ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2023;(5-1):17-35
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.765 DOI: 10.25018/0236_1493_2023_51_0_17

ПОВЕРХНОСТНЫЕ СИЛЫ СТРУКТУРНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ В ПРОЦЕССАХ ФЛОТАЦИИ МИКРОДИСПЕРСИЙ ЗОЛОТА

С.И. Евдокимов[1], Т.Е. Герасименко[1], Ю.И. Кондратьев[1]

[1] Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, РСО-Алания, Россия, e-mail: gerasimenko_74@mail.ru

Аннотация: Для увеличения содержания извлекаемого металла в операции основной флотации используют наиболее флотационно-активную часть руды – выделенный из нее черновой концентрат. При таком смешении полезный эффект от увеличения содержания извлекаемого металла дополняется эффектом гидрофобных взаимодействий между гидрофобными минералами рудного питания и минералами чернового концентрата (минералами-носителями). Результатом гидрофобных взаимодействий является притяжение гидрофобных частиц, причина которого связана со скольжением жидкости вдоль гидрофобной поверхности и изменением энергетического состояния воды в их граничных слоях. Для обратного процесса – удаления частиц друг от друга – потребуется совершить работу по переносу в точку контакта частиц молекул воды из объема. Поэтому частицы ведут себя так, как будто между ними существуют силы притяжения (отрицательное расклинивающее давление) с радиусом действия, равным толщине граничного слоя жидкости. Рост по абсолютной величине сил гидрофобного прилипания использован для выполнения процесса флотации в условиях нагрева смачивающей пленки. Тепловой поток в смачивающую пленку можно «доставить» со стороны жидкой фазы путем нагрева всей флотационной системы (что требует больших энергозатрат) либо со стороны газовой фазы, заполнив пузырек теплоносителем (энергосберегающий подход). Во втором случае подаваемый при флотации для аэрации пульпы воздух смешивают с паром. На примере флотации золотосодержащих руд доказана эффективность новых технологических решений.

Ключевые слова: золото, руда, россыпь, совместное обогащение, гравитация, струйная флотация, паровоздушная смесь, экономическая оценка.

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

Для цитирования: *Евдокимов С. И., Герасименко Т. Е., Кондратьев Ю. И.* Поверхностные силы структурного происхождения в процессах флотации микродисперсий золота // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 5-1. – С. 17–35. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_51_0_17.

Surface forces of structural origin in micro-fine gold flotation

S.I. Evdokimov[1], T.E. Gerasimenko[1], Y.I. Kondratiev[1]

[1] North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia, e-mail: gerasimenko_74@mail.ru

© С.И. Евдокимов, Т.Е. Герасименко, Ю.И. Кондратьев. 2023.

Abstract: For increasing metal recovery in rougher flotation, the best floatable rougher concentrate is used. In this case, the effect of the higher metal recovery is added with the effect of hydrophobic interaction between hydrophobic crude ore minerals and rougher concentrate minerals (minerals–bearers). The hydrophobic interaction initiates attraction of hydrophobic particles because of sliding of water over a hydrophobic surface and due to change in the energy state of water in the boundary layers of the particles. The backward process of departure of particles from each other needs the transferal of water molecules at the point of contact. For this reason, the particles behave as if there are the attractive forces between them (negative wedging pressure) with an action radius equal to the water boundary layer thickness. The increase in the magnitude of the forces of hydrophobic adhesion is used in the process of flotation with the wetting film heating. The heat flow can be 'delivered' to the wetting film from the side of the liquid phase by means of heating the whole flotation system (which requires much energy), or from the side of gas phase by filling bubbles with a heat carrier (this is an energy-saving approach). In the latter case, the air fed for the pulp aeration in flotation is mixed with steam. The case-study of gold-bearing ore flotation proves the efficiency of the new process designs.

Key words: gold, ore, placer, integrated processing, gravitation, jet flotation, air–steam mixture, economic evaluation.

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

For citation: Evdokimov S. I., Gerasimenko T. E., Kondratiev Y. I. Surface forces of structural origin in micro-fine gold flotation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(5-1):17-35. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_51_0_17.

Введение

Основой количественного описания поверхностных сил служат молекулярные силы Лондона — Ван-дер-Ваальса (дисперсионные) и ионно-электростатические взаимодействия диффузных ионных атмосфер (Гуи — Чепмена), являющиеся базисом теории коагуляции гидрофобных коллоидов Дерягина — Ландау — Фервея — Овербека (ДЛФО) [1] и гетерокоагуляции — флотации [2].

Во флотационных системах структура и свойства воды в граничных слоях определенной толщины под действием нескомпенсированных поверхностных сил изменены по сравнению с объемом воды. Разработаны различные механизмы избыточных дальнодействующих поверхностных сил [3 — 5], в том числе с учетом особенностей водородных связей в граничных слоях воды, получившие в литературе название «Non-DLVO forces» [6, 7] — сил гидрофобного притяжения и гидрофильного отталкивания [8 — 10].

Первые попытки связать агрегативную устойчивость микродисперсных систем с особой структурой воды на фазовых границах принадлежат *R.* Cecil (Nature, 1967) и В.А. Пчелину [11]. Однако физическая природа гидрофобных взаимодействий остается пока неясной [12 — 14]. Целью настоящей работы является исследование механизма скольжения [15 — 17] — увеличения расхода потока вдоль гидрофобной поверхности против его расчетного значения, одним из следствий которого является гидрофобное притяжение, и разработка на этой основе нового режима флотации руд.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования выбрана золотосодержащая сульфидная руда Олимпиадинского месторождения (Северо-Енисейский район Красноярского края).

Из результатов минералогического изучения руд следует, что они сложены массивными и тонкозернистыми сланцами хлорит-слюдисто-кварц-карбонатного состава. Сульфиды, с которыми ассоциирована преобладающая часть золота, минерализуют руды неравномерно. Сульфиды представлены в основном арсенопиритом, антимонитом, пирротином и пиритом, а нерудные минералы — кварцем, кальцитом, слюдой (в форме серицита и биотита). Основной ценный компонент руд — золото — образует с сульфидными минералами (прежде всего с арсенопиритом) сверхтонкие ассоциации. В свою очередь золотосодержащие сульфидные минералы — арсенопирит, пирротин и антимонит — тонко взаимно прорастают, а во вмещающих породах присутствуют в виде тончайших выделений размером от тысячных до первых сотых долей миллиметра.

Таблица 1

Результаты определения количества свободного (амальгамируемого) золота в пробе исходной руды
Results of determining the amount of free (amalgamated) gold in the original ore sample

Условия и результаты опытов	
Масса навески материала, г	100
Количество воды, мл	150
Количество ртути, г	20
Количество щелочи NaOH, г	1
Время перемешивания, ч	4
Потери ртути, г / %	0,15 / 0,75
Содержание золота в хвостах, г/т	2,55
Извлечение золота в амальгаму, %	15,0
Содержание свободного золота, г/т	0,45
Баланс золота, г/т	6,60

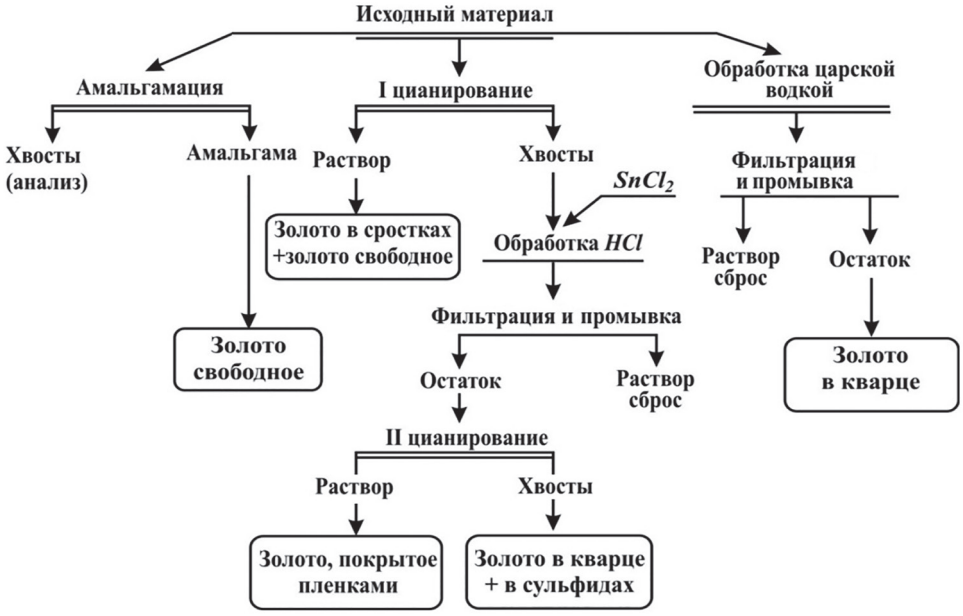

Рис. 1. Полная схема рационального анализа
Fig. 1. A complete scheme of rational analysis

Таблица 2

Результаты определения в исходной пробе руды количества золота в сростках
Results of determining the amount of gold in the initial ore

Условия и результаты опытов	
Масса навески материала, г	250
Количество извести (CaO, активностью 80%), г	3,5
Количество перекиси бария BaO_2, г	1,5
Количество раствора цианида натрия NaCN, мл	750
Концентрация раствора цианида натрия NaCN, %	0,46
Время цианирования (перемешивания), ч	72
Остаточная концентрация NaCN, %	0,06
Извлечение золота в раствор, г/т	0,98
Содержание золота в хвостах, г/т	2,02
Баланс золота, г/т	3,0

Из результатов сцинтилляционного анализа следует, что более 77% зерен золота имеет крупность <3 мкм. Золото неоднородно по цвету и пробе. По цвету выделяется две основные разновидности: золотисто-желтое, ассоциирующее главным образом с кварцем, и зеленовато-желтое с нюансами оттенков цвета. Золото первой разновидности более высокопробное с вариацией пробы от 790 до 826. Зеленовато-желтое золото разных оттенков с вариацией пробы 779 — 806. Проба установлена атомно-абсорбционным методом анализа.

Рациональный анализ форм нахождения золота в пробе руды выполнен на материале крупностью 85% класса –71 мкм по схеме рис. 1.

В табл. 1 приведены результаты и условия определения количества свободного золота в пробе руды методом амальгамации.

В табл. 2 приведены результаты и условия определения количества золо-

Таблица 3

Результаты определения в исходной пробе руды количества золота, покрытого пленками (золота в «рубашке»)
Results of determining the amount of gold covered by films (gold in the «jacket») in the original ore sample

Условия и результаты опытов	
Масса навески материала, г	250
Соляная кислота HCl, мл	500
Хлористое олово $SnCl_2$, г	10
Время обработки, ч	6
Выход остатка, г / %	190 / 76
Количество раствора цианида натрия NaCN, мл	570
Концентрация раствора цианида натрия NaCN, %	0,23
Количество извести (CaO, активность 80%), г	3,5
Количество перекиси бария BaO_2, г	1,5
Время перемешивания, ч	72
Извлечение золота в раствор (от исходного), г/т	0,37

Таблица 4

Результаты выщелачивания царской водкой исходных проб
Results of leaching with aqua regia of original samples

Условия и результаты опытов	
Масса навески материала, г	500
Содержание кл. –0,071 мм в материале (в разгрузке мельницы), %	85,0
Выход остатка от разложения, г / %	49 / 9,8
Содержание золота в остатке, мг	0,17
Содержание золота в пересчете на исходный материал, г/т	0,34

Таблица 5

Результаты рационального анализа форм золота в пробе исходной руды
Results of rational analysis of gold forms in the sample of initial ore

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

та в сростках методом прямого цианирования.

С целью определения в пробе исходной руды количества золота, покрытого пленками (золота в «рубашке»), хвосты цианирования-I после обработки (в присутствии хлористого олова $SnCl_2$) соляной кислотой подвергли цианированию-II (табл. 3).

В табл. 4 приведены результаты и условия определения количества золота в кварце и сульфидах методом выщелачивания царской водкой.

Результаты рационального анализа сведены в табл. 5.

Установлено (табл. 5), что в материале пробы исходной руды крупностью 85% класса –71 мкм находится 15,0% свободного золота; со сростками и сульфидами связано больше половины золота.

Теоретические положения

При исследовании течения воды через кварцевые капилляры выявлено, что с уменьшением их радиусов R экспериментально полученные значения сопротивлений вязкому течению жидкости превышают теоретические оценки, полученные с учетом объемных значений вязкости воды η_∞ [18]. Напротив, при движении воды вдоль гидрофобной поверхности установлен эффект проскальзывания [15 — 17]. Полученные результаты могут служить доказательством зависимости вязкости от толщины граничного слоя воды. Тогда в модель граничного слоя воды должны входить два параметра — характеризующий вязкость в пристенном слое воды η (a-параметр) и протяженность b слоя воды, в пределах которого вязкость изменена по сравнению с объемной ($1/b$-параметр).

Для нахождения этих параметров запишем уравнение стационарного течения с локальной скоростью $\upsilon(r)$ жидкости с локальной вязкостью $\eta(r)$ в капилляре радиусом R под действием градиента давления ΔP относительно радиальной координаты r:

$$\frac{1}{r}\frac{d}{dr}\left(r\eta\frac{d\upsilon}{dr}\right) = -\nabla P \qquad (1)$$

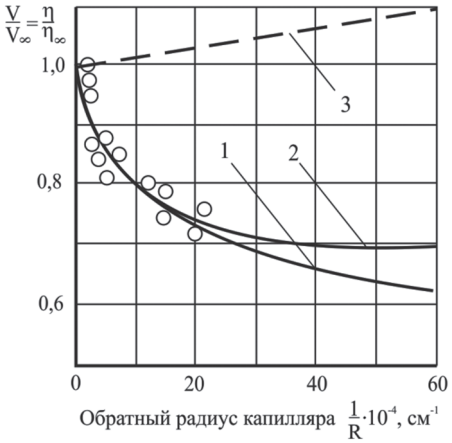

Рис. 2. Зависимость V/V_∞ от 1/R, расчет по уравнению (7) и (9)

Fig. 2. Dependence of V/V_∞ on 1/R, calculation by equation (7) and (9)

с граничными условиями

$$\upsilon(R)=0;\quad \frac{d\upsilon}{dr}(0)=0 \qquad (2)$$

и получим решение для $\upsilon(r)$

$$\upsilon=\frac{\nabla P}{2}\int_r^R\frac{rdr}{\eta(r)}. \qquad (3)$$

Для средней скорости, получаемой в ходе эксперимента, запишем

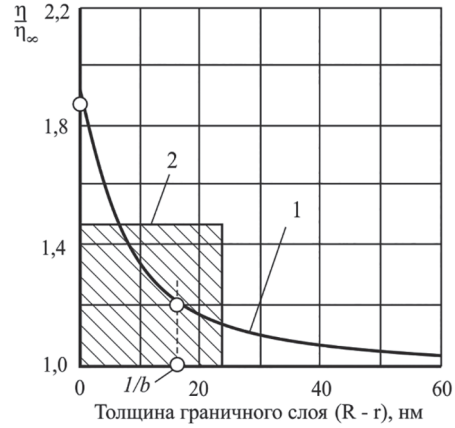

Рис. 3. Экспоненциальное (1) и ступенчатое (2) распределение локальных значений вязкости η вблизи твердой гидрофильной поверхности

Fig. 3. Exponential (1) and step (2) distributions of local viscosity values η near a solid hydrophilic surface

$$V=\frac{2}{R^2}\int_r^R r\upsilon\,dr=\frac{\nabla P}{R^2}\int_0^R r\,dr\int_r^R\frac{r\,dr}{\eta(r)} \qquad (4)$$

и примем экспоненциальный закон распределения $\eta(r)$

$$\frac{\eta_0-\eta_\infty}{\eta}=a\,e^{-b(R-r)}. \qquad (5)$$

На расстоянии от стенки капилляра 1/*b* вязкость жидкости приобретает значение $\eta_в$:

$$\frac{\eta_0}{\eta_\infty}=\frac{1}{1-a};\quad \frac{\eta_2}{\eta_\infty}=\frac{1}{1-a}. \qquad (6)$$

С учетом (5) проведем интегрирование уравнения средней скорости течения жидкости в капилляре (4):

$$\frac{V}{V_\infty}=1-8a\left[\frac{1}{2bR}-\frac{3}{2(bR)^2}+\frac{3}{(bR)^3}-\frac{3}{(bR)^4}\left(1-e^{-bR}\right)\right], \qquad (7)$$

с учетом того, что при $\eta = \eta_\infty = const$ скорость *V* принимает значение

$$V_\infty=R^2\nabla P/8\eta_\infty.$$

При средней вязкости жидкости в капилляре η_* скорость жидкости принимает значение

$$V_\infty=R^2\nabla P/8\eta_* \text{ и } V/V_\infty=\eta_\infty/\eta_*.$$

При выполнении дальнейших исследований использовались методы математической статистики [19—21]. Статистической обработкой экспериментально полученных значений скорости течения воды в кварцевых капиллярах установлено, что $a = 0{,}47$ и $b = 6{,}35\cdot10^5$ см$^{-1}$, это дает хорошее согласие расчетных значений, полученных по уравнению (7), и экспериментальных. При этих значениях параметров *a* и *b* вязкость воды у поверхности кварцевого капилляра принимает значение $\eta_0 = 1{,}87\eta_\infty$, эффективная протяженность слоя воды с измененной вязкостью 1/*b* = 16 нм.

При найденных значениях параметров *a* и *b* по уравнению (7) построена зависимость $V / V_\infty = \eta_\infty / \eta_*$ от *R* (рис. 2), на которую удовлетворительно укладываются точки, соответствующие экспериментально полученным данным.

Если за пределами граничного слоя протяженностью *h* вязкость воды мгновенно изменяется от η_0 до $\eta = \eta_\infty =$ = *const*, то

$$\begin{matrix} \eta(r) = \eta_0, (R - r) \le h; \\ \eta(r) = \eta_\infty; (R - r) > h \end{matrix} . \quad (8)$$

С учетом (8) интегрирование уравнения (3) при сшивке решений условием равенства $\upsilon(r)$ при $(R - r) = h$ дает

$$\frac{V}{V_\infty} = \frac{\eta_\infty}{\eta_0} + \left(1 - \frac{\eta_\infty}{\eta_0}\right)\left(1 - \frac{h}{R}\right)^4 = \\ = c + (1 - c)\left(1 - \frac{h}{R}\right)^4 , \quad (9)$$

и имеем $V/V_\infty \to 1$ при условии, что $R \to \infty$ или $h \to 0$. Расчет по (9) дает кривую *2* на рис. 2, из которой следует, что отличие между экспоненциальным и ступенчатым распределением вязкости воды появляется только когда граничные слои с измененной по сравнению с объемом вязкостью ($R < 5 \cdot 10^{-6}$ см) перекрываются.

Реальный вид функции $\eta(r)$ может быть получен по двум приближениям — кривой *1* (рис. 3), соответствующей непрерывному экспоненциальному распределению (5) значений η/η_∞ от стенок капилляров (плоских стенок), и кривой *2* (рис. 3), отвечающей случаю ступенчатого распределения (9).

При движении вдоль твердой гидрофобной поверхности возможно проскальзывание воды, скорость которого пропорциональна напряжению сдвига $\tau(R) = \tau_0$:

$$\upsilon(R) = \upsilon_0 = \delta\tau_0 = \delta\eta\left(\frac{d\upsilon}{dr}\right)_R , \quad (10)$$

где δ — поправка на скольжение; при $\delta = 0$ имеет место прилипание: $\upsilon_0 = 0$.

Решение (1) с граничным условием (10) при условии $\eta_\infty =$ *const* дает

$$\frac{V}{V_\infty} = 1 + \frac{4\delta\eta_\infty}{R} . \quad (11)$$

Следовательно, скольжение воды вдоль гидрофобной поверхности приводит к линейному росту значений V/V_∞ в функции $1/R$ (рис. 2, кривая *3*), и его эффект усиливается при $R \to 0$. Но скольжение жидкости и понижение вязкости воды вблизи гидрофобной поверхности могут оказывать совместное действие на движение жидкости вдоль гидрофобной поверхности. Только в очень тонких капиллярах, в которых граничные слои с измененной по сравнению с объемной вязкостью перекрываются, и ход зависимости $V/V_\infty(1/R)$ отклоняется от линейного, влияние этих двух эффектов — скольжение жидкости и понижение вязкости — можно разделить.

Скольжение объемного потока жидкости по газожидкостному пристенному слою пониженной вязкости — основная причина уменьшения гидродинамического сопротивления сближению гидрофобных частиц и, как следствие, их прилипания.

Нелинейное понижение вязкости в пристенном слое изменяет статическое равновесие сил в структуре воды (и ее энергетическое состояние), когда частицы сближаются на расстояние, на котором их действие на граничные слои воды не полностью экранируется объемной водой. Реакцией системы на изменение силового и энергетического балансов является появление в общих, связывающих два граничных слоя воды, коммуникациях дополнительных сил структурного гидрофобного притяжения (объединенных в литературе термином «не-ДЛФО»-силы [6, 7]). Прилипание частиц (в том числе микродисперсий золота, гидрофобизированных ксантогенатом [22 — 24]) под действием сил гидрофоб-

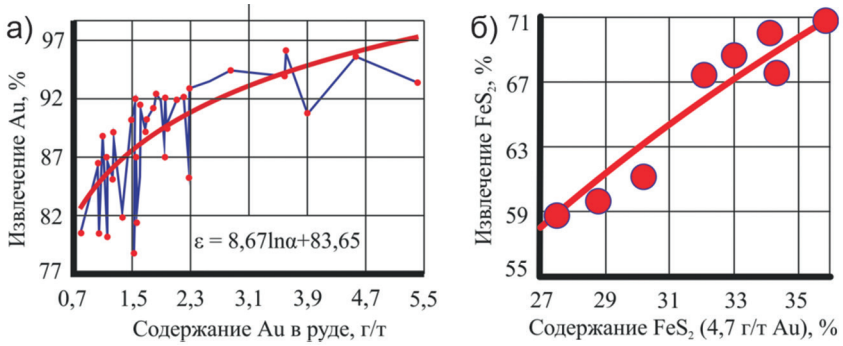

Рис. 4. Зависимость извлечения золота (а) и золотосодержащего пирита (б) от их содержания в исходном питании флотации

Fig. 4. Dependence of gold extraction (a) and gold-bearing pyrite (b) on their content in the initial flotation feed

ного притяжения можно отнести к частному случаю структурной составляющей расклинивающего давления [25], существующей параллельно и независимо от слагающих, вызванных дисперсионным и ионно-электростатическим взаимодействием [26 — 28].

При введении во флотационную систему гидрофобных частиц (например, в виде минералов-носителей) приводит к увеличению поверхности раздела фаз, к которой прилипают подготовленные к флотации частицы, что уменьшает их потери с хвостами процесса.

Наконец, эндотермический характер «не-ДЛФО»-сил и их рост по абсолютной величине при повышении температуры [27] может быть использован для выполнения процесса флотации в условиях (например, нагрева смачивающей пленки за счет теплоты конденсации подаваемого во флотомашину вместе с воздухом горячего водяного пара) [29], при которых энергия гидрофобного прилипания является решающим фактором, обусловливающим образование флотокомплекса [30 — 32].

Результаты и обсуждение

На рис. 4 приведен график зависимости извлечения золота от содержания металла в исходной руде (рис. 4, *а*). Полученные данные доказывают целесообразность увеличения содержания извлекаемого металла в исходном питании флотации для повышения его извлечения. В этом же убеждают результаты флотации в лабораторных условиях пирита (кристаллы пирита имели преимущественно кубическую форму), содержащего 4,7 г/т золота в виде изоморфной примеси и самородного металла (рис. 4, *б*).

Следует отметить, что аналогичные зависимости [33] получены большой группой исследователей для самых разнообразных руд [34 — 37].

В существующих схемах флотации промежуточные продукты направляют в более ранние ступени, что, наряду с полезным эффектом — увеличением содержания извлекаемого металла, связано с появлением распределения минералов одного сорта по флотируемости — медленно- и быстрофлотируемых фракций [38 — 40]. При флотации такого материала реагентный режим селекции не может быть оптимальным для всех фракций: скорость флотации медленнофлотируемой фракции извлекаемых минералов будет уступать скорости флотации депрессируемых минералов быстрофлотируемой фракции. Таким образом, смешение продуктов флотации в существующих схемах тождественно понижению способности минеральной смеси к разделению — ее обогатимости.

В работе для увеличения содержания извлекаемого металла используют наиболее флотационно-активную часть руды — выделенный из нее черновой концентрат. При таком смешении полезный (согласно данным рис. 4) эффект от увеличения содержания извлекаемого металла дополняется эффектом гидрофобных взаимодействий между гидрофобными минералами рудного питания и минералами чернового концентрата (минералами-носителями).

Выполнено измерение времени индукции при взаимодействии зерен золота.

При измерениях использован контактный прибор КЭП-4, разработанный М.А. Эйгелесом для исследования устойчивости смачивающих пленок при прилипании твердых частиц к пузырьку воздуха.

Исследования выполняли в стеклянной кювете объемом 7 мл, внутреннюю поверхность которой обрабатывали концентрированной горячей HNO_3 в течение 5—7 мин и затем тщательно промывали бидистиллированой водой с проводимостью $<2\cdot10^{-6}$ $Ом^{-1}\cdot см^{-1}$. Дно кюветы со слоем минералов мысленно разбивали на квадраты, последовательно помещая в центр каждого из них зонд с минералом при переходе от одного измерения к другому, охватывая в ходе эксперимента всю поверхность слоя минералов в кювете.

Для регулирования времени контакта использован электронный секундомер, который состоит из генератора эталонной частоты и системы памяти. Отсчет времени секундомером начинается с момента выхода кюветы в верхнее крайнее положение и прекращается вместе с началом отвода кюветы. Истинное время контакта, которое может несколько отличаться от заданного, регистрируется счетным устройством с точностью до 0,1 мс. Автоматически регулируемое время контакта — от 0,001 до 1 с. Контакт выше 1 с регулируется по секундомеру прибора.

В конструкцию магнитного реле, поднимающего столик с кюветой, внесены изменения. Столик значительно облегчен. Для уменьшения инерционности якорь электромагнита заменен подвижной катушкой. Отвод кюветы производится по команде счетного устройства переключением направления тока в подвижной катушке. Создана возможность изменять силу тока при отводе кюветы от пузырька так, чтобы отход слоя материала мог производиться совершенно спокойно или же рывком с дополнительной турбулизацией водной среды.

Для исключения подогрева от осветителя между последним и кюветой установлено поглощающее инфракрасные лучи стекло. В приборе столик с кюветой термостатирован путем использования циркуляционного термостата с электроконтактным термометром. Наряду с микроскопом используется проектирование пузырька на экран с увеличением в 20 раз.

Мономинеральные фракции получали сухим механическим истиранием штуфных образцов руд в агатовой ступке или измельчением фарфоровыми шарами в барабанной мельнице из того же материала. Подготовка поверхности исследуемых минералов заключалась в двукратной обработке HCl, отмывке кислоты бидистиллированной водой и выдерживании в ней в течение 24 ч.

С целью исследования кинетики утончения и прорыва симметричных межфазных пленок, образованных при взаимодействии полидисперсных зерен золота, выполнено измерение времени индукции при прилипании зерен друг к другу. Для решения поставленной задачи в конструкцию прибора внесено изменение — система для генерации пузырька газа была заменена балочкой-кантилевером (зондом) с зерном золота, приклеенным

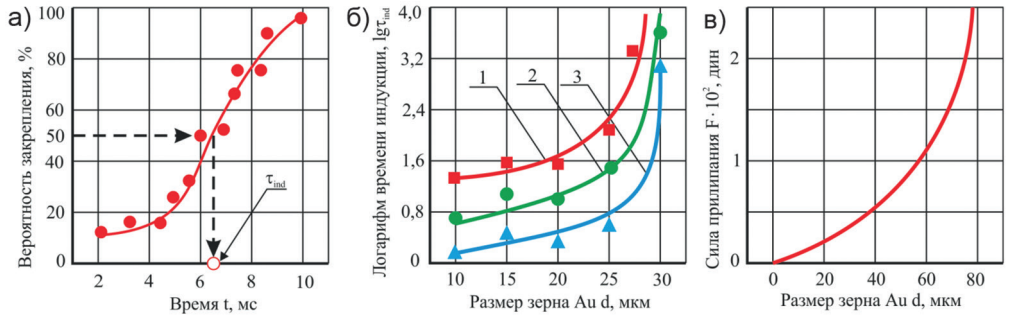

Рис. 5. Результаты исследования взаимодействия полидисперсных зерен самородного золота
Fig. 5. Results of interaction of polydisperse grains of native gold

по методике, разработанной и апробированной в [28, 33]. При сборке зонда отбирали максимально уплощенные зерна — тонкие пластинки, чешуйки и листочки самородного золота. Выбранные зерна золота при монтаже на зонде ориентировали по отношению к материалу в кювете с большей поверхностью — гранью (стенкой). При заданном положении зерна на зонде время индукции измеряли при прилипании отдельных зерен к «золотой стенке», а не к ее ребру или углу. Тем не менее, отсутствие геометрического подобия межфазного зазора при взаимодействии плоской стенки с полиэдрическими зернами золота в слое материала являлось основной причиной разброса измерений.

Зерна золота заданной крупности выделяли методом седиментометрического анализа, проводимого с учетом рекомендаций, разработанных в [34].

При измерениях определяли минимальное время, в течение которого не менее 20—40% имеющихся на площади контакта частиц в 50% случаев закрепляется на поверхности пузырька. Крупные частицы считали прилипшими, если на поверхности пузырька закрепилось более трех частиц. Таким образом, измерению в приборе подвергается не время достижения предельных сил притяжения, которые могут возникнуть между твердой частицей и пузырьком, а время, за которое возрастающая во времени результирующая сил притяжения и отталкивания достигает значения, достаточного для уравновешивания сил отрыва. Это время принимали за время индукции (рис. 5, *а*). Время индукции при прилипании к пластинке золота крупностью ~3 мм увеличивается на три порядка при увеличении крупности зерен золота в 3 раза — от 10 до 30 мкм (рис. 5, *б*). Аналогичные результаты получены при прилипании мелкодисперсного пирита к кристаллу пирита кубического морфотипа.

На рис. 5, *б* кривые *1*, *2* и *3* получены при прилипании мелкодисперсных зерен золота (крупностью 10—30 мкм) к зерну золота, проба которого увеличивается от 740 (кривая *1*) до 810 (кривая *2*) и до 920‰ (кривая *3*). В качестве минерала-носителя использовано золото из россыпей Охотско-Чукотского и Яно-Колымского пояса (проба 747‰), представленное зернами, имеющими изометричные очертания, характерную шагреневую (шероховатую) поверхность, неровные и извилистые края. Использованы неокатанные золотины Нижнего Приамурья и Хабаровского края с грубоячеистой и сотовидной поверхностью (по данным пробирного анализа проба составила 790‰, но в центре золотин (по данным микрозондового анализа) достигала 870‰). При исследовании золо-

тин Балейского района установлено, что максимальное значение пробы в центре зерна — 907‰, а на его периферии — 943‰ (7 определений). Для зерен золота Чаун-Чукотского района (серебристое золото с пробой 820‰) были характерны кристаллы изометричной формы и формы, близкой к октаэдру, у которого вершины и ребра сглажены, а также зерна в виде тонких пластинок. При прилипании микродисперсий золота во всех случаях время индукции уменьшалось при увеличении пробы золота минерала-носителя.

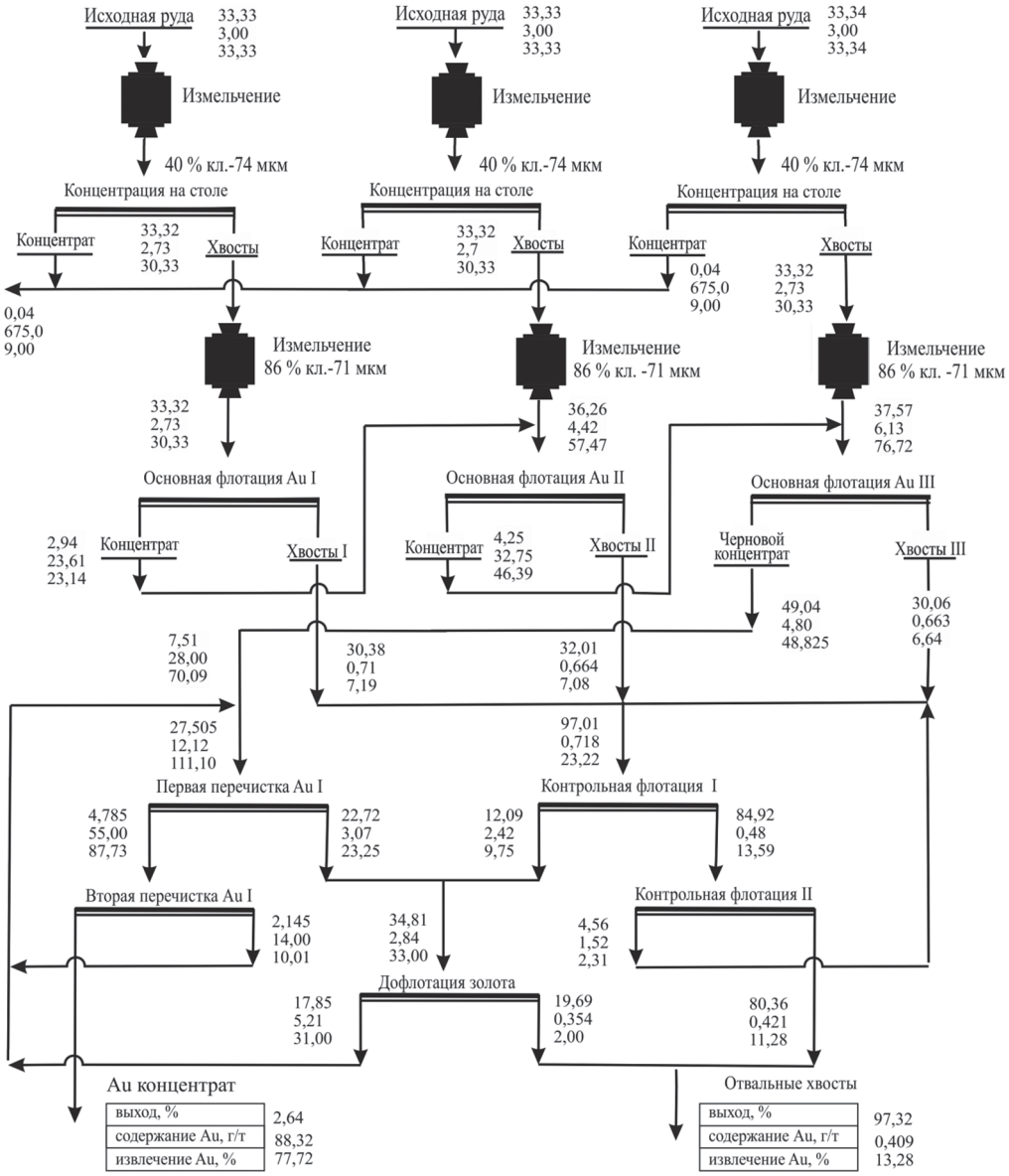

Рис. 6. Качественно-количественная схема флотации руд Олимпиадинского месторождения
Fig. 6. Qualitative-quantitative scheme of ore flotation of the Olimpiada deposit

С использованием данных седиментоволюметрических измерений [41] и методик, приведенных в [41], выполнен расчет сил в контактах между зернами золота (крупностью 5 — 10 мкм) в растворе бутилового ксантогената калия (25 мг/л). Из результатов расчета (см. рис. 5, *в*) следует, что для сил в контактах между исследованными полиэдрическими зернами золота F справедлива зависимость $F \sim d^n$ с $n \geq 2$.

Опыты по флотации золотосодержащих руд Олимпиадинского месторождения выполнены в режиме, моделирующем замкнутый цикл флотации (рис. 6).

После грубого измельчения руды (≥40% класса –74 мкм) из нее с применением гравитационных методов обогащения (концентрационного стола) был выделен гравиоконцентрат, в который при выходе 0,04% и содержании золота 675,0 г/т извлечено 9,0% металла. Извлечение золота выполняли на столе типа СКО-0,5 при частоте колебаний деки 330 мин$^{-1}$ и длине хода 6 мм; нагрузку поддерживали в интервале 0,17 — 0,18 т/ч на 1 м^2 деки стола при расходе смывной воды 2,5 м^3/т. При продольном угле наклона 0° поперечный угол наклона деки стола составлял 5°.

Основное количество золота извлечено из хвостов гравитации после из доизмельчения до крупности 86,9 — 88,3% класса –71 мкм методом флотации. Схема флотации — с использованием минералов-носителей в виде чернового концентрата. С этой целью готовый черновой концентрат выделяли в три приема: первые два раза его вновь возвращали в процесс в виде минералов-носителей, смешивая для этого с исходной рудой. Только третьим приемом флотации из руд был выделен готовый черновой концентрат, который направили на перечистку.

Пузырьки воздуха в пульпе рассматриваются как супергидрофобные полости в воде [26, 28]: для увеличения сил гидрофобных взаимодействий температуру воды в граничных слоях пузырьков повышают за счет теплоты конденсации горячего водяного пара [29, 30, 32, 41]. С этой целью при выделении готового чернового концентрата в третьей струе флотации (основная флотация Au III на схеме рис. 6) в качестве газовой фазы при флотации используют паровоздушную смесь (аэрозоль), добавляя в воздух горячий водяной пар (>104 °С).

Содержание золота в питании первой струи флотации составляет 2,73 г/т. За счет однократного оборота чернового концентрата содержание золота в питании второй струи флотации увеличивается до 4,42 г/т; в питании третьей струи флотации содержание золота составляло уже 6,13 г/т, т.е. за счет двукратного смешения чернового концентрата с исходной рудой содержание золота увеличилось в 2,25 раза. Увеличение содержания золота в питании флотации являлось причиной роста операционного извлечения золота в черновой концентрат. Так, если в первой струе флотации извлечение золота в черновой концентрат от операции составляло 76,27% (содержание золота в хвостах операции флотации — 0,71 г/т), а во второй струе флотации — 86,76% (содержание золота в хвостах операции флотации — 0,664 г/т), то в третьей струе флотации уже 91,36% (содержание золота в хвостах операции флотации стабилизировалось, что свидетельствовало о достижении режима замкнутого цикла, и составило 0,663 г/т). Этот результат не противоречит данным промышленного процесса флотации: как правило, при перечистке чернового концентрата с повышением содержания ценного компонента (при увеличении числа перечисток) одновременно повышается и извлечение металла от операции флотации. В исследуемой схеме извлечение от операции в 1-й перечистке составило 78,96% отн.

Таблица 6

Результаты флотации по фабричной схеме и режиму флотации
Results of flotation according to the factory scheme and the flotation regime

Наименование продукта	Выход продукта, %	Содержание Au, г/т	Извлечение Au, %
Гравитационно-флотационный концентрат	4,01	65,08	85,01
Хвосты обогащения	95,99	0,48	14,99
Исходная руда	100,0	3,07	100,0

и во 2-й — 88,59% отн. Повышению извлечения способствует изменение в благоприятном направлении отношения полезного и загрязняющего минералов.

Повышение селективности процесса флотации с применением чернового концентрата в качестве минералов-носителей может быть связано с увеличением минеральной нагрузки на поверхность пузырьков: при занятости поверхности пузырьков более 12% извлекаемые минералы практически полностью вытесняют с поверхности газовой фазы минералы пустой породы [41]. Этим эффектом можно объяснить увеличение выхода концентрата с 2,86 до 4,01% при переходе от флотации с использованием чернового концентрата в качестве минералов-носителей к известному режиму флотации (табл. 6).

В итоге получен гравитационно-флотационный концентрат, в который при выходе 2,86% и содержании золота 90,94 г/т извлечено 86,72% металла.

При гидрометаллургической переработке упорных золотосодержащих концентратов выщелачивание — операция, в целом определяющая экономические показатели передела, так как доля связанных с ней эксплуатационных расходов в структуре себестоимости передела составляет 30—50 %. Годовые эксплуатационные расходы на гидрометаллургическую переработку (себестоимость переработки 1 т концентрата, включающей бактериальное выщелачивание, фильтрацию, известковую обработку и сорбционное цианирование, составляет более 37 тыс. руб/т при цене золота 4246 руб./г) при переходе с фабричной на разработанную технологическую схему на ~28% меньше за счет сокращения количества концентрата от 4,01% (см. табл. 3) до 2,86% (см. рис. 5).

Результаты извлечения золота из руд флотацией с применением минералов-носителей соответствуют теоретическим предпосылкам об эффективности образования агрегатов из гидрофобных полидисперсных частиц и высокой скорости образования агрегатов из значительно отличающихся размером частиц [35].

Заключение

В существующих схемах флотации промежуточные продукты направляют из последующих ступеней разделения в предыдущие, что, наряду с полезным эффектом — увеличением содержания извлекаемого металла, связано с появлением медленно- и быстрофлотируемых фракций — распределения по флотируемости. Реагентный режим селекции не может быть оптимальным для обеих фракций: скорость флотации медленно-флотируемой фракции извлекаемых минералов будет уступать скорости флотации депрессируемых минералов быстрофлотируемой фракции. Фактически, понижается контрастность минералов по свойству, по которому ведут разделение — смачиваемости. Таким образом, смешение продуктов флотации в существующих схемах тождественно пони-

жению способности минеральной смеси к разделению — ее обогатимости. В работе для увеличения содержания извлекаемого металла используют наиболее флотационно-активную часть руды — выделенный из нее черновой концентрат. При таком смешении полезный эффект от увеличения содержания извлекаемого металла дополняется эффектом гидрофобных взаимодействий между гидрофобными минералами рудного питания и минералами чернового концентрата (минералами-носителями).

Результатом гидрофобных взаимодействий является притяжение гидрофобных частиц, причина которого связана со скольжением жидкости вдоль гидрофобной поверхности и изменением энергетического состояния воды в их граничных слоях. Для обратного процесса — удаления частиц друг от друга — потребуется совершить работу по переносу в точку контакта частиц молекул воды из объема. Поэтому частицы ведут себя так, как будто между ними существуют силы притяжения (отрицательное расклинивающее давление) с радиусом действия, равным толщине граничного слоя жидкости. Рост по абсолютной величине сил гидрофобного притяжения использован для интенсификации процесса флотации путем нагрева смачивающей пленки. Тепловой поток в смачивающую пленку можно «доставить» со стороны жидкой фазы повышением температуры флотационной системы (что требует больших энергозатрат) либо со стороны газовой фазы, заполнив пузырек теплоносителем (энергосберегающий подход). Во втором случае подаваемый при флотации для аэрации пульпы воздух смешивают с паром. На примере флотации золотосодержащих руд доказана эффективность новых технологических решений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nikolov A., Lee J., Wasan D.* DLVO surface forces in liquid films and statistical mechanics of colloidal oscillatory structural forces in dispersion stability // Advances in Colloid and Interface Science. 2023, vol. 313, article 102847. DOI: 10.1016/j.cis.2023.102847.

2. *Zie 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, vol. 295, article 102491. DOI: 10.1016/j.cis.2021.102491.

3. *Misra R. P.*, *De Souza J. P.*, *Blankschten D.*, *Bazant M. Z.* Theory of surface forces in multivalent electrolytes // Langmuir. 2019, vol. 35, no. 35, pp. 11550 — 11565. DOI: 10.1021/acs.langmuir.9b01110.

4. *Mohamad H. S.*, *Neuber S.*, *Helm C. A.* Surface forces of asymmetrically grown polyelectrolyte multillayers: Searching for the charges // Langmuir. 2019, vol. 35, no. 48, pp. 15491 — 15499. DOI: 10.1021/acs.langmuir.9b01787.

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, vol. 3, no. 48, pp. 15585 — 15591. DOI: 10.1021/acs.langmuir.9b02011.

6. *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. DOI: 10.1016/j.jcis.2019.05.049.

7. *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. DOI: 10.1021/acs.langmuir.9b01886.

8. *Hu P., Liang L.* The role hydrophobic interaction in the heterocoagulation between coal and quartz particles // Minerals Engineering. 2020, vol. 154, no. 1, article 106421. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106421.

9. *Long Q., Wang H., Jiang F., Tan W., Xu Z.* Enhancing flotation separation of fine copper oxide from silica by microbubble assisted hydrophobic aggregation // Minerals Engineering. 2022, vol. 189, no. 1, article 107863. DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107863.

10. *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.

11. *Пчелин В. А.* О моделировании гидрофобных взаимодействий // Коллоидный журнал. — 1972. — Т. 34. — № 5. — С. 783—787.

12. *Jadhav A. J., Barigou M.* Bulk nanobubbles or not nanobubbles // Langmuir. 2020, vol. 36, no. 7, pp. 1699—1708. DOI: 10.1021/acs.langmuir.9b03532.

13. *Schubert H.* Nanobubbles, hydrophobic effect, heterocoagulation and hydrodynamics in flotation // International Journal of Mineral Processing. 2005, vol. 78, no. 1, pp. 11—21. DOI: 10.1016/j.minpro.2005.07.002.

14. *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, vol. 72, no. 1—4, pp. 215—225. DOI: 10.1016/S0301-7516(03)00100-5.

15. *Nizkaya T. V., Dubov A. L., Mourran A., Vinogradova O. I.* Probing effective slippage on superhydrophobic stripes by atomic force microscopy // Soft Matter. 2016, vol. 12, pp. 6910—6917. DOI: 10.1039/C6SM01074A.

16. *Zhou J., Asmolov E. S., Schmid F., Vinogradova O. I.* Effective slippage on superhydrophobic trapezoidal grooves // Journal of Chemical Physics. 2013, vol. 139, no. 17, pp. 174708—174715. DOI: 10.1063/1.4827867.

17. *Агеев А. И., Осипов А. Н.* Макро- и микрогидродинамика вязкой жидкости вблизи супергидрофобной поверхности // Коллоидный журнал. — 2022. — Т. 84. — № 4. — С. 380—395. DOI: 10.31857/S0023291222040024.

18. *Iwasaki Y., Seyama M., Inoue S., Hayashi K., Matsuura N., Koizumi H.* Direct measurement of near-wall molecular transport rate in a microchannel and its dependence on diffusivity // Langmuir. 2021, vol. 37, no. 29, pp. 8687—8695. DOI: 10.1021/acs.langmuir.1c00561.

19. *Босиков И. И., Клюев Р. В., Хетагуров В. Н.* Анализ и комплексная оценка газодинамических процессов на угольных шахтах с помощью методов теории вероятности и математической статистики // Устойчивое развитие горных территорий. — 2022. — Т. 14. — № 3. — С. 461—467. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-461-467.

20. *Петров Ю. С., Соколов А. А., Раус Е. В.* Математическая модель оценки техногенного ущерба от функционирования горных предприятий // Устойчивое развитие горных территорий. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 554—560. DOI: 10.21177/1998-4502-2019-11-4-554-559.

21. *Баловцев С. В., Скопинцева О. В., Куликова Е. Ю.* Иерархическая структура аэрологических рисков в угольных шахтах // Устойчивое развитие горных территорий. — 2022. — Т. 14. — № 2. — С. 276—285. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-276-285.

22. *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, vol. 36–38, no. 2–3, pp. 126—131. DOI: 10.1016/j.mineng.2012.03.013.

23. *Liu J., Cui X., Xie L., Huang J., Zeng H.* Probing effects of molecular-level heterogeneity of surface hydrophobicity on hydrophobic interactions in air/water/solid systems // Journal of Colloid and Interface Science. 2019, vol. 557, pp. 438—449. DOI: 10.1016/j.jcis.2019.09.034.

24. *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. DOI: 10.1016/j.minpro.2012.02.001.

25. *Щекин А. К.*, *Гостева Л. А.*, *Лебедева Т. С.*, *Татьяненко Д. В.* Единый подход к расклинивающему давлению в жидких и паровых прослойках в рамках метода функционал плотности // Коллоидный журнал. — 2021. — Т. 83. — № 2. — С. 235—241.

26. *Чураев Н. В.* Поверхностные силы и физикохимия поверхностных явлений // Успехи химии. — 2004. — Т. 73. — № 1. — С. 26—38.

27. *Бойнович Л. Б.* Дальнодействующие поверхностные силы и их роль в развитии нанотехнологии // Успехи химии. — 2007. — Т. 76. — № 5. — С. 510—528. DOI: 10.1070/RC2007v076n05ABEH003692.

28. *Лу Шоу-Цзы* О роли гидрофобного взаимодействия во флотации и флокуляции // Коллоидный журнал. — 1990. — Т. 52. — № 1. — С. 858—864.

29. *Евдокимов С. И.*, *Герасименко Т. Е.* Определение рационального расхода пара при флотации апатит-нефелиновых руд паровоздушной смесью // Записки Горного института. — 2022. — Т. 256. — С. 567—578. DOI: 10.31897/PMI.2022.62.

30. *Евдокимов С. И.*, *Герасименко Т. Е.* Использование шлихового золота в качестве минералов—носителей при флотации золотосодержащих руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 2. — С. 139—151. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-20-139-151.

31. *Евдокимов С. И.*, *Герасименко Т. Е.* Свойства смачивающих пленок воды в процессах флотации // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — № 6. — С. 142—152. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-6-0-142-152.

32. *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—167. DOI: 10.15372/FTPRPI20210217.

33. *Петров С. В.* О зависимости флотационного извлечения платиноидов от содержания металлов в руде // Обогащение руд. — 2015. — № 5. — С. 14—18. DOI: 10.17580/or.2015.05.03.

34. *Туртыгина Н. А.* Возможность применения в технологической схеме внутрирудничной предконцентрации руды бункера щелевого типа // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 8. — С. 82—92. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_8_0_82.

35. *Клюев Р. В.*, *Босиков И. И.*, *Майер А. В.*, *Гаврина О. А.* Комплексный анализ применения эффективных технологий для повышения устойчивого развития природно-технической системы // Устойчивое развитие горных территорий. — 2020. — № 2. — С. 283—290. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-2-283-290.

36. *Чебан А. Ю.*, *Секисов А. Г.*, *Хрунина Н. П.*, *Васянович Ю. А.* Технологии комбинированной выемки руд при разработке месторождений кристаллосырья // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 7. — С. 55—67. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_7_0_55.

37. *Галачиева С. В.*, *Соколов А. А.*, *Соколова О. А.*, *Махошева С. А.* Система оценки устойчивого развития региональных народнохозяйственных комплексов горных территорий // Устойчивое развитие горных территорий. — 2018. — Т. 10. — № 3 (37). — С. 329—335. DOI: 10.21177/1998-4502-2018-10-3-329-335.

38. *Барский Л. А.*, *Козин В. З.* Системный анализ в обогащении полезных ископаемых. — М.: Недра, 1978. — 486 с.

39. *Guo F., He Q., Xing Y., Zhang Y., Ding S., Xu M., Gui X.* Vertical adhesion force between particle and different positions on bubble surface // Minerals Engineering. 2021, vol. 164, no. 23, article 106807. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.106807.

40. *Ong Q. K.*, *Sokolov I.* Attachment of nanoparticles to the AFM tips for direct measurements of interaction between a single nanoparticle and surface // Journal of Colloid and Interface Science. 2007, vol. 310, no. 2, pp. 385—390.

41. *Евдокимов С. И.*, *Паньшин А. М.*, *Солоденко А. А.* Минералургия. В 2-х т. Т. 2. Успехи флотации. — Владикавказ: ООО НПКП «МАВР», 2010. — 992 с. ГИАБ

REFERENCES

1. Nikolov A., Lee J., Wasan D. DLVO surface forces in liquid films and statistical mechanics of colloidal oscillatory structural forces in dispersion stability. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2023, vol. 313, article 102847. DOI: 10.1016/j.cis.2023.102847.

2. Zie 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, vol. 295, article 102491. DOI: 10.1016/j.cis.2021.102491.

3. Misra R. P., De Souza J. P., Blankschten D., Bazant M. Z. Theory of surface forces in multivalent electrolytes. *Langmuir*. 2019, vol. 35, no. 35, pp. 11550—11565. DOI: 10.1021/acs.langmuir.9b01110.

4. Mohamad H. S., Neuber S., Helm C. A. Surface forces of asymmetrically grown polyelectrolyte multillayers: Searching for the charges. *Langmuir*. 2019, vol. 35, no. 48, pp. 15491—15499. DOI: 10.1021/acs.langmuir.9b01787.

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, vol. 3, no. 48, pp. 15585—15591. DOI: 10.1021/acs.langmuir.9b02011.

6. 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. DOI: 10.1016/j.jcis.2019.05.049.

7. 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. DOI: 10.1021/acs.langmuir.9b01886.

8. Hu P., Liang L. The role hydrophobic interaction in the heterocoagulation between coal and quartz particles. *Minerals Engineering*. 2020, vol. 154, no. 1, article 106421. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106421.

9. Long Q., Wang H., Jiang F., Tan W., Xu Z. Enhancing flotation separation of fine copper oxide from silica by microbubble assisted hydrophobic aggregation. *Minerals Engineering*. 2022, vol. 189, no. 1, article 107863. DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107863.

10. 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.

11. Pchelin V. A. On modeling hydrophobic interactions. *Colloid Journal*. 1972, vol. 34, no. 5, pp. 783—787. [In Russ].

12. Jadhav A. J., Barigou M. Bulk nanobubbles or not nanobubbles. *Langmuir*. 2020, vol. 36, no. 7, pp. 1699—1708. DOI: 10.1021/acs.langmuir.9b03532.

13. Schubert H. Nanobubbles, hydrophobic effect, heterocoagulation and hydrodynamics in flotation. *International Journal of Mineral Processing*. 2005, vol. 78, no. 1, pp. 11—21. DOI: 10.1016/j.minpro.2005.07.002.

14. 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, vol. 72, no. 1—4, pp. 215—225. DOI: 10.1016/S0301-7516(03)00100-5.

15. Nizkaya T. V., Dubov A. L., Mourran A., Vinogradova O. I. Probing effective slippage on superhydrophobic stripes by atomic force microscopy. *Soft Matter*. 2016, vol. 12, pp. 6910—6917. DOI: 10.1039/C6SM01074A.

16. Zhou J., Asmolov E. S., Schmid F., Vinogradova O. I. Effective slippage on superhydrophobic trapezoidal grooves. *Journal of Chemical Physics*. 2013, vol. 139, no. 17, pp. 174708—174715. DOI: 10.1063/1.4827867.

17. Ageev A. I., Osipov A. N. Macro- and microhydrodynamics of viscous liquid near superhydrophobic surface. *Colloid Journal*. 2022, vol. 84, no. 4, pp. 380—395. [In Russ]. DOI: 10.31857/S0023291222040024.

18. Iwasaki Y., Seyama M., Inoue S., Hayashi K., Matsuura N., Koizumi H. Direct measurement of near-wall molecular transport rate in a microchannel and its dependence on diffusivity. *Langmuir*. 2021, vol. 37, no. 29, pp. 8687 — 8695. DOI: 10.1021/acs.langmuir.1c00561.

19. Bosikov I. I., Klyuev R. V., Khetagurov V. N. Analysis and comprehensive evaluation of gas-dynamic processes in coal mines using the methods of the theory of probability and math statistics analysis. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022, vol. 14, no. 3, pp. 461 — 467. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-461-467.

20. Petrov Yu. S., Sokolov A. A., Raus E. V. A Mathematical model for estimating technogenic losses from the operation of mining enterprises. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2019, vol. 11, no. 4, pp. 554 — 560. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2019-11-4-554-559.

21. Balovtsev S. V., Skopintseva O. V., Kulikova E. Yu. Hierarchical structure of aerological risks in coal mines. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022, vol. 14, no. 2, pp. 276 — 285. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-276-285.

22. 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, vol. 36–38, no. 2–3, pp. 126 — 131. DOI: 10.1016/j.mineng.2012.03.013.

23. Liu J., Cui X., Xie L., Huang J., Zeng H. Probing effects of molecular-level heterogeneity of surface hydrophobicity on hydrophobic interactions in air/water/solid systems. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2019, vol. 557, pp. 438 — 449. DOI: 10.1016/j.jcis.2019.09.034.

24. 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. DOI: 10.1016/j.minpro.2012.02.001.

25. Shchekin A. K., Gosteva L. A., Lebedeva T. S., Tatyanenko D. V. Unified approach to the wedging pressure in liquid and vapor interlayers in the framework of density functional method. *Colloid Journal*. 2021, vol. 83, no. 2, pp. 235 — 241. [In Russ].

26. Churaev N. V. Surface forces and physicochemistry of surface phenomena. *Uspekhi Khimii*. 2004, vol. 73, no. 1, pp. 26 — 38. [In Russ].

27. Boynovich L. B. Long-range surface forces and their role in development of nanotechnology. *Uspekhi Khimii*. 2007, vol. 76, no. 5, pp. 510 — 528. [In Russ]. DOI: 10.1070/RC2007v076n05ABEH003692.

28. Lu Shou-Tsy. On the role of hydrophobic interaction in flotation and flocculation. *Colloid Journal*. 1990, vol. 52, no. 1, pp. 858 — 864. [In Russ].

29. Evdokimov S. I., Gerasimenko T. E. Determination of rational steam consumption in flotation of apatite-nepheline ores by steam-air mixture. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 256, pp. 567 — 578. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.62.

30. Evdokimov S. I., Gerasimenko T. E. Use of placer gold as mineral carrier in flotation of gold ore. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 2, pp. 139 — 151. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-20-139-151.

31. Evdokimov S. I., Gerasimenko T. E. Properties of wetting liquid films in flotation processes. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no. 6, pp. 142 — 152. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-6-0-142-152.

32. Evdokimov S. I., Gerasimenko T. E. Development of a mode of flotation of gold-bearing ores by a mixture of air with water vapor. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2021, no. 2, pp. 162 — 167. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20210217.

33. Petrov S. V. On the dependence of flotation extraction of platinoids on the content of metals in ore. *Obogashchenie Rud*. 2015, no. 5, pp. 14 — 18. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2015.05.03.

34. Turtygina N. A. Adaptability of slot bin to in-situ ore pre-concentration flow chart. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 8, pp. 82 — 92. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_8_0_82.

35. Klyuev R. V., Bosikov I. I., Mayer A. V., Gavrina O. A. Complex analysis of the use of effective technologies to enhance the sustainable development of the natural-technical system. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2020, no. 2, pp. 283—290. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-2-283-290.

36. Cheban A. Yu., Sekisov A. G., Khrunina N. P., Vasyanovich Yu. A. Mixed-type technology of crystal mineral mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 7, pp. 55—67. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_7_0_55.

37. Galachieva S. V., Sokolov A. A., Sokolova O. A., Makhosheva S. A. Estimation system of sustainable development of regional national-economic complexes of mountain territories. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2018, vol. 10, no. 3 (37), pp. 329—335. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2018-10-3-329-335.

38. Barskiy L. A., Kozin V. Z. *Sistemnyy analiz v obogashchenii poleznykh iskopaemykh* [System analysis in processing of minerals], Moscow, Nedra, 1978, 486 p.

39. Guo F., He Q., Xing Y., Zhang Y., Ding S., Xu M., Gui X. Vertical adhesion force between particle and different positions on bubble surface. *Minerals Engineering*. 2021, vol. 164, no. 23, article 106807. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.106807.

40. Ong Q. K., Sokolov I. Attachment of nanoparticles to the AFM tips for direct measurements of interaction between a single nanoparticle and surface. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2007, vol. 310, no. 2, pp. 385—390.

41. Evdokimov S. I., Pan'shin A. M., Solodenko A. A. *Mineralurgiya.T. 2. Uspekhi flotatsii* [Mineralurgy. Vol. 2. Advances in Flotation], Vladikavkaz, OOO NPKP «MAVR», 2010, 992 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Евдокимов Сергей Иванович[1] — канд. техн. наук,
доцент, e-mail: eva-ser@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2960-4786,
Герасименко Татьяна Евгеньевна[1] — канд. техн. наук,
начальник отдела интеллектуальной собственности,
e-mail: gerasimenko_74@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-7048-4379,
Кондратьев Юрий Иванович[1] — д-р техн. наук, профессор,
[1] Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(государственный технологический университет).
Для контактов: Герасименко Т.Е., e-mail: gerasimenko_74@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

S.I. Evdokimov[1], Cand. Sci. (Eng.),
Assistant Professor, e-mail: eva-ser@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2960-4786,
T.E. Gerasimenko[1], Cand. Sci. (Eng.),
Head of Intellectual Property Department,
e-mail: gerasimenko_74@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-7048-4379,
Y.I. Kondratiev[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor,
[1] North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy
(State Technological University), 362021, Vladikavkaz, Russia.
Corresponding author: T.E. Gerasimenko, e-mail: gerasimenko_74@mail.ru.

Получена редакцией 14.02.2023; получена после рецензии 15.03.2023; принята к печати 10.04.2023.
Received by the editors 14.02.2023; received after the review 15.03.2023; accepted for printing 10.04.2023.