

ИЗВЛЕЧЕНИЕ ЗОЛОТА ИЗ РУД ФЛОТАЦИЕЙ В УСЛОВИЯХ ТЕПЛОМАСООБМЕНА МЕЖДУ ФАЗАМИ

Евдокимов С.И., Герасименко Т.Е.

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

Аннотация

Постановка задачи: в статье приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований извлечения золота из руд новым способом флотации, а также разработанная на кафедре обогащения полезных ископаемых ФГБОУ ВО СКГМИ (ГТУ) лабораторная установка для его осуществления. Установка предназначена для измерения размеров пузырьков воздуха в условиях, моделирующих промышленный пенно-агитационный процесс флотации. **Цель работы:** совершенствование технологии флотации в условиях нестационарного нагрева границы раздела фаз «газ-жидкость» для обеспечения повышения извлечения золота из руд. **Новизна:** развития теории процесса образования флотокомплекса в условиях нагрева смачивающей пленки. Выявлен механизм флотации при использовании в качестве газовой фазы смеси воздуха с горячим водяным паром. Установлены обуславливающие его факторы и причины высокой эффективности процесса. Анализ показал, что при внезапном контакте пузырька, заполненного горячим водяным паром, с холодной жидкостью поверхность пузырька совершает колебания под воздействием фазового массообмена, то есть конденсации дисперсной фазы и испарения несущей фазы. Интенсивность фазовых переходов определяется способностью веществ взаимодействующих фаз отводить и подводить тепло. Причем при сжатии пузырька пар отдает в жидкость больше тепла, чем получает от жидкости при расширении. Факторами, обеспечивающими изменение устойчивости смачивающих пленок при повышении температуры, являются поверхностные силы структурного происхождения с участием нанопузырьков. **Результат:** разработанный процесс флотации с доставкой теплоносителя (горячего водяного пара) непосредственно в смачивающую пленку позволяет повысить одновременно извлечение ценного компонента и качество концентрата при высокой удельной производительности процесса. **Практическая значимость:** выявленный механизм взаимодействия газовой и жидкой фаз разной температуры позволяет разработать целенаправленный подход к созданию новых высокоэффективных флотационных технологий.

Ключевые слова: флотация паровоздушной смесью, теплообмен, массообмен, испарение, конденсация, технологические свойства пузырьков.

Введение

Повышенный интерес исследователей [1–7] к структуре и свойствам жидкостей в тонких пленках (например, при флотации [8, 9]) вызван обнаружением у них необычных физико-химических свойств. Главным фактором, оказывающим влияние на физические и химические свойства малых объемов жидкостей по мере уменьшения их размеров, является возрастание в них относительной доли «поверхностных» слоев, находящихся в иных условиях (координационное число, симметрия локального окружения и т.п.), чем жидкость объемной фазы. За счет этого происходит серьезное изменение свойств «поверхностных» слоев, в результате чего также изменяется характер взаимодействия между молекулами, находящимися на поверхности, и молекулами в объеме жидкости, что может приводить к кардинальному изменению физических свойств – свойства поверхностных и внутренних областей жидкостей различаются. С энергетической точки зрения специфика малых объектов

состоит в том, что чем они меньше, тем большую относительную долю в них занимают молекулы, непосредственно расположенные вблизи границы раздела и существенно взаимодействующие с ограничивающими объект фазами.

Предметом исследования является сопряженный тепломассоперенос при внезапном контакте пузырька пара с холодной жидкостью [10–12]. Актуальность выполненных исследований связана с решением проблемы развития теории и методов тепловой модификации тонких пленок в сепарационном массопереносе с целью повышения извлечения золота из минерального сырья флотацией.

Теория, материалы и методы исследования, технические и технологические разработки

Свободная энергия жидкости в модифицированном поверхностном слое гидрофобных частиц в среднем выше, чем в глубине жидкости. В данном случае модифицированная структура жидкости не является следствием ее сильного взаимодействия с поверхностью; оно вызывается силами, возникающими внутри самой жидкости вблизи слабо взаимодействующей с ней поверх-

ностью. При сближении частиц эти слои начнут перекрываться, и их суммарный объем уменьшится, а значит, уменьшится и свободная энергия всей системы. Поэтому свободная энергия G системы, состоящей из гидрофобных частиц и растворителя, будет функцией расстояния R между частицами и по мере сближения частиц будет уменьшаться: $\partial G / \partial R < 0$.

Наоборот, чтобы удалить частицы друг от друга, потребуется совершить работу, которая расходуется на то, чтобы перевести дополнительное число молекул растворителя из объема во вновь образующуюся поверхностную зону. Поэтому частицы ведут себя так, как будто между ними существуют силы притяжения (отрицательное расклинивающее давление) величиной $\partial G / \partial R$ и с радиусом действия, равным толщине поверхностной зоны – гидрофобное притяжение.

Вследствие стабилизации модифицированной структуры присутствием неполярной частицы ее разрушение при повышении температуры может идти менее интенсивно, чем разрушение структуры воды в объеме. В результате свободная энергия поверхностной структуры будет убывать с ростом температуры медленнее, чем объемной, что, по нашему мнению, и является причиной роста сил гидрофобного притяжения.

Следовательно, повышение температуры является эффективным методом интенсификации флотации. Результат контакта частицы с пузырьком воздуха (частица закрепится на поверхности пузырька воздуха с образованием трехфазного периметра и краевого угла смачивания (флотокомплекса) или их взаимодействие закончится без образования флотокомплекса) определяется процессами, происходящими в межфазном зазоре толщиной 100–200 нм. С целью снижения расхода дорогостоящего теплоносителя (например, в виде теплоты конденсации горячего насыщенного водяного пара) он должен быть доставлен непосредственно в зону контакта пузырька воздуха с частицей. В работе поставленная задача решена применением при флотации в качестве газовой фазы смеси воздуха с горячим водяным паром [13–15].

Механизм взаимодействия пузырька, заполненного горячим водяным паром, с холодной окружающей жидкостью состоит в следующем.

В начальный момент времени при контакте с холодной жидкостью пузырек уменьшается в размере за счет конденсации пара. Уменьшение размера пузырька сопровождается ухудшением теплообмена между паром и основной жидкостью: тепло, выделяющееся при конденсации пара, не уходит полностью в жидкость. В результате пар перегревается и конденсация сменяется испарением жидкости, что приводит к

резкому возрастанию давления в пузырьке, неадекватному изменению его размера. В этот момент времени массообмен прекращается, и пузырек, достигнув своего минимального размера, начинает увеличиваться. По мере увеличения пузырька теплообмен между паром и основной жидкостью с увеличением размера пузырька улучшается, пар резко охлаждается, давление в пузырьке уменьшается и массообмен возобновляется. На границе раздела фаз жидкость становится перегретой и начинает интенсивно испаряться с поглощением тепла. Тепло идет не только на испарение жидкости, но и на нагрев пара. В результате охлаждение пара прекращается, его температура растет, стремясь к начальному значению. Таким образом, изменение размера пузырька происходит за счет фазовых переходов газ-жидкость. Сжатие или разряжение пара как совершенного газа имеет подчиненное значение [16, 17].

Размеры пузырьков определяли по величине ЭДС индукции в витках катушек, расположенных по высоте стеклянной трубки, заполненной ферромагнитной жидкостью и помещенной в зазор между полюсами электромагнита, по методике, изложенной в [18]. На основании полученного выражения

$$\Phi = \mu H_0 R^2 N \frac{R}{L} \Psi \left(\frac{R}{h}, \frac{\Delta}{L}, \frac{h}{L}, \mu \right), \quad (1)$$

где Φ – магнитный поток, Вб; μ – магнитная проницаемость, Гн/м; H_0 – нормальная к плоскости витка компонента магнитного поля, А/м; L – радиус витка катушек, м; R – радиус пузырька, м; Δ – смещение пузырька пара относительно оси симметрии катушки высотой h с числом витков N , м; Ψ – безразмерная функция потока магнитного поля через катушку) сделан вывод, что величина индукционного сигнала в катушке зависит от размера проходящего через нее пузырька.

Время контакта частицы и пузырька τ_k в условиях флотации составляет первые десятки миллисекунд, т.е. при условии $\tau_k < \tau_{\text{инд}}$ ($\tau_{\text{инд}}$ – минимально необходимое время для прилипания частицы к пузырьку с образованием конечного краевого угла смачивания – время индукции) частица не закрепляется на поверхности пузырька.

Для сопоставления времени полной конденсации пара в пузырьках t и времени контакта частицы с пузырьком в условиях флотации экспериментально апробированную зависимость изменения радиуса пузырька r от времени [13–15, 19]

$$\frac{r(t)}{r} = \left[1 - \frac{6}{\sqrt{\pi}} Ja \times Pe^{1/2} \times Fo \right]^{2/3}, \quad (2)$$

где $Ja = \frac{c_p \rho_2 \Delta T}{\rho_1 r_k}$ – критерий Якоба (c_p – тепло-

емкость при постоянном давлении холодного теплоносителя, Дж/(кг·К); ΔT – разность температур горячего и холодного теплоносителей, К; r_k – удельная теплота конденсации, Дж/кг);

$Pe = \frac{2\omega r}{a} = \frac{c_p \rho_2 \omega r}{\lambda_2}$ – критерий Пекле (ω – ско-

рость потока жидкости относительно поверхности теплообмена с начальным размером r_0 , м/с; λ_2 – коэффициент теплопроводности холодного теплоносителя, кг·м/(К·с³); a – коэффициент температуропроводности холодного теплоноси-

теля, м²/с); $Fo = \frac{at}{4r^2}$ – критерий Фурье) приве-

дем к выражению, соответствующему предельному случаю схлопывания пузырька от максимального размера до нуля

$$\left[1 - \frac{6}{\sqrt{\pi}} Ja \times Pe^{1/2} \times Fo \right]^{2/3} \rightarrow \rightarrow \frac{6}{\sqrt{\pi}} Ja \times Pe^{1/2} \times Fo = 1, \quad (3)$$

подставим в него значения критериев в развернутом виде

$$\frac{36}{\pi} Ja^2 \times Pe \times Fo^2 = \frac{36(c_p \rho_2 \Delta T)^2 2\omega r (at)^2}{16\pi(\rho_1 r_k)^2 ar^4} = 1 \quad (4)$$

и получим выражение для расчета времени, необходимого для полной конденсации пара в пузырьках:

$$t_k = \left[\frac{4\pi(\rho_1 r_k)^2 r^3}{9(c_p \rho_2 \Delta T)^2 2\omega a} \right]^{1/2}. \quad (5)$$

Для пузырьков размером $r = 0,6 \times 10^{-3}$ м, всплывающих со скоростью $\omega = 16,7 \times 10^{-2}$ м/с, время выравнивания температуры пара в пузырьках и окружающей жидкости при теплофизических и режимных параметрах паровоздушной флотации составляет

$$t_k = \left[\frac{4 \cdot 3,14 (1,579 \cdot 10^{-3} \cdot 2258 \cdot 10^3)^2 \times \times (0,6 \cdot 10^{-3})^3}{9 (4,182 \cdot 10^3 \cdot 998,2 \cdot 87)^2 \times \times 2 \cdot 16,7 \cdot 10^{-2} \cdot 1,44 \cdot 10^{-7}} \right]^{1/2} = 1,9 \cdot 10^{-2} \text{ с}, \quad (6)$$

что соизмеримо со временем контакта частицы с пузырьком в процессе флотации [13–15].

Из (2) следует, что

$$\frac{6a(c_p \rho_2 \Delta T)^2 \omega t}{(\rho_1 r_k)^2} = \frac{4}{3} \pi \frac{r^3}{t} = \frac{V}{t}. \quad (7)$$

Значение скорости конденсации пара определим, продифференцировав по времени зависимость объема пузырька пара V от времени нахождения его в холодной воде t :

$$V = 163,96 - 20,57\tau, \quad (8)$$

полученную прямой аппроксимацией результатов исследования (где τ изменяется от 0 до 8 мкс). Тогда среднее расстояние, пройденное пузырьком до полной конденсации пара ωt при его сопряженном тепломассообмене с холодной водой, составит

$$\frac{6 \cdot 1,44 \cdot 10^{-7} (4,82 \cdot 10^3 \cdot 998 \cdot 87)^2 \omega t}{(1,579 \cdot 10^{-3} \cdot 2258 \cdot 10^3)^2} = = -20,57 \rightarrow \omega t = 2,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad (9)$$

что близко к результату $\omega t = 16,7 \cdot 10^{-2} \cdot 1,7 \cdot 10^{-2} = 2,8 \cdot 10^{-3}$ м.

Силовым фактором, обеспечивающим изменение устойчивости смачивающих пленок при повышении температуры, являются «не-ДЛФО»-силы [20–22] (структурные силы гидрофобного притяжения и гидрофильного отталкивания, входящие в суммарную изотерму расклинивающего давления. Рост дальнего действия сил притяжения связан с выделением на гидрофобных поверхностях нанопузырьков газа, растворенного в воде, и их коалесценцией с пузырьком пара [22–24].

Основу установки для колонной флотации паровоздушной смесью составляла собственно колонна 1 (с устройствами для разгрузки продуктов разделения 2, 3) и пневмогидравлический аэратор конфузтор-диффузорного типа 4. В паровоздушный поток подавали эмульсию поверхностно-активного вещества с помощью разработанных устройств 5, 6, 7 (рис. 1). Рабочим потоком пневмогидравлического аэратора служила паровоздушная смесь, создаваемая парогенератором 8 (со вспомогательным оборудованием для получения пара 9, 10 и контроля процесса 11–16).

Аэратор служит для образования паровоздушной смеси и последующего ее диспергирования на пузырьки воздуха, заполненные паром (рис. 2) [25]. Основными элементами конструкции аэратора является рабочее сопло 1, первая ступень подвода пассивного водяного пара 2, вторая ступень

подвода пассивного водяного пара 3, камера смешения рабочего потока воздуха с пассивным потоком водяного пара 4, диффузор 5.

Установка для измерения размера паровоздушных пузырьков, образующихся в условиях, моделирующих процесс аэрозольной колонной флотации, приведена на **рис. 3**.

Результаты исследования и их обсуждение

Из результатов экспериментальных испытаний изменения размера пузырьков, заполненных насыщенным водяным паром, следует, что при барботировании ими недогретой жидкости в условиях, моделирующих процесс аэрозольной колонной флотации, следует ожидать, что размер пу-

зырьков за счет конденсации в них пара будет уменьшаться, по меньшей мере, в два раза (**рис. 4**).

Объектом экспериментальных исследований была проба руд Олимпиадинского месторождения. Результаты извлечения золота из нее конкурирующими технологиями приведены в **табл. 1**.

С целью определения причин снижения потерь золота с отходами флотации выполнено исследование распределения золота по классам крупности отходов (**табл. 2**). Из результатов, приведенных в **табл. 2**, следует, что увеличение извлечения золота достигнуто в результате снижения потерь мелкого золота с отвальными хвостами флотации. Это доказывает эффективность разработанного способа флотации.

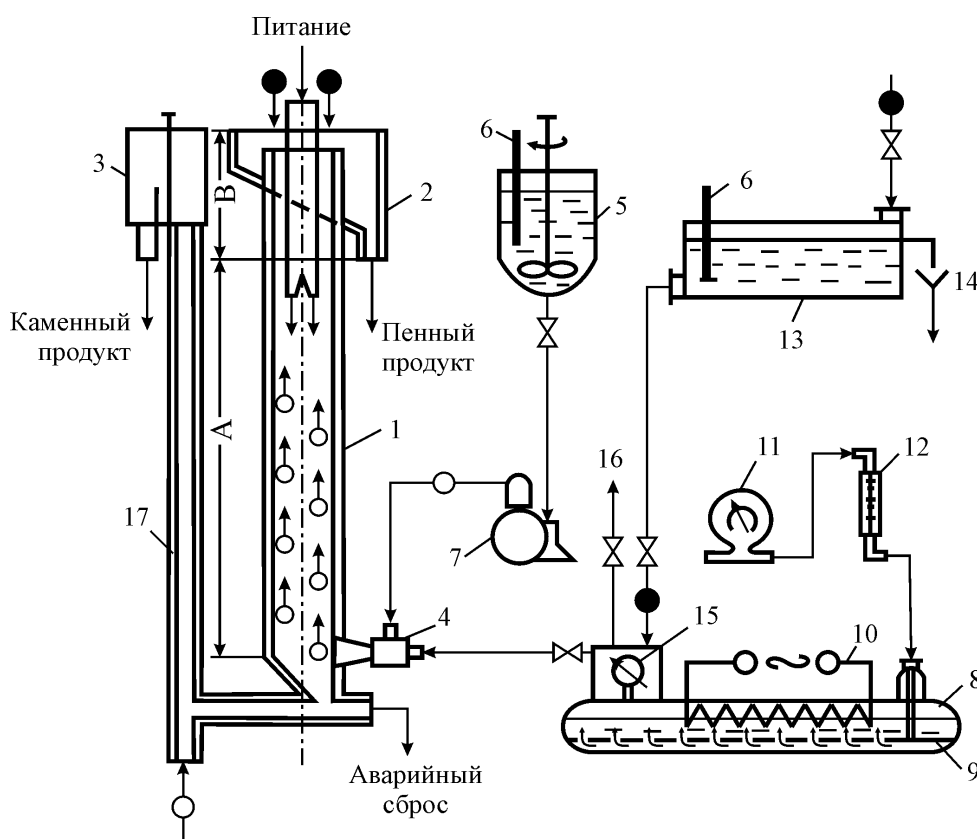


Рис. 1. Схема установки колонной флотации пузырьками пара, полученными диспергированием потока воздуха и водяного пара с присадкой поверхностно-активного вещества

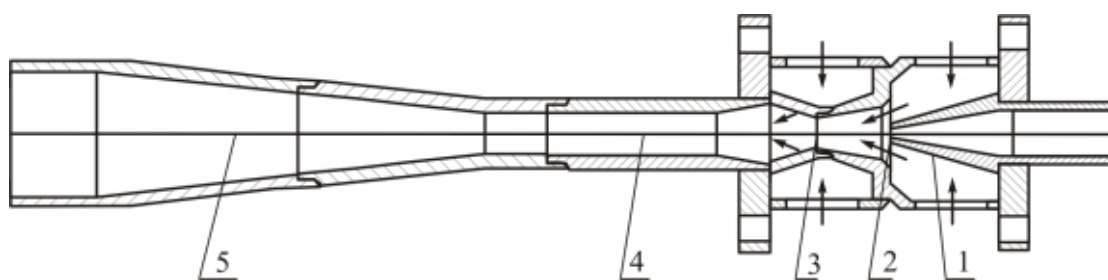


Рис. 2. Схема аэратора

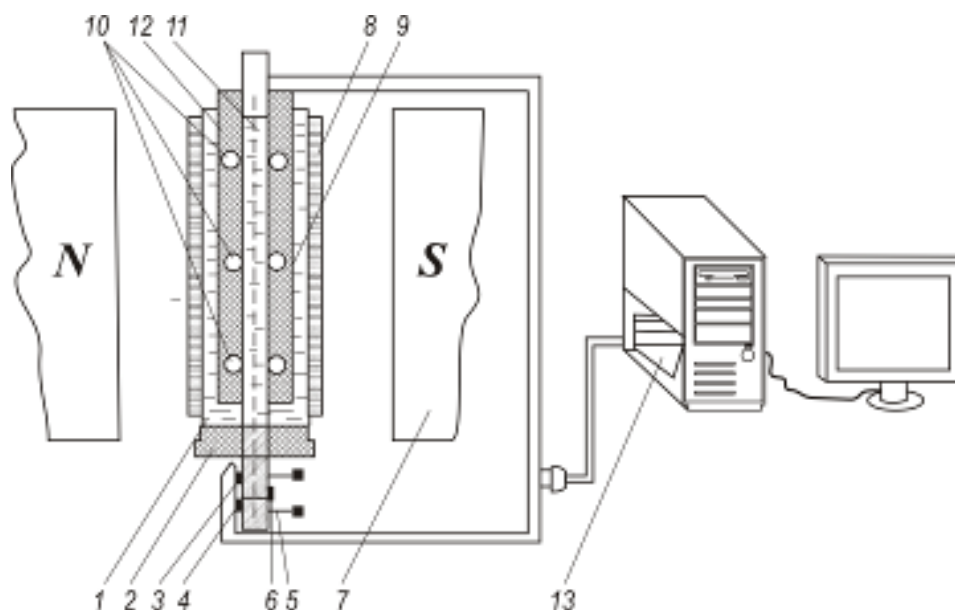


Рис. 3. Схема расположения измерительной ячейки в магнитной системе:
1, 2, 3 – крепление конденсирующего устройства в контейнере с электронагревом;
4 – контейнер; 5, 6, 9 – термопары; 7 – полюс электромагнита; 8 – верхнее крепление контейнера;
10, 11, 12 – измерительная система; 13 – компьютер

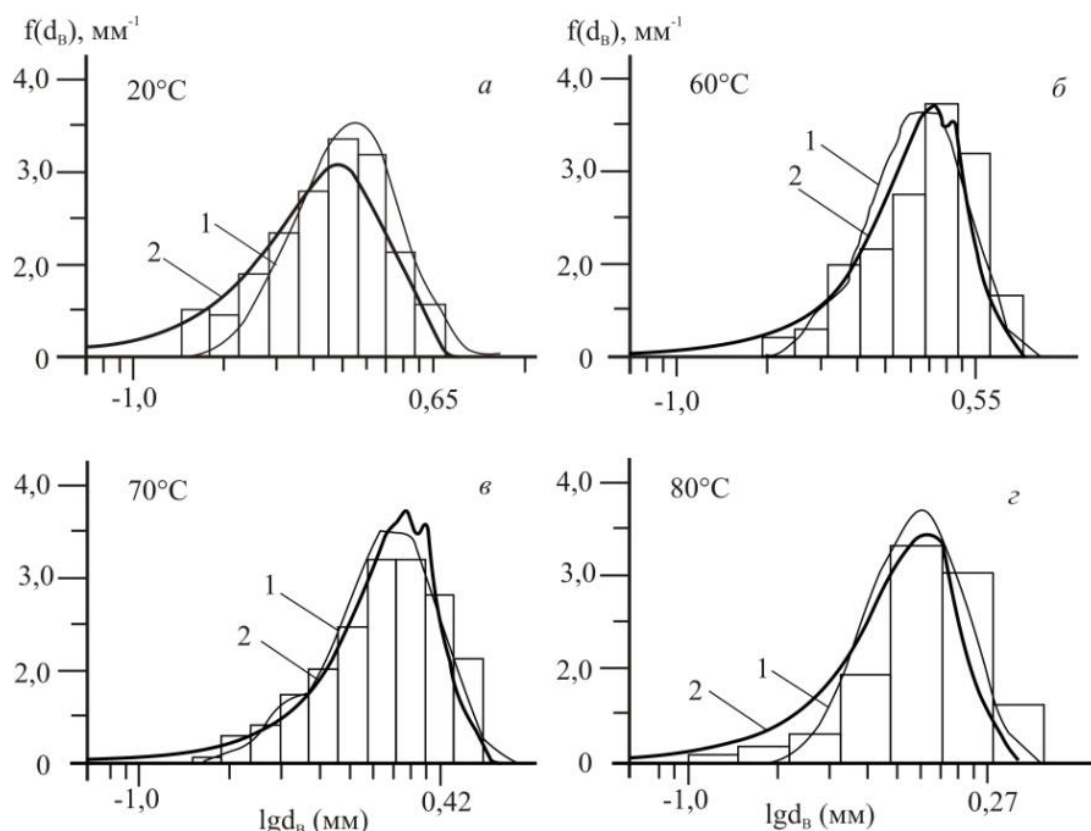


Рис. 4. Весовая функция плотности распределения пузырьков по размерам как функция температуры паровоздушной смеси: а – при 20°C; б – при 60°C, в – при 70°C, г – при 80°C; 1 – напряженность магнитного поля 30,7 кА/м; 2 – напряженность магнитного поля 70,7 кА/м

Таблица 1

Результаты флотации золотосодержащих руд при различном расходе льда, подаваемого в пульпу

Наименование продукта флотации	Показатели флотационного разделения		
	Выход продукта, %	Содержание золота в продукте, г/т	Извлечение золота в продукт, %
Флотация по известному способу			
Концентрат	6,36	35,14	81,27
Хвосты	93,64	0,550	18,73
Исходная руда	100,0	2,75	100,0
Флотация по разработанному способу			
Концентрат	2,82	86,30	89,15
Хвосты	97,18	0,305	10,85
Исходная руда	100,0	2,73	100,0

Таблица 2

Распределение ценного компонента в хвостах флотации руд

Класс крупности хвостов, мм	Характеристика хвостов флотации руд					
	Известный способ флотации			Разработанный способ флотации		
	Выход, %	Содержание Au, г/т	Потери Au, %	Выход, %	Содержание Au, г/т	Потери Au, %
-0,2+0,1	9,26	1,43	4,81	7,72	0,845	2,39
-0,1+0,071	10,66	0,93	3,60	11,88	0,55	2,39
-0,071+0,045	14,58	0,18	0,98	24,97	0,11	1,00
-0,045+0,038	7,11	0,74	1,90	7,53	0,44	1,20
-0,038+0,020	12,69	0,42	1,93	11,04	0,25	1,00
-0,020+0,010	11,25	0,48	1,98	10,67	0,29	1,12
-0,010+0	28,09	0,35	3,53	23,37	0,20	1,75
Итого	93,64	0,550	18,73	97,18	0,305	10,85

Заключение

Из сопоставления времени полной конденсации пара в пузырьках и времени контакта частицы с пузырьком в условиях флотации следует, что сопряженный тепломассообмен пара с холодной жидкостью может оказывать влияние на результат образования флотокомплекса, например, за счет роста сил гидрофобных взаимодействий при локальном нагреве смачивающей пленки. Разница

температур двух теплоносителей – пузырьков пара и окружающей жидкости – является причиной уменьшения размера пузырьков, поверхность которых совершает затухающие колебания. Следствие тепловой модификации технологических свойств пузырьков – рост показателей процесса флотации, что доказано экспериментально при извлечении золота из руд способом флотации, который от известного отличается тем, что в качестве газовой фазы используют смесь воздуха с водяным паром.

Список литературы

1. Pan L., Jung S., Yoon R.-H. Effect of hydrophobicity on the stability of the wetting films of water formed on gold surfaces. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2011, vol. 361, no. 1, pp. 143–150.
2. Danov K.D., Kralchevsky P.A. Capillary forces between particles at a liquid interface: General theoretical approach and interactions between capillary. *Advances in colloid and interface science*. 2010, vol. 154, no. 1–2, pp. 91–103.
3. Wang J., Yoon R.-H., Morris J. AFM surface force measurements conducted between gold surfaces treated in xanthate solutions. *International Journal of Mineral Processing*. 2013, vol. 122, pp. 13–21.
4. Heydari G., Moghaddam M.S., Tuominen M., Fielden M., Haapanen J., Makola J.M., Claesson Per. M. Wetting hysteresis induced by temperature changes: super cooled water on hydrophobic surfaces. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2016, vol. 468, pp. 21–23.
5. Tie L., Guo Z., Li W. Optimal design of superhydrophobic surfaces using a paraboloid microtexture. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2014, vol. 436, pp. 19–28.
6. Truong V.K., Owuor E.A., Muugaraj P., Crawford R.J., Mainwaring D.E. Impact of particle nanotopology on water transport through hydrophobic solid. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2015, vol. 460, pp. 61–70.
7. Wu Y., Cai M., Li Z., Song X., Wang H., Pei X., Zhou F. Slip flow of diverse liquids on robust superhydrophobic surface. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2014, vol. 414, pp. 9–13.
8. Кузнецов Г.В., Феоктистов Д.В., Орлова Е.Г. Режимы растекания капли воды по подложкам с различной смачиваемостью // *Инженерно-физический журнал*. 2016. Т. 89. № 2. С. 310–316.
9. Гасанов В.М. Измерение равновесно краевого угла смачивания как метод исследования состояния поверхностной энергии на границе раздела фаз твердое тело-жидкость-газ // *Инженерно-физический журнал*. 2016. Т. 87. № 3. С. 599–605.
10. Шишкова И.Н., Крюков А.П. Приближенное решение сопряженной задачи тепло- и массопереноса через межфазную поверхность // *Инженерно-физический журнал*. 2016. Т. 89. № 2. С. 483–489.
11. Снижение давления пара при конденсации на холодной жидкости / Бочкарева Е.М., Немцев В.А., Сорокин В.В. и др. // *Инженерно-физический журнал*. 2016. Т. 89. № 3. С. 537–548.

12. Левданский В.В., Смолик И., Здимал В. Влияние различных эффектов на формирование аэрозольных наночастиц при конденсации пересыщенного пара // Инженерно-физический журнал. 2014. Т. 87. № 5. С. 1199–1205.
13. 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.
14. Евдокимов С.И., Евдокимов В.С. Переработка руд и техногенного медно-никелевого сырья с применением технологии струйной паровоздушной флотации // Изв. вузов. Цветная металлургия. 2015. № 2. С. 3–8.
15. Евдокимов С.И., Дациев М.С., Подковыров И.Ю. Разработка новой схемы и способа флотации руд Олимпиадинского месторождения // Изв. вузов. Цветная металлургия. 2014. № 1. С. 3–11.
16. Лежнин С.И., Сорокин А.Л. Моделирование эволюции импульса разрежения при контакте холодной жидкости и насыщенного пара // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17. № 3. С. 397–400.
17. Актершев С.П. Рост парового пузырька в предельно перегретой жидкости // Теплофизика и аэромеханика, 2005. Т. 12. № 3. С. 445–457.
18. Кобозев М.А., Симоновский А.Я. Метод измерения, экспериментальная установка и результаты измерения частоты образования пузырьков пара при кипении магнитной жидкости на одиночном центре парообразования // Журнал технической физики. 2007. Т. 77. Вып. 11. С. 31–38.
19. Королев А.В. Особенности скачка давления в пароводяных инжекторах // Энергетика: Изв. вузов и энергетических объединений СНГ. 2009. № 6. С. 31–36.
20. Чураев Н.В. Поверхностные силы и физикохимия поверхностных явлений // Успехи химии. 2004. Т. 73 (1). С. 26–38.
21. Бойнович Л.Б. Дальнодействующие поверхностные силы и их роль в развитии нанотехнологии // Успехи химии. 2007. Т. 76 (5). С. 510–529.
22. Виноградова О.И. Особенности гидродинамического и равновесного взаимодействия гидрофобных поверхностей: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М.: Институт физической химии РАН, 2000. 175 с.
23. Simonsen A.C., Hansen P.L., Klossgen B. Nanobubbles give evidence of incomplete wetting at a hydrophobic interface. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2004, vol. 273, pp. 291–299.
24. Hampton M.A., Nguyen A.V. Nanobubbles and the nanobubble bridging capillary force. *Advances in colloid and interface science*. 2010, vol. 154, no. 1–2, pp. 30–55.
25. Галимзянов М.Н., Лепихин С.А. Истечение двухфазной смеси через сопло с учетом фазовых переходов // Вестник Самарского государственного университета. Естественнонаучная серия. 2010. № 2 (76). С. 96–104.

Поступила 14.07.17.

Принята в печать 23.08.17.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-4-10-18>

EXTRACTION OF GOLD FROM ORES BY FLOTATION IN THE CONDITIONS OF HEAT AND MASS TRANSFERS TAKING PLACE BETWEEN THE PHASES

Sergey I. Evdokimov – Ph.D. (Eng.), Assistant Professor

North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technical University), Vladikavkaz, Russia. E-mail: eva-ser@mail.ru

Tatiana E. Gerasimenko – Ph.D. (Eng.), Assistant Professor

North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technical University), Vladikavkaz, Russia. E-mail: gerasimenko_74@mail.ru

Abstract

Problem Statement: This article describes the results of theoretical and experimental studies that looked at a new gold flotation method and at the corresponding laboratory unit designed by the Department of Mineral Processing of the North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy. The unit is designed to change the size of air bubbles in the process simulating the industrial agitation-froth process. **Objectives:** The authors of this research look at improving the flotation process in the conditions of unsteady heat applied to the gas-liquid interface aimed at enhancing the recovery of gold from ores. **Originality:** Contribution has been made to the theory of designing floatation installations in which heat is applied to the wetting film. The authors identified the flotation

mechanism for the environment in which a mixture of air and hot steam is used as the gas phase. They also established the enabling factors and what makes it a highly efficient process. The analysis shows that when a bubble filled with hot water vapour suddenly comes in contact with cold liquid, the surface of the bubble starts oscillating due to the phase mass transfer, i.e. when the disperse phase condenses and the carrier phase evaporates. The intensity of phase transitions is determined by the heat transmission properties of the components within the interacting phases. When the bubble is compressed, the steam transfers more heat to the liquid than the heat it receives from the liquid during expansion. The factors that change the stability of wetting films when the temperature rises include the surface forces of the structural origin with nanobub-

bles involved. **Findings:** The flotation process developed, in which the heat transfer medium, i.e. hot water vapour, is supplied directly to the wetting film, enables to improve both the recovery of the valuable metal and the quality of the concentrate at a high specific throughput rate. **Practical Relevance:** With the help of the gas-liquid interaction pattern identified with the two phases having different temperatures, one can develop a specific approach to engineering new high-efficiency flotation processes.

Keywords: Steam-air mixture flotation, heat exchange, mass transfer, evaporation, condensation, performance of the bubbles.

References

1. Pan L., Jung S., Yoon R.-H. Effect of hydrophobicity on the stability of the wetting films of water formed on gold surfaces. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2011, vol. 361, no. 1, pp. 143–150.
2. Danov K.D., Kralchevsky P.A. Capillary forces between particles at a liquid interface: General theoretical approach and interactions between capillary. *Advances in colloid and interface science*. 2010, vol. 154, no. 1–2, pp. 91–103.
3. Wang J., Yoon R.-H., Morris J. AFM surface force measurements conducted between gold surfaces treated in xanthate solutions. *International Journal of Mineral Processing*. 2013, vol. 122, pp. 13–21.
4. Heydari G., Moghaddam M.S., Tuominen M., Fielden M., Haapanen J., Makola J.M., Claesson Per. M. Wetting hysteresis induced by temperature changes: super cooled water on hydrophobic surfaces. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2016, vol. 468, pp. 21–23.
5. Tie L., Guo Z., Li W. Optimal design of superhydrophobic surfaces using a paraboloid microtexture. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2014, vol. 436, pp. 19–28.
6. Truong V.K., Owuor E.A., Muugaraj P., Crawford R.J., Mainwaring D.E. Impact of particle nanotopology on water transport through hydrophobic solid. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2015, vol. 460, pp. 61–70.
7. Wu Y., Cai M., Li Z., Song X., Wang H., Pei X., Zhou F. Slip flow of diverse liquids on robust superhydrophobic surface. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2014, vol. 414, pp. 9–13.
8. Kuznetsov G.V., Feoktistov D.V., Orlova E.G. The spread of a water droplet over substrates of different wettability. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal* [Journal of Engineering Physics], 2016, vol. 89, no. 2, pp. 310–316. (In Russ.)
9. Gasanov V.M. Measurement of the equilibrium contact angle of wetting as a method for studying the surface energy state at the solid-liquid-gas interface. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal* [Journal of Engineering Physics], 2016, vol. 87, no. 3, pp. 599–605. (In Russ.)
10. Shishkova I.N., Kryukov A.P. An approximate solution of the conjugate problem of heat and mass transfer through the interphase surface. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal* [Journal of Engineering Physics], 2016, vol. 89, no. 2, pp. 483–489. (In Russ.)
11. Bochkareva E.M., Nemtsev V.A., Sorokin V.V. et al. Reduction in vapour pressure during condensation on a cold liquid. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal* [Journal of Engineering Physics], 2016, vol. 89, no. 3, pp. 537–548. (In Russ.)
12. Levdanskiy V.V., Smolik I., Zdimal V. The impact of various effects on the formation of aerosol nanoparticles during condensation of supersaturated vapour. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal* [Journal of Engineering Physics], 2014, vol. 87, no. 5, pp. 1199–1205. (In Russ.)
13. Evdokimov S.I., Pan'shin A.M., Solodenko A.A. *Mineralurgiya. V 2-kh t. T. 2. Uspekhi flotatsii* [Mineralurgy. In 2 volumes. Vol. 2. Progress in floatation], Vladikavkaz: MAVR Research, Production & Trade Company, 2010, 992 p. (In Russ.)
14. Evdokimov S.I., Evdokimov V.S. Processing of ores and man-made copper-nickel materials using the jet steam-air flotation process. *Izv. vuzov. Tsvetnaya metallurgiya* [Proceedings of the Russian universities. Non-ferrous metallurgy], 2015, no. 2, pp. 3–8. (In Russ.)
15. Evdokimov S.I., Datsiev M.S., Podkovyrov I.Yu. Development of a new flotation circuit and method for the Olimpiada mine ores. *Izv. vuzov. Tsvetnaya metallurgiya* [Proceedings of the Russian universities. Non-ferrous metallurgy], 2014, no. 1, pp. 3–11. (In Russ.)
16. Lezhnin S.I., Sorokin A.L. Simulation of the rarefaction impulse evolution when cold liquid comes in contact with saturated vapour. *Teplofizika i aeromekhanika* [Thermophysics and Aeromechanics], 2010, vol. 17, no. 3, pp. 397–400. (In Russ.)
17. Aktershev S.P. The growth of a vapour bubble in an extremely superheated liquid. *Teplofizika i aeromekhanika* [Thermophysics and Aeromechanics], 2005, vol. 12, no. 3, pp. 445–457. (In Russ.)
18. Kobozev M.A., Simonovskiy A.Ya. The measurement method, the experimental unit and the results of measurement of how often vapour bubbles form when a magnetic fluid is boiling on a single nucleation site. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Journal of Engineering Physics], 2007, vol. 77 (11), pp. 31–38. (In Russ.)
19. Korolev A.V. A description of the pressure jump in steam-water injectors. *Energetika: Izv. vuzov i energeticheskikh obyedineniy SNG* [Power engineering: Proceedings of the Russian universities and the energy associations from CIS], 2009, no. 6, pp. 31–36. (In Russ.)
20. Churaev N.V. Surface forces and the physical chemistry of surface effects. *Uspekhi khimii* [Progress in chemistry], 2004, vol. 73 (1), pp. 26–38. (In Russ.)
21. Boynovich L.B. Long-range surface forces and their role in the development of nanotechnology. *Uspekhi khimii* [Progress in chemistry], 2007, vol. 76 (5), pp. 510–529. (In Russ.)
22. Vinogradova O.I. *Osobennosti gidrodinamicheskogo i ravnovesnogo vzaimodeystviya gidrofob-nykh poverkhnostey: dis. ... dokt.fiz.-mat.nauk* [Hydrodynamic and equilibrium interaction of hydrophobic surfaces. Doctoral dissertation]. Moscow: RAS Institute of Physical Chemistry,

- 2000, 175 p. (In Russ.)
23. Simonsen A.C., Hansen P.L., Klosgen B. Nanobubbles give evidence of incomplete wetting at a hydrophobic interface. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2004, vol. 273, pp. 291–299.
24. Hampton M.A., Nguyen A.V. Nanobubbles and the nanobubble bridging capillary force. *Advances in colloid and interface science*. 2010, vol. 154, no. 1-2, pp. 30–55.
25. Galimzyanov M.N., Lepikhin S.A. A two-phase mixture flowing out through a nozzle and the phase transitions that take place. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo universiteta. Yestestvennonauchnaya seriya* [Bulletin of the Samara State University. Natural science series], 2010, no. 2 (76), pp. 96–104. (In Russ.)

Received 14/07/17

Accepted 23/08/17

Образец для цитирования

Евдокимов С.И., Герасименко Т.Е. Извлечение золота из руд флотацией в условиях тепломассообмена между фазами // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т.15. №4. С. 10–18. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-4-10-18>

For citation

Evdokimov S.I., Gerasimenko T.E. Extraction of gold from ores by flotation in the conditions of heat and mass transfers taking place between the phases. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017, vol. 15, no. 4, pp. 10–18. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-4-10-18>
