

УДК 622.765

С.В. Артемов, А.М. Паньшин, М.Ж. Критская
ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ
ФЛОТАЦИИ АЭРОЗОЛЕМ

Теоретически и экспериментально исследовано влияние времени индукции и релаксации деформированного адсорбционного слоя пузырька на устойчивость смачивающей пленки. Показано, что при флотации смесью сухого воздуха с насыщенным водяным паром — аэрозолем — селективность прилипания повышается за счет стабилизации смачивающей пленки. Разработан метод расчета расхода пара при флотации аэрозолем, не требующий эмпирической информации.

Ключевые слова: флотация аэрозолем, время индукции, время релаксации, устойчивость смачивающей пленки, селективность прилипания, расход пара.

Целью работы является исследование влияния температуры на прилипание минералов к пузырьку воздуха в динамических условиях пенной флотации.

Влияние температуры на минимальное время, необходимое для прилипания минералов к пузырьку воздуха — время индукции, — исследовано с использованием контактного прибора типа КЭП-4. В конструкцию прибора КЭП-4 внесли изменения, которые позволили измерять время индукции при прилипании зерен самородного золота друг к другу, т.е. перейти от исследования устойчивости смачивающих (несимметричных) пленок к исследованию устойчивости симметричных пленок. Для этого в приборе держатель с капилляром для генерации пузырька заменили иглой, на острие которой приклеили зерно самородного золота изометричной формы размером 1 × 2 мм (проба золота 910 ед.).

Отсутствие пузырька воздуха изменяет характер зависимости устойчивости межфазной пленки от температуры: время индукции при прилипании зерен самородного золота друг к другу увеличивается с ростом температуры (рис. 1), а объем осадка уменьшается (рис. 2). Уменьшение объема осадка с ростом температуры происходит в результате уменьшения прочности контактов между зернами самородного золота и снижения скорости прорыва межфазной пленки, что характерно для гидрофильных поверхностей [4].

С использованием выражения для изотермы расклинивающего давления $\Pi(h)$ смачивающих пленок

$$\cos \theta = 1 + (1/\sigma) \int_{h_0}^{\infty} \Pi(h_o) dh = 1 + \Pi_m(h) + \Pi_e(h) + \Pi_s(h). \quad (1)$$

(где $\Pi_m(h) = A/12\pi h_o^2 \sigma$ — молекулярная составляющая расклинивающего давления; $\Pi_e(h) = (\varepsilon k/8\pi\sigma) \{ [2\psi_1\psi_2 / sh(kh_0)] - (\psi_1^2 + \psi_2^2) [cth(kh_0) - 1] \}$ —

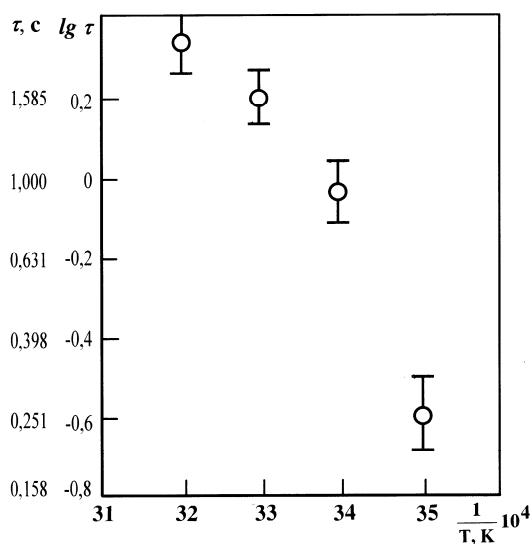


Рис. 1. Время индукции при прилипании зерен самородного золота друг к другу как функция температуры

Примечание: крупность зерен самородного золота в кювете контактного прибора -71 мкм; пробы золота 910 ед.

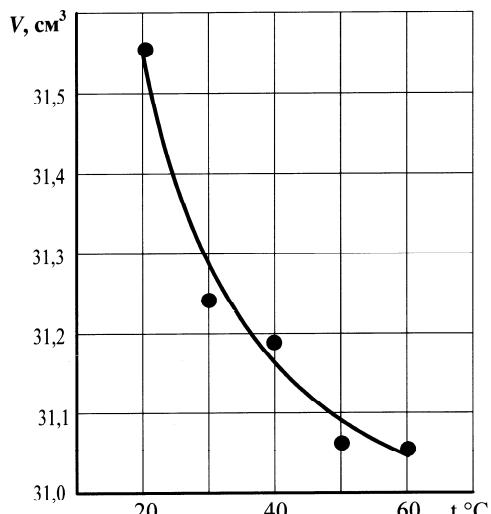


Рис. 2. Объем осадка суспензии самородного золота как функция температуры

ионно-электростатическая составляющая расклинивающего давления; $\Pi_s(h) = (K_s \lambda / \sigma) \exp(-h_0 / \lambda)$ — структурная составляющая расклинивающего давления; $A = 4,1 \times 10^{-12}$ эрг — константа Гамакера для пленок воды на поверхности натяжение жидкости; весии с краевым углом θ ; $\varepsilon = 80$ — штерновский потенциал поверхности газ-жидкость, расцкой подвижности пузырька, мВ) (характеризует величину структурных сил). Процедура их состояла в том, что в уравнении (3) расчеты экспериментальных значе-

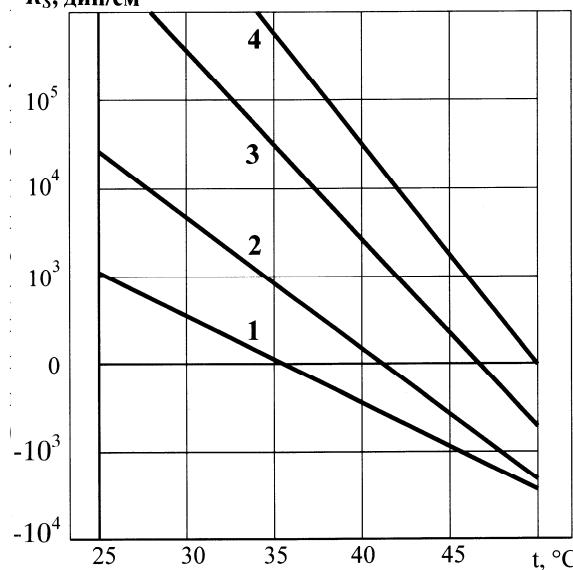


Рис. 3. Зависимость параметра структурных сил K_s для суспензии самородного золота от температуры и концентрации бутилового ксантофената калия.

Концентрация бутилового ксантофената калия, $C \cdot 10^4$, г-моль/л: 1—2,0; 2—1,5; 3—1,0; 4—0,5

Сопоставление зависимости удельного объема осадка и параметра структурных сил K_S от температуры позволяет сделать вывод, что действие структурных сил гидрофильного отталкивания приводит к улучшению смачивания минералов ($K_S > 0$), а проявление структурных сил гидрофобного притяжения ($K_S < 0$) ответственно за рост θ_0 .

Выявленное отличие устойчивости симметричных и смачивающих пленок с повышением температуры мы связываем с тем, что в отличие от симметричных пленок между одинаковыми твердыми поверхностями, смачивающая пленка с одной стороны граничит с пузырьком воздуха. Поскольку пузырек представляет собой полость в воде, имеется основание рассматривать его как типичную гидрофобную частицу, структура воды вблизи которой изменена подобным же образом, как и вблизи твердой гидрофобной поверхности. Нужно иметь в виду, что, в отличие от симметричных водных прослоек, граничащих с обеих сторон с одинаковыми фазами, смачивающая пленка с одной стороны граничит с «гидрофобным» воздухом.

Для изменения результатов флотации достаточно нагреть до T_{inv} ГС пузырька, толщину которого можно оценить по толщине диффузной части ДЭС:

$$\delta_D \sim \left(\frac{1000 DRT}{8\pi e^2 N_A^2 C} \right)^{1/2} \sim 10^{-5} - 10^{-6} \text{ см. Следовательно, для изменения устойчиво-} \\ \text{сти смачивающей пленки при флотации достаточно нагреть только граничный слой пузырька этой толщины. Это возможно, если в качестве газовой фазы при флотации (самостоятельно поступающей во флотомашину или принудительно нагнетаемой) применять аэрозоль в виде смеси горячего водяного пара с воздухом.}$$

Практическое применение технологии аэрозольной флотации требует оценки затрат на ее осуществление.

Принято, что при флотации аэрозолем граничный слой пузырьков нагревается за счет теплопередачи от пара и смешения с его конденсатом. Однако основной нагрев воды при фазовом переходе газ-жидкость определяется теплотой конденсации пара, а тепло смешения конденсата пара с водой для практических расчетов пренебрежимо мало и составляет менее одного процента.

Поверхностная плотность теплового потока q [Вт·м⁻²], подводимого к поверхности раздела фаз газ-жидкость — поверхности фазового перехода теплоносителя, — может быть определена из условия Стефана:

$$q = \rho L U_S, \quad (2)$$

где ρ — плотность паровоздушной смеси; L — удельная теплота парообразования; U_S — текущее значение скорости пара, отводимого с поверхности фазового перехода внутрь жидкости.

От эмпирической информации, необходимой для расчета U_S , можно избавиться, если найти способ согласования математически (дифференциально) бесконечно малых величин с физически предельно малыми (минимальными конечноразмерными). Такой переход можно осуществить, если естественную

границу измерения количества теплоты — значение теплового шума — kT (где k — постоянная Больцмана) принять в качестве минимального приращения энергии $\Delta E = kT$. Энергии переноса kT можно поставить в соответствие некоторую массу Δm и минимальный интервал времени для макроскопического процесса $\Delta t = \hbar / 2kT$ (где \hbar — постоянная Планка). Тогда скорость, найденная из соотношения масса-энергия $\Delta m = kT / U^2$ и будет скоростью на границе фазового перехода U_S . Объем $V_m = \frac{4}{3} \pi r_m^3 = \frac{\pi}{6} \left(\frac{U}{k} \frac{\hbar}{T} \right)$ (где $r_m = U\Delta t = \frac{U\hbar}{2kT}$ —

радиус, занимающий в иерархии макроскопической системы надмолекулярный уровень) по физическому смыслу является минимальным макроскопическим объемом.

Рассчитаем расход насыщенного водяного пара ($t_p = 104 {}^\circ\text{C}$, $p = 1,2 \text{ кгс/см}^2$), необходимый для осуществления паровоздушной флотации.

Частица аэрозоля массой $m = V_m \times \rho = 4,19 \times 10^{-12} \text{ кг}$ на границе фазового перехода имеет скорость $U = \sqrt{kT/m} = 3,45 \times 10^{-5} \text{ м/с}$. Предположим, что при газосодержании восходящего потока пузырьков $\varphi = 0,25$ весь объем воздуха, находящийся в 1 м^3 пульпы, представляет собой коллектив пузырьков, собранных в единую замкнутую систему. Плотность заполнения системы пузырьками ($1 - \Pi$) или, наоборот, ее пористость Π определяются величиной фактора структуры n : $(1 - \Pi) = \frac{\pi}{2n^2} \left(1 - \frac{2}{3} \frac{1}{n} \right)$. Тогда при простой кубической упаковке

($n = 1$) в 1 м^3 пульпы находится 25×10^7 пузырьков $\varnothing 1 \times 10^{-3} \text{ м}$, имеющих площадь поверхности $7,86 \times 10^2 \text{ м}^2$. Тепловой поток, подводимый в 1 м^3 пульпы к границе раздела фаз газ-жидкость $q = 91,8 \text{ кДж/с}$ (или $79101,2 \text{ ккал/ч}$); при этом расход пара $G_p = 79101,2 : (640,58 - 99,09) \times 0,97 = 150,6 \text{ кг/ч}$ (где $i_l = 640,58$ и $\ddot{i}_l = 99,09 \text{ ккал/кг}$ — соответственно теплосодержание пара при $t = 104 {}^\circ\text{C}$ и конденсата при $t = 98,2 {}^\circ\text{C}$).

С другой стороны, при использовании при флотации в качестве газовой фазы паровоздушной смеси температура пульпы увеличивается на $0,5 {}^\circ\text{C}$ в 1 минуту. Следовательно, количество тепла, воспринимаемого 1 м^3 пульпы с плотностью $2,8 \text{ т/м}^3$ в 1 минуту ($168 \times 10^3 \text{ кг/ч}$ пульпы) через теплообменную поверхность пузырьков, составляет $Q = 168 \times 10^3 \times 0,5 = 84 \times 10^3 \text{ ккал/ч}$ (где $i_H = 0,5 \text{ ккал/кг}$ — повышение теплосодержания воды в течение 1 минуты). Тогда расход пара $G_p = 84 \times 10^3 : (640,58 - 99,09) \times 0,97 = 159,9 \text{ кг/ч}$.

Заключение

Выполнен комплекс экспериментальных исследований, из результатов которого следует, что при повышении температуры устойчивость симметричных и смачивающих пленок определяется действием поверхностных сил структурного происхождения. Устойчивость симметричных пленок между хорошо смачиваемыми минералами повышается с ростом температуры за счет роста структур-

ных сил гидрофильного отталкивания; проявление структурных сил гидрофобного притяжения ответственно за снижение устойчивости симметричных пленок между несмачиваемыми минералами. Независимо от свойств твердой поверхности (смачиваемость, плотность и вязкость граничного слоя воды, ориентация диполей воды) устойчивость смачивающих пленок, одной стороной граничащих с воздухом, структура воды вблизи которого изменена подобным же образом, как и вблизи твердой гидрофобной поверхности, уменьшается при повышении температуры за счет проявления сил гидрофобного притяжения, дальнодействие которых превышает протяженность сил гидрофильного отталкивания.

Ширина зоны, за пределами которой отличие поверхностных свойств от их объемных значений становится несущественным, имеет радиус порядка десятков нм. Следовательно, при нагреве граничного слоя пузырьков (за счет использования в качестве газовой фазы аэрозоля — смеси сухого воздуха с насыщенным водяным паром с присадкой аэрозолеобразующего вещества — пенообразователя или ПАВ) изменение результатов флотации можно объяснить действием сил гидрофобного притяжения, радиус действия которых превышает протяженность сил гидрофильного отталкивания.

Из сопоставления времени индукции и релаксации следует, что при флотации аэрозолем перепад поверхностного натяжения вдоль смачивающей пленки препятствует ее утончению, что повышает избирательность прилипания. Предложен неэмпирический подход к расчету расхода пара при флотации аэрозолем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чураев Н.В., Соболев В.Д. Прогноз условий смачивания на основе изотерм расклинивающего давления. Компьютерные расчеты // Коллоидн. журн. — 1995. — Т. 57. — № 6. — С. 888—896.
2. Чураев Н.В., Соболев В.Д. Вклад структурных сил в смачивание поверхности кварца растворами электролита // Коллоидн. журн. — 2000. — Т. 62. — № 2. — С. 278—285. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Артемов Станислав Вячеславович — аспирант,
Паньшин Андрей Михайлович — кандидат технических наук, докторант,
Критская Марина Жиулиевна — кандидат технических наук, доцент,
Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет, skgtu@skgtu.ru)

