



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

УДК 622.765

DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-2-49-57

ОБОСНОВАНИЕ СВЯЗИ ПРЕДЕЛЬНОЙ ТОЛЩИНЫ МЕЖФАЗНОЙ ПЛЕНКИ СО СКОЛЬЖЕНИЕМ ЖИДКОСТИ

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

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

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

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

Аннотация. **Постановка задачи (актуальность работы).** Работа направлена на обоснование связи предельной толщины смачивающей пленки со скольжением жидкости и разработку выражения для поправки на термическое скольжение жидкости на гидрофобной поверхности к силе гидродинамического сопротивления утончению смачивающей пленки. **Цель работы.** Получение новых знаний в области устойчивости смачивающих пленок, осложненной учетом скольжения жидкости, имеет целью разработку эффективной технологии извлечения микродисперсий золота методом флотации. **Используемые методы.** Выражение для поправки к силе гидродинамического сопротивления утончению смачивающих пленок получено путем совместного решения уравнения Навье-Стокса, записанного для исследуемых условий, и уравнения неразрывности для несжимаемой жидкости. Натурные эксперименты по флотации выполнены на пробах руд двух участков Березняковского золоторудного месторождения. В опытах по флотации использовали лабораторную установку на основе флотомашини колонного типа квадратного сечения размером 47×47 мм. **Новизна.** Выявлено, что влияние скольжения жидкости на снижение предельной толщины смачивающей пленки заключается в уменьшении силы гидродинамического сопротивления удалению жидкости из межфазного зазора термокапиллярным, термоосмотическим и капиллярно-концентрационным поверхностным течением. **Результат.** Получено выражение для поправки на скольжение к силе гидродинамического сопротивления в процессе взаимодействия частицы с пузырьком. С целью использования эффекта скольжения флотацию выполняют термонагруженными пузырьками, смешивая воздух, поступающий во флотомашину, с горячим водяным паром. В этом случае температура воды в граничных слоях пузырьков увеличивается за счет теплоты конденсации пара, что интенсифицирует эффект скольжения. **Практическая значимость.** Проведены натурные испытания разработанной технологии на двух пробах золотосодержащей руды, результаты которых доказывают ее эффективность.

Ключевые слова: флотация, межфазная пленка, скольжение, поправка, сила гидродинамического сопротивления, паровоздушная смесь, золотосодержащая руда, натурные эксперименты

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., 2024

Для цитирования

Обоснование связи предельной толщины межфазной пленки со скольжением жидкости / Евдокимов С.И., Герасименко Т.Е., Горлова О.Е., Орехова Н.Н. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №2. С. 49-57. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-49-57>



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

PROVIDING A RATIONALE FOR THE RELATIONSHIP BETWEEN LIMIT INTERFACIAL FILM THICKNESS AND SLIP OF LIQUID

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

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

² Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

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

Abstract. Problem Statement (Relevance). The research is aimed at providing rationale for the relationship between limit thickness of a wetting film and slip of liquid and developing an expression to correct for the thermal slip of liquid on a hydrophobic surface to force of hydrodynamic resistance to thinning of the wetting film. **Objectives.** Obtaining new knowledge in the field of stability of wetting films complicated by taking into account the slip of liquid aims at developing an efficient technology for the extraction of gold microdispersions by flotation. **Methods Applied.** The expression for the correction to force of hydrodynamic resistance to thinning of wetting films is obtained by solving simultaneous equations, namely the Navier-Stokes equation, written for the conditions under study, and the continuity equation for incompressible liquid. In-situ flotation experiments were performed on ore samples from two sections of the Berezhnyakovskoe gold deposit. The experiments on flotation were carried out on a laboratory unit based on a column-type flotation machine of a square cross-section, 47x47 mm. **Originality.** It has been revealed that the influence of slip of liquid on reduction of limit thickness of the wetting film consists in reduced force of hydrodynamic resistance to liquid removal from the interfacial gap by thermocapillary, thermoosmotic and capillary concentration surface flows. **Result.** The authors obtained an expression for the correction for slip to hydrodynamic resistance force in the process of the interaction between a particle and a bubble. In order to use the effect of sliding, flotation is performed by thermally loaded bubbles, mixing air entering the flotation machine with hot water vapor. In this case, water temperature in the boundary layers of bubbles increases due to steam condensation heat, which intensifies the slip effect. **Practical Relevance.** Field tests of the developed technology were conducted on two samples of gold-bearing ore, and their results prove its efficiency.

Keywords: flotation, interfacial film, slip, correction, hydrodynamic resistance force, steam-air mixture, gold-bearing ore, full-scale experiments

The study was supported by the Russian Science Foundation under agreements No.23-27-00093 “Theoretical and experimental rationale for the mechanism of surface forces in the processes of coagulation and flotation under conditions of thermal effect on wetting films to create and learn industrial technological processes for the efficient recovery of gold microdispersions from ores and placers”.

For citation

Evdokimov S.I., Gerasimenko T.E., Gorlova O.E., Orekhova N.N. Providing a Rationale for the Relationship Between Limit Interfacial Film Thickness and Slip of Liquid. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 2, pp. 49-57. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-49-57>

Введение

Флотация остается основным процессом, применяемым при обогащении руд, что объясняется высокой эффективностью разработанных и применяемых технологий, основанных на результатах исследований процессов разделения минералов по смачиваемости на микро- и молекулярном уровнях [1-3]. Причем уменьшение размеров флотационной дисперсной фазы является причиной роста влияния поверхностных сил [4-7], баланс которых определяет селективность разделения мелких (безынерционных) частиц [8-12]. Очевидными решениями проблемы флотации мелких частиц [13-15] является применение нанопузырьков [16-21] или предварительная агрегация мелких частиц [22, 23].

При взаимодействии гидрофобных частиц снижению гидродинамического сопротивления течению жидкости в зазоре между частицами способствует

скольжение жидкости [24-26].

То, что флотация малых частиц – качественно новый процесс, доказывает применение при обсуждении результатов ее исследования специальной терминологии: «микрофлотация» [22] и флотация «безынерционных» частиц [27]. В терминах современной физикохимии экспериментальные данные по агрегации гидрофильных частиц осуществляют с привлечением теории ДЛФО. Однако в случае агрегации и флотации гидрофобных частиц для согласования теории и эксперимента необходимо применять новые механизмы далекодействующих поверхностных сил, объединенных в литературе общим названием «не-ДЛФО»-силы [28-30], учитываемых расширенной теорией ДЛФО (XDLVO [5, 31, 32]).

Было показано, что для дополнения сил, участвующих в разделении минералов, поверхностными силами, отличающимися высокой чувствительностью

к температуре, достаточно нагреть вблизи пузырька слой воды толщиной от 4 до 8 нм, внутри которого локализовано действие поверхностных сил. В настоящей работе нагрев воды в граничных слоях пузырьков осуществляют, выполняя аэрацию пульпы смесью воздуха с горячим ($\geq 104^\circ\text{C}$) водяным паром (паровоздушной смесью).

Цель работы – разработка поправки на термическое скольжение вязкой жидкости на гидрофобной поверхности при гидродинамическом взаимодействии частицы и пузырька в процессах флотации микродисперсий золота с применением режима аэрации пульпы паровоздушной смесью.

Теоретические положения

При флотации значение адсорбции Γ вдоль поверхности пузырьков непрерывно изменяется так, что адсорбция на периферии межфазной пленки оказывается выше, чем в тот же момент в центре пленки (рис. 1):

$$\Gamma(0,t) < \Gamma(a,t). \quad (1)$$

Разница $\delta\Gamma(r,t) = \Gamma(r,t) - \Gamma(a,t)$ является причиной появления напряжений сдвига и связанных с ними поверхностных течений Марангони – движущей силы процесса стабилизации межфазной пленки.

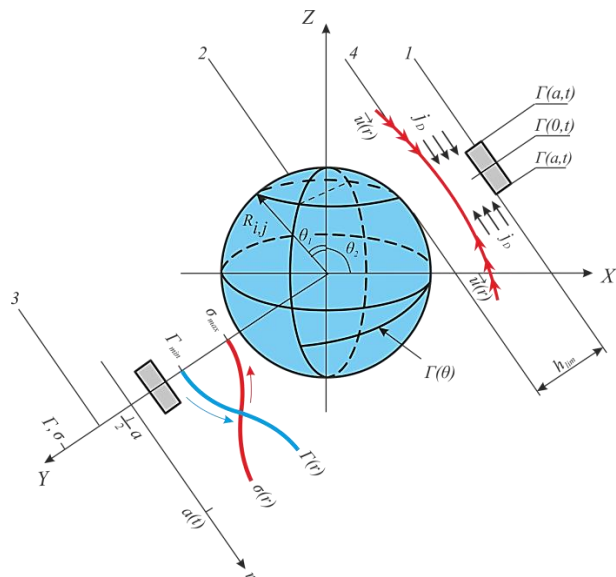


Рис. 1. Схема появления поверхностных течений Марангони при гидродинамическом взаимодействии твердой частицы (1) и пузырька воздуха (2): 1 – твердая частица; 2 – пузырек газа; 3 – распределение адсорбции $\Gamma(r)$ и поверхностного натяжения $\sigma(r)$; 4 – втекание жидкости в межфазный зазор

Fig. 1. Scheme of the surface Marangoni currents at a hydrodynamic interaction of a solid particle (1) and an air bubble (2): 1 is a solid particle, 2 is a gas bubble, 3 is a distribution of adsorption $\Gamma(r)$ and surface tension $\sigma(r)$, 4 is liquid inflow into the interfacial gap

Взаимодействие частицы с поверхностью пузырька завершается формированием между ними пленки жидкости, предельная толщина которой h_{lim} может быть найдена из условия равенства нулю потока жидкости через любое цилиндрическое сечение пленки [33]:

$$h_{\text{lim}} = \pi R_b \cdot \frac{9}{48} \cdot \frac{\gamma}{\eta} \cdot \frac{a}{b} \cdot \text{tg}^2 \cdot \frac{\theta}{2} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left[\mu_n^2 (1 + \mu_n^2 \chi) \right]^{-1}, \quad (2)$$

где γ – коэффициент торможения поверхности пузырька, связанный с динамической вязкостью жидкости η соотношением $\gamma/\eta = 0,3$; μ_n – корни функции Бесселя первого рода; $a/b = 3$ – коэффициент уплотнения зерна золота; τ_b – время ближнего гидродинамического взаимодействия частицы с пузырьком;

$\tau_D = \frac{b}{v_\Gamma} + \frac{b}{v_T} + \frac{b}{v_\chi}$ – время релаксации к состоянию

нового равновесия пленки (время, в течение которого объем вытекающей жидкости отличается не более чем на 1% от полного изменения объема при переходе пленки из одного состояния равновесия в другое); $\chi = \tau_b/2\tau_D$; $v_\Gamma = R_b \cdot \eta^{-1} (\partial\sigma/\partial C) \Delta C$ – скорость капиллярно-концентрационного потока [48, 49]; $v_T = R_b \cdot \eta^{-1} (\partial\sigma/\partial T) \Delta T$ – скорость термокапиллярного потока; $v_\chi = 2h \cdot \zeta \cdot R_b \cdot T / (\partial T/\partial R_b)$ – скорость термоосмотического потока; ΔT , ΔC – перепад по длине межфазной пленки температуры и концентрации ПАВ; $\zeta = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{с}$ – коэффициент термоосмоса для воды.

Выведем выражение для поправки на термическое скольжение к силе, оказывающей гидродинамическое сопротивление удалению жидкости из межфазного зазора между частицей и пузырьком.

Для описания гидродинамического процесса в исследуемых условиях уравнение Навье-Стокса запишем в следующем виде [34]:

$$\mu \left(\left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} - \frac{v_r}{r^2} \right) e_r + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) e_z \right) - \frac{\partial p}{\partial r} e_r - \frac{\partial p}{\partial z} e_z = 0. \quad (3)$$

Тогда для компоненты e_r получается следующее уравнение:

$$\mu \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} - \frac{\partial p}{\partial r} = 0. \quad (4)$$

Уравнение неразрывности для несжимаемой жидкости $\nabla \cdot v = 0$ в цилиндрической системе координат имеет вид

$$\frac{1}{r} \frac{\partial (r v_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0. \quad (5)$$

Откуда для осесимметричных течений $v_\theta = 0$ следует

$$\frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial (rv_r)}{\partial r} = 0. \quad (6)$$

Интегрированием уравнения (4) получим соотношение для радиальной составляющей скорости потока жидкости:

$$v_r = \int \frac{\partial v_r}{\partial z} dz = \frac{1}{\eta} \frac{\partial p}{\partial r} \cdot \int (z + C_1) dz = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} \left(\frac{1}{2} z^2 + C_1 z + C_2 \right). \quad (7)$$

Постоянные интегрирования даются соотношениями

$$z = 0, \quad \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} \cdot C_2 - h_{\text{lim}} \cdot \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} \cdot C_1 = 0, \quad C_2 = h_{\text{lim}} \cdot C_1; \quad (8)$$

$$z = h, \quad \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} \left(\frac{1}{2} h^2 + C_1 h + C_2 \right) = 0, \quad (9)$$

$$\frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} \neq 0, \quad \frac{1}{2} h^2 + C_1 h + C_2 = 0.$$

С учетом соотношений (8) и (9) несложно найти величины постоянных интегрирования

$$C_1 = -\frac{1}{2} \cdot \frac{h^2}{h + h_{\text{lim}}}, \quad C_2 = -\frac{h_{\text{lim}}}{2} \cdot \frac{h^2}{h + h_{\text{lim}}}, \quad (10)$$

подстановкой которых в уравнение (7) оказывается возможным получить в удобной форме уравнения радиальной составляющей скорости потока

$$v_r = \frac{1}{2\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} \left(z^2 - \frac{h^2}{h + h_{\text{lim}}} \cdot z - \frac{h^2}{h + h_{\text{lim}}} \right) \quad (11)$$

и производной радиальной скорости потока

$$\frac{\partial v_r}{\partial z} = \frac{1}{2\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} \left(2z - \frac{h^2}{h + h_{\text{lim}}} \right). \quad (12)$$

Тогда интегрированием уравнения неразрывности (6) по z получим

$$\int_0^h \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial p}{\partial r} \right) dz = \frac{h^3}{6\mu} \cdot \frac{h + 4h_{\text{lim}}}{h + h_{\text{lim}}} \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial^2 (rp)}{\partial r^2}. \quad (13)$$

Обозначив через $K = \frac{h^3}{6\mu} \cdot \frac{h + 4h_{\text{lim}}}{h + h_{\text{lim}}}$, уравнение для давления в дифференциальной форме запишем в виде

$$K \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right) = Ur. \quad (14)$$

Выражение для давления

$$p = \frac{U}{4K} \cdot r^2 + C_1 \ln(r) = C_2 \quad (15)$$

получим интегрированием дифференциального уравнения (14):

$$K \int \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right) dr = \frac{U}{K} \int r dr. \\ r \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{U}{K} \cdot \frac{r^2}{2} + C_1, \quad (16) \\ \int \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{U}{2K} \int r dr + C_1 \int \frac{dr}{r}.$$

Для определения силы гидродинамического сопротивления, тормозящей движение твердой частицы, проинтегрируем выражение (16) по ее поверхности и после подстановки значения K получим:

$$F^* = -F \cdot \Phi = -\frac{3}{2} \pi \mu \cdot \frac{UR^4}{h^3} \cdot \Phi, \quad (17)$$

где Φ – искомая поправка на тепловое скольжение жидкости по гидрофобной поверхности, дается выражением

$$\Phi = \frac{h + h_{\text{lim}}}{h + 4h_{\text{lim}}}. \quad (18)$$

Поскольку поправка на скольжение (18) всегда меньше единицы, то ее влияние на эффективность образования флотокомплекса проявляется в снижении абсолютной величины h_{lim} (2) в результате уменьшения силы гидродинамического сопротивления (17) удалению жидкости из межфазного зазора между частицей и пузырьком. Если связать структуру воды в граничных слоях пузырьков (за слоем «связанной» воды размещены противоионы слоя Штерна [35]) с их «гидрофобностью», то для использования эффекта скольжения достаточно нагреть воду в слое толщиной 4-8 нм. С этой целью в качестве газовой фазы при флотации используют смесь воздуха с горячим водяным паром, теплота конденсации которого затрачивается на повышение температуры воды в граничных слоях пузырьков.

Полученные результаты и их обсуждение

Результаты расчета (в среде Maple 2021) значений предельной толщины межфазной пленки h_{lim} приведены на **рис. 2**.

Как следует из данных **рис. 2, а**, высокая вероятность осаждения мелких частиц на поверхность пузырька существует только вблизи его верхнего полюса. При перемещении частицы по поверхности пузырька к экватору сила гидродинамического сопротивления удалению жидкости из межфазного зазора увеличивается за счет выравнивания встречных потоков, образованных скольжением жидкости и конвекцией Марангони, и эффективность захвата становится ничтожно малой (**рис. 2, б**). Только при условии $\chi \gg 1$ (где χ – комплексный параметр, учитывающий различные механизмы скольжения – термокапиллярный, термоосмотический и капиллярно-концентрационный) движущей силой уменьшения предельной толщины смазывающей пленки h_{lim} является течение, направленное от ее центра к периферии (**рис. 2, в**).

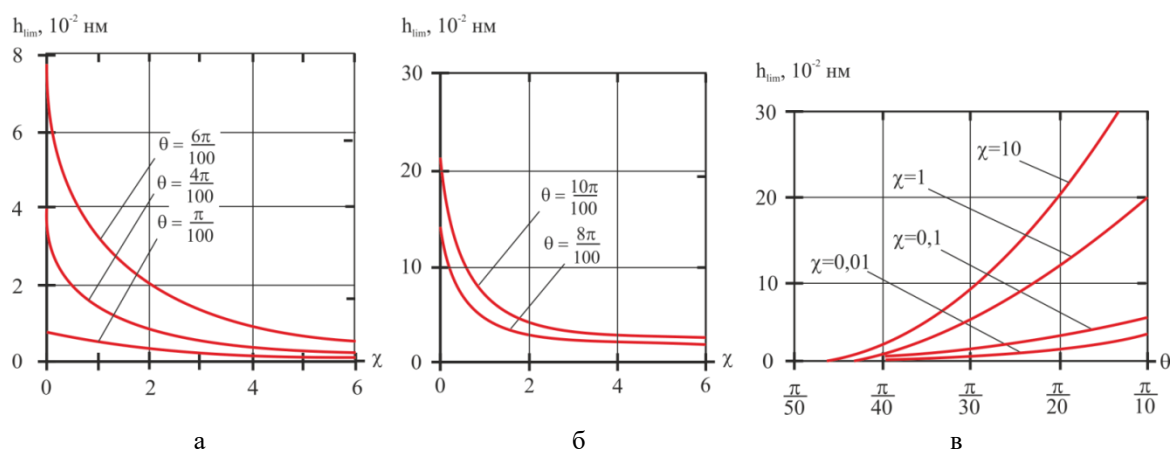


Рис. 2. Результаты анализа зависимости предельной толщины межфазной пленки h_{lim} от факторов флотации: зависимость h_{lim} от величины поправки на стабилизацию межфазной пленки $\chi = \tau_b/2\tau_D$ (при угле встречи θ частицы с пузырьком от $\pi/100$ до $6\pi/100$) (а) и при угле встречи θ от $8\pi/100$ до $10\pi/100$) (б) и от угла встречи θ частицы с пузырьком (при изменении величины поправки на стабилизацию межфазной пленки χ от 0,01 до 10) (в)

Fig. 2. Results of the analysis of the dependence between limit interfacial film thickness h_{lim} and flotation factors: dependence between h_{lim} and interfacial film stabilization correction $\chi = \tau_b/2\tau_D$ (at impact angle θ of the particle with the bubble from $\pi/100$ to $6\pi/100$) (a) and at impact angle θ from $8\pi/100$ to $10\pi/100$) (б) and impact angle θ of the particle with the bubble (when changing interfacial film stabilization correction χ from 0.01 to 10) (в)

Изменение предельной толщины межфазной пленки h_{lim} в координатах $\frac{\tau_b}{\tau_D} - \theta$ приведено на рис. 3. Гра-

фики рис. 3 не противоречат графикам рис. 2. Таким образом, следствием нагрева воды в граничных слоях пузырьков является высокая скорость ее удаления из смачивающих пленок интенсивным скольжением.

При флотации руд пробы-1 по технологической схеме, принятой на действующей золотоизвлекательной фабрике, в товарный концентрат извлечено 82,93% золота при выходе концентрата 3,07% и содержании 20,80 г/т золота. Эксперименты выполнены по принципу непрерывного процесса.

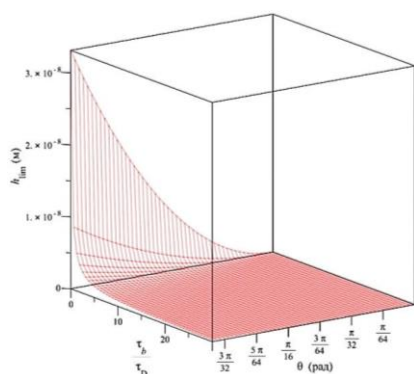


Рис. 3. Результаты анализа h_{lim} в координатах $\frac{\tau_b}{\tau_D} - \theta$

Fig. 3. Results of h_{lim} analysis in coordinates $\frac{\tau_b}{\tau_D} - \theta$

При флотации по схеме рис. 4 использован режим флотации паровоздушной смесью: при каждом смешении черного концентрата с исходной рудой в течение короткого периода времени (15-20% от общего) в качестве газовой фазы использовали паровоздушную смесь. В этом случае достигался максимум синергетического эффекта – от увеличения содержания Au от 0,77 до 1,22 г/т (при первом смешении черного концентрата с исходной рудой) и до 1,62 г/т при втором смешении (то есть на 58,4 и 110,4 отн.% по отношению к исходной руде) и аэрации пульпы паровоздушной смесью. При этом операционное извлечение Au увеличивалось от 83,74 до 91,28 и 94,40% соответственно. В опыте, выполненном в замкнутом цикле (7 параллельных навесок), извлечение Au в товарный концентрат составило 87,62% при содержании 27,65 г/т Au при уменьшении выхода концентрата $\Delta\gamma$ на 20,52 отн.%.

При флотации руд пробы-2 (0,96 г/т Au в руде) при сохранении достигнутого по базовой технологии уровня извлечения Au (74,95%) применение режима флотации пузырьками воздуха, заполненными горячим водяным паром, при двукратном смешении черного концентрата с исходным питанием позволяет получить прирост содержания золота в черном концентрате с 4,97 до 6,29 г/т (степень концентрации золота увеличивается с 5,199 до 6,579) при снижении выхода концентрата.

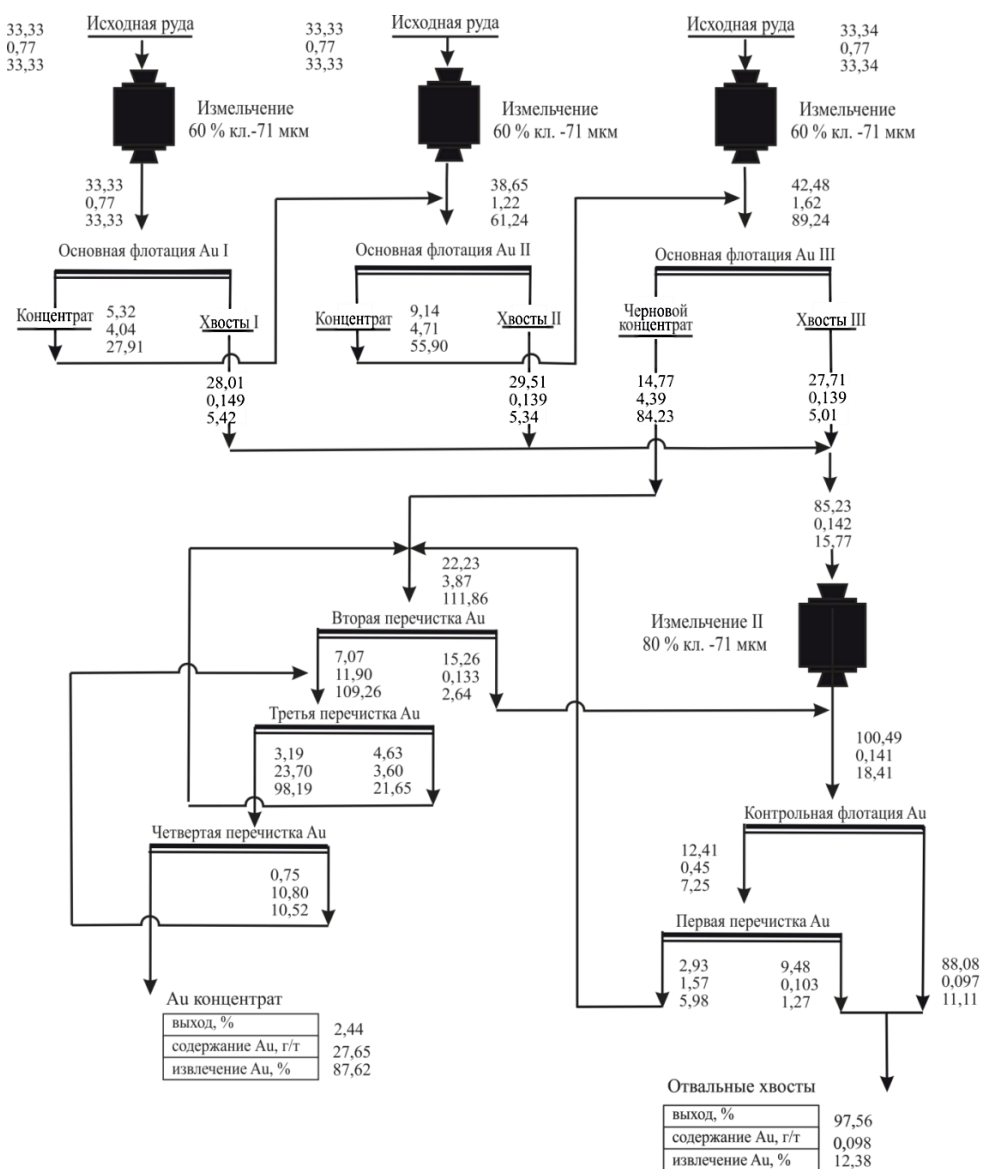


Рис. 4. Результаты обогащения пробы-1 в опыте, моделирующем замкнутый цикл
 Fig. 4. Results of sample 1 enrichment in the experiment simulating the closed cycle

Заключение

Получено выражение для поправки на термическое скольжение к гидродинамической силе сопротивления утончению смачивающей пленки. Величина поправки выражается в долях критической толщины смачивающей пленки: на этих расстояниях между частицей и пузырьком начинает проявляться действие поверхностных сил структурного происхождения – сил гидрофобного притяжения и гидрофильного отталкивания. Поправка, абсолютная величина которой меньше единицы, учитывает три механизма поверхностных течений жидкости в межфазном зазоре – термокапиллярный, термоосмотический и капиллярно-концентрационный.

С целью использования эффекта скольжения для повышения эффективности разделения минералов в качестве газовой фазы при флотации используют

смесь воздуха с горячим водяным паром. В этом случае температура воды в граничных слоях пузырьков увеличивается за счет теплоты конденсации пара, что интенсифицирует эффект скольжения.

При выполнении натуральных экспериментов на руде пробы-1 технологический эффект от использования разработанной технологии заключался в уменьшении выхода концентрата на 20,52 отн.% и увеличении извлечения золота на 4,69 абс.% в сравнении с базовой технологией.

Эффективность разработанной технологии при флотации руд пробы-2 (0,96 г/т Au в руде) проявлялась в том, что при сохранении достигнутого по базовой технологии уровня извлечения Au (74,95%) степень концентрации золота в операции основной флотации увеличивалась с 5,199 до 6,579 при снижении выхода концентрата.

Список источников

1. Surface interaction mechanisms in mineral flotation: Fundamentals, measurements, and perspectives / Xie L., Wang J., Lu Q., Hu W., Zeng H. // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2021, vol. 295, 102491.
2. Determination and modulation of the typical interactions among dispersed phases relevant to flotation applications / Li D., Wang H., Li C., Liang Y., Yan X., Zhang H. // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2021, vol. 288, 102359.
3. Flotation surface chemistry of water-soluble salt minerals: from experimental results to new perspectives / Sun K., Nguyen C.V., Nguyen N.N., Nguyen Anh V. // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2022, vol. 309, 102775.
4. Enhancing flotation separation of fine copper oxide from silica by microbubble assisted hydrophobic aggregation / Long Q., Wang H., Jiang F., Tan W., Xu Z. // *Minerals Engineering*. 2020, vol. 189, 107863.
5. Li Z., Yoon R.-H. AFM force measurements between gold and silver surface treated in ethyl xanthatesolutions: Effect of applied potentials // *Minerals Engineering*. 2012, vol. 36-38, pp. 126-131.
6. Attraction between hydrophobic surface studied by atomic microscopy / Nguyen A.V., Nalaskowski J., Miller J.D., Butt H.-J. // *International Journal of Mineral Processing*. 2003, vol. 72, iss. 1-4, pp. 215-225.
7. Hu P., Liang L. The role of hydrophobic interaction in the heterocoagulation between coal and quartz particles // *Mineral Engineering*. 2020, vol. 154, 106421.
8. Understanding the hetero-aggregation mechanism among sulfide and oxide minerals particles driven by bifunctionalsurfactants: Intensification flotation of oxide minerals / Liu S., Xie L., Liu G., Zhong H., Zeng H. // *Minerals Engineering*. 2021, vol. 169, 106928.
9. Krasowska M., Malysa K. Wetting films in attachment of the colliding bubble // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2007, vol. 134-135, pp. 138-150.
10. Gillies G., Kappl M., Butt H.-J. Direct measurements of particle-bubble interactions // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2005, vol. 114-115, pp. 165-172.
11. Attard P. Nanobubbles and hydrophobic attraction // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2003, vol. 104, iss. 1-3, pp. 75-91.
12. Skvarla J. Hydrophobic interaction between macroscopic and microscopic surfaces. Unification using surface thermodynamics // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2001, vol. 91, iss. 3, pp. 335-390.
13. Column rougher flotation of fine niobium-bearing particles assisted with micro and nanobubbles / Capponi F., Azevedo A., Oliveira H., Rubio J. // *Minerals Engineering*. 2023, vol. 199, Article 108119.
14. Wang D., Lin Q. Hydrodynamics of froth flotation and mics of froth flotation and its effects on fine and ultrafine mineral particle flotation // *Minerals Engineering*. 2021, vol. 173, Article 107220.
15. Zhang Z., Ren L., Zhang Y. Role of nanobubbles in the flotation of fine rutile particles // *Minerals Engineering*. 2021, vol. 172, Article 107140.
16. Column rougher flotation of fine niobium-bearing particles assisted with micro and nanobubbles / Capponi F., Azevedo A., Oliveira H., Rubio J. // *Minerals Engineering*. 2023, vol. 199, 108119.
17. Zhang Z., Ren L., Zhang Y. Role of nanobubbles in the flotation of fine rutile particles // *Minerals Engineering*. 2021, vol. 172, 107140.
18. Recent advances for understanding the role of nanobubbles in particles flotation / Zhang F., Sun L., Yang H., Gui X., Xing Y. // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2021, vol. 291, 102403.
19. 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, iss. 8, pp. 1491-1492.
20. Han H., Liu An., Wang H. Flotation kinetics performance of different coal size fractions with nanobubbles // *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2022, vol. 29, iss. 8, pp. 1502-1510.
21. Jadhav A.J., Barigou M. Bulk nanobubbles: that is the question // *Langmuir*. 2020, vol. 36, iss. 7, pp. 1699-1708.
22. Свиридов В.В., Свиридов А.В., Никифоров А.Ф. Физико-химические основы процессов микрофлотации. СПб.: Лань, 2018. 416 с.
23. Bryk P., Bryk M. Effective interactions in polydisperse colloidal suspensions investigated using Ornstein-Zernike integral equations // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2009, vol. 338, iss. 1, pp. 92-98.
24. Reassessing water slippage in hydrophobic nanostructures / Zuo H., Javadpour F., Deng S., Jiang X., Li Z., Li H. // *Journal Chem. Phys*. 2020, vol. 153, 191101.
25. 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.
26. Slip flow of diverse liquids on robust superomniphobic surface / Wu Y., Cai M., Li Z., Song X., Wang H., Pei X., Zhou F. // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2014, vol. 414, pp. 9-13.
27. Евдокимов С.И., Панышин А.М., Солоденко А.А. Минералургия. В 2-х т. Т. 2. Успехи флотации. Владикавказ: ООО НПКП «МАВР», 2009. 992 с.
28. Bal V. Stability characteristics of nanoparticles in a laminar linear shear flow in the presence of DLVO and non-DLVO forces // *Langmuir*. 2019, vol. 35, no. 34, pp. 11175-11187.
29. A review of non-DLVO interactions in environmental colloidal systems / Grasso D., Subramaniam K., Butkus M., Strevett K., Bergendahl J. // *Environmental Science and Biotechnology*. 2002, vol. 1, pp. 17-38.
30. 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, no 22, pp. 6830-6837.

31. Wall function model for particulate fouling applying XDLVO theory / Ojaniemi U., Riihimäki M., Manninen M., Patikangas T. // *Chemical Engineering Science*. 2012, vol. 84, pp. 57-69.
32. Brant J.A., Childress A.E. Membrane-colloid interactions: comparison of extended DLVO predictions with AFM force measurements // *Environmental Engineering Science*. 2002, vol. 19, no 6, pp. 413-427.
33. Духин С.С. Динамический адсорбционный слой и эффект Марангони-Гиббса // *Современная теория капиллярности: к 100-летию теории капиллярности Гиббса / под ред. А.И. Русанова, Ф.Ч. Гудрича. Л.: Химия, 1980. 344 с.*
34. Comparison of attachment process of particles to air and oily bubbles in flotation / 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. // *Advanced Powder Technology*. 2023, vol. 34, iss. 7, 104059.
35. Belyaev A.V., Vinogradova O.I. Hydrodynamic interaction with super-hydrophobic surfaces // *Soft Matter*. 2010, vol. 6, pp. 4563-4570.
10. Gillies G., Kappl M., Butt H.-J. Direct measurements of particle-bubble interactions. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2005;114-115:165-172.
11. Attard P. Nanobubbles and hydrophobic attraction. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2003;104(1-3):75-91.
12. Skvarla J. Hydrophobic interaction between macroscopic and microscopic surfaces. Unification using surface thermodynamics. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2001;91(3):335-390.
13. Capponi F., Azevedo A., Oliveira H., Rubio J. Column rougher flotation of fine niobium-bearing particles assisted with micro and nanobubbles. *Minerals Engineering*. 2023;199:108119.
14. Wang D., Lin Q. Hydrodynamics of froth flotation and its effects on fine and ultrafine mineral particle flotation: A literature review. *Minerals Engineering*. 2021;173:107220.
15. Zhang Z., Ren L., Zhang Y. Role of nanobubbles in the flotation of fine rutile particles. *Minerals Engineering*. 2021;172:107140.
16. Capponi F., Azevedo A., Oliveira H., Rubio J. Column rougher flotation of fine niobium-bearing particles assisted with micro and nanobubbles. *Minerals Engineering*. 2023;199:108119.
17. Zhang Z., Ren L., Zhang Y. Role of nanobubbles in the flotation of fine rutile particles. *Minerals Engineering*. 2021;172:107140.
18. Zhang F., Sun L., Yang H., Gui X., Xing Y. Recent advances for understanding the role of nanobubbles in particles flotation. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2021;291:102403.
19. 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;29(8):1491-1492.
20. Han H., Liu An., Wang H. Flotation kinetics performance of different coal size fractions with nanobubbles. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2022;29(8):1502-1510.
21. Jadhav A.J., Barigou M. Bulk nanobubbles: that is the question. *Langmuir*. 2020;36(7):1699-1708.
22. Sviridov V.V., Sviridov A.V., Nikiforov A.F. *Fiziko-khimicheskie osnovy protsessov mikroflotatsii* [Physical and chemical bases of microflotation processes]. Saint Petersburg: Lan, 2018, 416 p. (In Russ.)
23. Bryk P., Bryk M. Effective interactions in polydisperse colloidal suspensions investigated using Ornstein-Zernike integral equations. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2009;338(1):92-98.
24. Zuo H., Javadpour F., Deng S., Jiang X., Li Z., Li H. Reassessing water slippage in hydro-phobic nanostructures. *Journal Chem. Phys*. 2020;153:191101.
25. Malkin A. Ya., Patlazhan S.A. Wall slip for complex liquids – Phenomenon and its causes. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2018; 257:42-57.
26. Wu Y., Cai M., Li Z., Song X., Wang H., Pei X., Zhou F. Slip flow of diverse liquids on robust superomniphobic surface. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2014;414:9-13.

References

1. Xie L., Wang J., Lu Q., Hu W., Zeng H. Surface interaction mechanisms in mineral flotation: Fundamentals, measurements, and perspectives. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2021;295:102491.
2. Li D., Wang H., Li C., Liang Y., Yan X., Zhang H. Determination and modulation of the typical interactions among dispersed phases relevant to flotation applications: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2021;288:102359.
3. Sun K., Nguyen C.V., Nguyen N.N., Nguyen Anh V. Flotation surface chemistry of water-soluble salt minerals: from experimental results to new perspectives. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2022;309:102775.
4. Long Q., Wang H., Jiang F., Tan W., Xu Z. Enhancing flotation separation of fine copper oxide from silica by microbubble assisted hydrophobic aggregation. *Minerals Engineering*. 2020;189:107863.
5. Li Z., Yoon R.-H. AFM force measurements between gold and silver surface treated in ethyl xanthate solutions: Effect of applied potentials. *Minerals Engineering*. 2012;36-38:126-131.
6. Nguyen A.V., Nalaskowski J., Miller J.D., Butt H.-J. Attraction between hydrophobic surface studied by atomic microscopy. *International Journal of Mineral Processing*. 2003;72(1-4):215-225.
7. Hu P., Liang L. The role of hydrophobic interaction in the heterocoagulation between coal and quartz particles. *Mineral Engineering*. 2020;154:106421.
8. Liu S., Xie L., Liu G., Zhong H., Zeng H. Understanding the hetero-aggregation mechanism among sulfide and oxide minerals particles driven by bifunctional surfactants: Intensification flotation of oxide minerals. *Minerals Engineering*. 2021;169:106928.
9. Krasowska M., Malysa K. Wetting films in attachment of the colliding bubble. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2007;134-135:138-150.

27. Evdokimov S.I., Panshin A.M., Solodenko A.A. *Mineralurgiya v 2-kh t. T. 2. Uspekhi flotatsii* [Minerallurgy. In 2 volumes. Vol. 2. Success of flotation]. Vladikavkaz: LLC NPKP MAVR, 2009, 992 p. (In Russ.)
28. Bal V. Stability characteristics of nanoparticles in a laminar linear shear flow in the presence of DLVO and non-DLVO forces. *Langmuir*. 2019;35(34):11175-11187.
29. Grasso D., Subramaniam K., Butkus M., Strevett K., Bergendahl J. A review of non-DLVO interactions in environmental colloidal systems. *Environmental Science and Biotechnology*. 2002;1:17-38.
30. 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.
31. Ojaniemi U., Riihimäki M., Manninen M., Pattikanen T. Wall function model for particulate fouling applying XDLVO theory. *Chemical Engineering Science*. 2012;84:57-69.
32. Brant J.A., Childress A.E. Membrane-colloid interactions: comparison of extended DLVO predictions with AFM force measurements. *Environmental Engineering Science*. 2002;19(6):413-427.
33. Dukhin S.S. *Dinamicheskiiy adsorbtsionnyi sloi i jefekt Marangoni-Gibbsa* [A dynamic adsorption layer and the Marangoni-Gibbs effect]. Leningrad: Khimiya, 1980, 344 p. (In Russ.)
34. 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;34(7):104059.
35. Belyaev A.V., Vinogradova O.I. Hydrodynamic interaction with super-hydrophobic surfaces. *Soft Matter*. 2010;6:4563-4570.

Поступила 10.04.2023; принята к публикации 26.04.2024; опубликована 27.06.2024
Submitted 10/04/2023; revised 26/04/2024; published 27/06/2024

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

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

Горлова Ольга Евгеньевна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: gorlova_o_e@mail.ru.

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

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

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

Olga E. Gorlova – DrSc (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Geology, Surveying and Mineral Processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: gorlova_o_e@mail.ru.

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