtein D., Bazant M.Z. // *Langmuir*. 2019, vol. 35, issue 35, pp. 11550-11565.
4. Mohamad H.S., Neuber S., Helm C.A. Surfaces forces of asymmetrically grown polyelectrolyte multilayers: Searching for the charges // *Langmuir*. 2019, vol. 35, issue 48, pp. 15491-15499.
5. Interfacial forces across ionic liquid solutions: Effects of ion concentration and water domains / Adibnia V., Mirbagheri M., Latreille P.L., Banquy X., De Crescenzo G., Rochefort D. // *Langmuir*. 2019, vol. 35, issue 48, pp. 15585-15591.
6. Huang K., Yoon R.H. Surface forces in the thin liquid films (TLFS) of water confined between n-alkane drops

- and hydrophobic gold surfaces // *Langmuir*. 2019, vol. 35, issue 48, pp. 15681-15691.
7. Studying flotation of gold microdispersions with carrier minerals and pulp aeration with a steam-air mixture / Evdokimov S.I., Golikov N.S., Pryalukhin A.F., Kondratiev V.V., Mishedchenko A., Kuzina A.V., Bryukhanova N.N., Karlina A.I. // *Minerals*. 2024, vol. 14, no. 1, pp. 108.
 8. Studying the flotation of gold-bearing ores using carrier minerals / Evdokimov S.I., Golikov N.S., Zadkov D.A., Voitovich E.V., Kondratiev V.V., Petrovskiy A.A., Konukhov V.Y., Gladkikh V.A. // *Minerals*. 2024, vol. 14, no. 1, pp. 88.
 9. Механизм коагуляции в условиях флотации микродисперсий золота минералами-носителями / Евдокимов С.И., Гусева Е.А., Константинова М.В., Вайтекунене Е.Л., Филошина Е.В. // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2023. № 11-1. С. 190-206.
 10. Чангурия В.А., Шадрюнова И.В., Горлова О.Е. Инновационные процессы глубокой и экологически безопасной переработки техногенного сырья в условиях новых экономических вызовов // *Устойчивое развитие горных территорий*. 2021. Т. 13. № 2 (48). С. 224-237.
 11. Unraveling the hydrophobic interaction mechanisms of hydrocarbon and fluorinated surfaces / Gong L., Wu F., Yang W., Huang C., Li W., Wang X., Wang J., Tang T., Zeng H. // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2023, vol. 635, pp. 273-283.
 12. 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.
 13. Rajupet S. DLVO interactions between particles and rough surfaces: An extended surface element integration method // *Langmuir*. 2021, vol. 37, issue 45, pp. 13208-13217.
 14. Guo H., Kovscek A.R. Investigation of the effects of ions on short-range non-DLVO forces at the calcite/brine interface and implications for low salinity oil-recovery processes // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2019, vol. 552, pp. 295-311.
 15. Atomic force microscopy study of non-DLVO interactions between drops and bubbles / Li K., Wang W., Xiao F., Ge Y., Jin H., Yu Z., Gong J., Gao W., Peng Z. // *Langmuir*. 2021, vol. 37, issue 22, pp. 6830-6837.
 16. Bal V. Stability characteristics of nanoparticles in a laminar linear shear flow in the presence of DLVO and non-DLVO forces // *Langmuir: the ACS journal of surfaces and colloids*. 2019, vol. 35, no. 34, pp. 11175-11187.
 17. Wall function model for particulate fouling applying XDLVO theory / Ojaniemi U., Riihimaki M., Manninen M., Pattiangas T. // *Chemical Engineering Science*. 2012, vol. 84, pp. 57-69.
 18. Gomez-Flores A., Solongo S.K., Heyes G.W. Bubble-particle interaction with hydrodynamics, XDLVO theory, and surface roughness for flotation in an agitated tank using CFD simulations // *Minerals Engineering*. 2020, vol. 152, article 106368.
 19. Mozhdhehei A., Mercury L., Slodczyk A. Ubiquity of the micrometer-thick interface along quartz-water boundary // *Langmuir*. 2024, vol. 40, issue 25, pp. 13025-13041.
 20. Филиппов А.В. Электростатическое взаимодействие двухслойных макрочастиц // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2023. Т. 164. Вып. 1 (7). С. 37-55.
 21. Direct measurement of interaction force between solid surface and air bubble: Relationship between interaction force and contact angle / You K., Lim K., Han S., Kwon S. // *Minerals Engineering*. 2020, vol. 152, 106358.
 22. Hu P., Liang L. The role of hydrophobic interaction in the heterocoagulation between coal and quartz particles // *Minerals Engineering*. 2020, vol. 154, 106421.
 23. 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.
 24. Transition of liquid drops on microstructured hydrophobic surfaces from the impaled Wenzel state to the "fakir" Cassie-Baxter state / Tzitzilis D., Tsekeridis C., Ntakoumis I., Papadopoulos P. // *Langmuir*. 2024, vol. 40, issue 26, pp. 13422-13427.
 25. Бойнович Л.Б., Емельяненко А.М. Развитие учения о поверхностных силах – от концепции расклинивающего давления к современным нанотехнологиям // *Журнал физической химии*. 2020. Т. 94. № 3. С. 371-380.
 26. Luo Y., Pang A.-P., Lu X. Liquid-solid interface under dynamic shear flow: Recent insights into the interfacial slip // *Langmuir*. 2020, vol. 38, issue 15, pp. 4473-4482.
 27. Nizkaya T.V., Asmolov E.S., Vinogradova O.I. Gas cushion model and hydrodynamic boundary conditions for superhydrophobic textures // *Physical Review E*. 2014, vol. 90 (4), pp. 043017
 28. Nanoscale investigation into dynamics of thin liquid films during bouncing and attachment of rising air bubbles on hydrophilic and hydrophobic surfaces / Hamidzadeh F., Huang K., Ye X., Pan L. // *Langmuir*. 2023, vol. 39, issue 49, pp. 18082-18092.
 29. Sherma A., Nirmalkaz N. Bulk nanobubbles through gas supersaturation originated by hot and cold solvent mixing // *Langmuir*. 2024, vol. 40, issue 24, pp. 12729-12743.
 30. Song J.-W., Fan L.-W. Temperature dependence of the contact angle of water: A review of research progress, theoretical understanding and implications for boiling heat transfer // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2021, vol. 288, article 102339.
 31. Song J.-W., Zeng D.-L., Fan L.-W. Temperature dependence of contact angles of water on a stainless steel surface at elevated temperatures and pressure: In situ characterization and thermodynamic analysis // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2020, vol. 561, pp. 870-880.
 32. Есипова Н.Е., Русанов А.И., Соболев В.Д. Температурная зависимость краевого угла сидячего пузырька на границе вода-кремний // *Коллоидный журнал*. 2020. Т. 82. № 5. С. 569-575.
 33. Чураев Н.В., Соболев В.Д. Вклад структурных сил в смачивание поверхности кварца растворами электростатически стабилизированных коллоидов

тролита // Коллоидный журнал. 2000. Т. 62. № 2. С. 278-285.

34. Современная теория капиллярности: к 100-летию теории капиллярности Гиббса / под ред. А.И. Русанова, Ф.Ч. Гудрича. Л.: Химия, 1980. 344 с.
35. Емельяненко К.Ф., Емельяненко А.М., Бойнович Л.Б. Обзор современного состояния исследований адгезионных явлений на границах твердых тел с твердыми и жидкими водными средами // Коллоидный журнал. 2022. Т. 84. № 3. С. 274-300.
36. Bubble growth on hydrophobic rough surfaces in the shear flow / Li J., Li X., Wang C., He P., Chen H. // Langmuir. 2024, vol. 40, issue 18, pp. 9630-9635.

References

1. Xie L., Wang J., Lu Q., Hu W., Yang D., Qiao C., Peng X., Peng Q., Wang T., Sun W., Liu Q., Zhang H., Zeng H. Surface interaction mechanisms in mineral flotation: Fundamentals, measurements, and perspectives. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2021;295:102491.
2. Li D., Wang H., Li C., Liang Y., Yan X., Zhang H. Determination of the typical interactions among dispersed phases relevant to flotation applications: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2021;288:102359.
3. Misra R.P., De Souza J.P., Blankschtein D., Bazant M.Z. Theory of surface forces in multivalent electrolytes. *Langmuir*. 2019;35(35):11550-11565.
4. Mohamad H.S., Neuber S., Helm C.A. Surfaces forces of asymmetrically grown polyelectrolyte multilayers: Searching for the charges. *Langmuir*. 2019;35(48):15491-15499.
5. Adibnia V., Mirbagheri M., Latreille P.L., Banquy X., De Crescenzo G., Rochefort D. Interfacial forces across ionic liquid solutions: Effects of ion concentration and water domains. *Langmuir*. 2019;35(48):15585-15591.
6. Huang K., Yoon R.H. Surface forces in the thin liquid films (TLFS) of water confined between n-alkane drops and hydrophobic gold surfaces. *Langmuir*. 2019;35(48):15681-15691.
7. Evdokimov S.I., Golikov N.S., Pryalukhin A.F., Kondratiev V.V., Mishedchenko A., Kuzina A.V., Bryukhanova N.N., Karlina A.I. Studying flotation of gold microdispersions with carrier minerals and pulp aeration with a steam-air mixture. *Minerals*. 2024;14(1):108.
8. Evdokimov S.I., Golikov N.S., Zadkov D.A., Voitovich E.V., Kondratiev V.V., Petrovskiy A.A., Konyukhov V.Y., Gladkikh V.A. Studying the flotation of gold-bearing ores using carrier minerals. *Minerals*. 2024;14(1):88.
9. Evdokimov S.I., Guseva E.A., Konstantinova M.V., Vaitekunene E.L., Filushina E.V. Mechanism of coagulation in the conditions of flotation of gold microdispersions with carrier minerals. *Gorniy informacionno-analiticheskiy bulletin (nauchno-tehnicheskiy zhurnal) [Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)]*, 2023;(11-1):190-206. (In Russ.)
10. Chanturia V.A., Shadrinova I.V., Gorlova O.E. Innovative processes of deep and ecologically safe processing of man-made raw materials in the conditions of new economic challenges. *Ustojchivoe razvitie gornyh territoriy [Sustainable development of mountain territories]*, 2021;(13-2(48)):224-237. (In Russ.)
11. Gong L., Wu F., Yang W., Huang C., Li W., Wang X., Wang J., Tang T., Zeng H. Unraveling the hydrophobic interaction mechanisms of hydrocarbon and fluorinated surfaces. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2023;635:273-283.
12. 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;313.
13. Rajupet S. DLVO interactions between particles and rough surfaces: An extended surface element integration method. *Langmuir*. 2021;37(45):13208-13217.
14. Guo H., Kovscek A.R. Investigation of the effects of ions on short-range non-DLVO forces at the calcite/brine interface and implications for low salinity oil-recovery processes. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2019;552:295-311.
15. Li K., Wang W., Xiao F., Ge Y., Jin H., Yu Z., Gong J., Gao W., Peng Z. Atomic force microscopy study of non-DLVO interactions between drops and bubbles. *Langmuir*. 2021;37(22):6830-6837.
16. Bal V. Stability characteristics of nanoparticles in a laminar linear shear flow in the presence of DLVO and non-DLVO forces. *Langmuir: the ACS journal of surfaces and colloids*. 2019;35(34):11175-11187.
17. Ojaniemi U., Riihimäki M., Manninen M., Pattiangas T. Wall function model for particulate fouling applying XDLVO theory. *Chemical Engineering Science*. 2012;84:57-69.
18. Gomez-Flores A., Solongo S.K., Heyes G.W. Bubble-particle interaction with hydrodynamics, XDLVO theory, and surface roughness for flotation in an agitated tank using CFD simulations. *Minerals Engineering*. 2020;152:106368.
19. Mozhdzheev A., Mercury L., Slodczyk A. Ubiquity of the micrometer-thick interface along quartz-water boundary. *Langmuir*. 2024;40(25):13025-13041.
20. Filippov A.V. Electrostatic interaction of two-layer macroparticles. *Zhurnal eksperimentalnoy i teoreticheskoy fiziki [Journal of Experimental and Theoretical Physics]*, 2023;(164-1(7)):37-55. (In Russ.)
21. You K., Lim K., Han S., Kwon S. Direct measurement of interaction force between solid surface and air bubble: Relationship between interaction force and contact angle. *Minerals Engineering*. 2020;152:106358.
22. Hu P., Liang L. The role of hydrophobic interaction in the heterocoagulation between coal and quartz particles. *Minerals Engineering*. 2020;154:106421.
23. 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;98:240-250.
24. Tzitzilis D., Tsekeridis C., Ntakoumis I., Papadopoulos P. Transition of liquid drops on microstructured hydrophobic surfaces from the impaled Wenzel state to the "fakir" Cassie-Baxter state. *Langmuir*. 2024;40(26):13422-13427.
25. Boinovich L.B., Emelyanenko A.M. Development of the doctrine of surface forces - from the concept of proclining pressure to modern nanotechnology. *Zhurnal fizicheskoy himii [Journal of Physical Chemistry]*, 2020;94(3):371-380. (In Russ.)

26. Luo Y., Pang A-P., Lu X. Liquid-solid interface under dynamic shear flow: Recent insights into the interfacial slip. *Langmuir*. 2020;38(15):4473-4482.
27. Nizkaya T.V., Asmolov E.S., Vinogradova O.I. Gas cushion model and hydrodynamic boundary conditions for superhydrophobic textures. *Physical Review E*. 2014;90(4):043017
28. Hamidzadeh F., Huang K., Ye X., Pan L. Nanoscale investigation into dynamics of thin liquid films during bouncing and attachment of rising air bubbles on hydrophilic and hydrophobic surfaces. *Langmuir*. 2023;39(49):18082-18092.
29. Sherma A., Nirmalkaz N. Bulk nanobubbles through gas supersaturation originated by hot and cold solvent mixing. *Langmuir*. 2024;40(24):12729-12743.
30. Song J.-W., Fan L.-W. Temperature dependence of the contact angle of water: A review of research progress, theoretical understanding and implications for boiling heat transfer. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2021;288:102339.
31. Song J.-W., Zeng D.-L., Fan L.-W. Temperature dependence of contact angles of water on a stainless steel surface at elevated temperatures and pressure: In situ characterization and thermodynamic analysis. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2020;561:870-880.
32. Esipova N.E., Itskov S.V., Sobolev V.D. Temperature dependence of sessile bubble contact angle at a water-silicon interface. *Kolloidnyi zhurnal [Colloid Journal]*, 2023;(85-2):158-166. (In Russ.)
33. Churaev N.V., Sobolev V.D. Contribution of structural forces to wetting of quartz surface by electrolyte solutions. *Kolloidnyi zhurnal [Colloid Journal]*, 2000;(62-2):278-285. (In Russ.)
34. Rusanov A.I., Goodrich F.Ch. *Sovremennaya teoriya kapillyarnosti: k 100-letiyu teorii kapillyarnosti Gibbsa [Modern theory of capillarity: To the 100th anniversary of Gibbs' theory of capillarity]*. Leningrad: Khimiya, 1980, 344 p. (In Russ.)
35. Emelianenko K.A., Emelianenko A.M., Boinovich L.B. Review of the current state of research adhesion phenomena on the boundaries of solids with solid and liquid aqueous media. *Kolloidnyi zhurnal [Colloid Journal]*, 2022;(84-3):274-300. (In Russ.)
36. Li J., Li X., Wang C., He P., Chen H. Bubble growth on hydrophobic rough surfaces in the shear flow. *Langmuir*. 2024;40(18):9630-9635.

Поступила 04.05.2024; принята к публикации 10.09.2024; опубликована 28.03.2025
Submitted 04/05/2024; revised 10/09/2024; published 28/03/2025

Евдокимов Сергей Иванович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Россия.
Email: eva-ser@mail.ru. ORCID0000-0002-2960-4786

Герасименко Татьяна Евгеньевна – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Россия.
Email: gerasimenko_74@mail.ru. ORCID0000-0001-7048-4379

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

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

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

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

Olga E. Gorlova – DrSc (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Geology, Mine Surveying and Mineral Processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia; Institute of Problems of Integrated Subsoil Development named after Academician N.V. Melnikov of the RAS, Moscow, Russia.
Email: gorlova_o_e@mail.ru

Natalia N. Orekhova – DrSc (Eng.), Associate Professor, Lead Researcher, Institute of Problems of Integrated Subsoil Development named after Academician N.V. Melnikov of the RAS, Moscow, Russia.
Email: n_orehova@mail.ru