

УДК 622.7

ОЦЕНКА СОБИРАТЕЛЬНОЙ СИЛЫ ФЛОТАЦИОННОГО РЕАГЕНТА

С. А. Кондратьев¹, Н.П. Мошкин²

¹*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: kondr@misd.nsc.ru,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия,*

²*Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, E-mail: nikolay.moshkin@gmail.com,
просп. Академика Лаврентьева, 15, 630090, г. Новосибирск, Россия*

Выполнен сопоставительный анализ собирательной активности карбоновых кислот и поверхностного давления их пленок на поверхности воды. Установлено, что между этими параметрами существует корреляция, при этом величина поверхностного давления пленок зависит от длины углеводородного радикала, его насыщенности, разветвленности и наличия заместителей. Численно решена задача по удалению жидкости из прослойки, заключенной между пузырьком и минеральной частицей. Показано, что основная сила, действующая в прослойке на жидкость, обусловлена поверхностным давлением молекул в пленке. Сила флотационного реагента определена как мера его воздействия на объем жидкости в прослойке. Дана зависимость объемного расхода жидкости, вытекающей из прослойки, от поверхностного натяжения активных на границе раздела “газ–жидкость” форм реагента. Предложен метод оценки собирательной активности физически закрепившегося реагента по величине силы, оказываемой пленкой реагента на жидкость в прослойке.

Флотация, флотационная активность реагента, поверхностное натяжение, прослойка жидкости, уравнения теории смазки, физическая форма сорбции

Наиболее надежный выбор селективно действующих реагентов-собирателей основан на сравнении констант равновесия химических реакций с образованием на минеральной поверхности малорастворимых в воде продуктов, констант устойчивости образующихся комплексных соединений. Способ констант равновесия характеризует прочность и селективность закрепления реагента-собирателя на требуемом минерале при образовании химической связи. Для оценки возможности флотации практическое значение имеет величина произведения растворимости в воде соединений, образуемых реагентами с катионами минералов. Наиболее флотационно-активным по отношению к извлекаемому минералу будет тот реагент, продукты взаимодействия которого с катионом минерала имеют минимальное значение произведения растворимости в воде.

Недостаток этого способа определения флотационной активности — принципиальная невозможность оценки собирательных свойств физически сорбируемых форм реагента и, следовательно, реагента в целом, что ограничивает использование предложенного способа без экспериментальной проверки.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 13-05-00384).

Ранее было показано, что физическая форма сорбции реагента позволяет снять кинетическое ограничение, препятствующее образованию флотационного контакта [1, 2]. Под кинетическим ограничением подразумевается прослойка жидкости между минеральной частицей и пузырьком газа. В момент столкновения минеральной частицы с пузырьком происходит локальный прорыв прослойки жидкости, разделяющей объекты взаимодействия. Образуется мениск с наступающим краевым углом. В этот же момент устанавливается контакт границы раздела “газ – жидкость” с поверхностью минерала. Поверхностно-активные ассоциаты карбоновых кислот $(RCOO)_2N^-$, аминов $RNH_3^+ \cdot RNH_2$ или ксантогенатов $(ROCSS)_3O^-$, $Me(ROCSS)_3^-$, сорбированные минералом, переходят на поверхность мениска и вследствие высокой скорости растекания увлекают в свое движение воду, находящуюся в прослойке между объектами взаимодействия. Скорость растекания пленки реагента и отсутствие ее гидрофобного проскальзывания по поверхности воды — факторы, определяющие время удаления воды из прослойки.

Предельные физически сорбируемые аполярные соединения с симметричным строением молекул и дипольным моментом, равным нулю, не являются собирателями, так как не в состоянии установить энергетическое взаимодействие с молекулами воды. Согласно правилу Гаркинса, в этом случае реагент не растекается и не увлекает воду в свое движение. Напротив, непредельные реагенты с асимметричным строением молекул, с дипольным моментом больше нуля и активные на границе “газ – жидкость” ассоциаты в состоянии оказать эффект удаления воды из прослойки. В этом случае наблюдается “прилипание” водной подложки к пленке. За счет уменьшения объема жидкости в прослойке линия смачивания перемещается по минеральной поверхности, а “сухое” пятно, образовавшееся на минеральной поверхности в момент локального прорыва, расширяется до ребер частицы извлекаемого минерала.

Предложенный механизм дает объяснение экстремальной зависимости собирательной активности карбоновых кислот и их мыл от длины углеводородного фрагмента. С увеличением длины углеводородной цепи до 12 – 14 происходит рост поверхностного давления и флотационной активности карбоновых кислот [3, 4]. Снижение флотационной активности реагента с числом атомов углерода в молекуле 14 и более вызвано, согласно предложенному механизму, уменьшением поверхностного давления в пленке реагента и объясняется увеличением когезии молекул и малой скоростью растекания монослоя. Слабая флотационная активность кислот с числом атомов углерода менее 8 объясняется их высокой растворимостью и невозможностью создания пленки. Для флотации таким реагентом требуется высокая его концентрация, при которой достигается начальная стадия мицеллообразования и их выделение на минерале. Длина углеводородного радикала реагента, показавшего экстремальную величину поверхностного давления в пленке, соответствует длине углеводородного фрагмента собирателя, имеющего максимальное значение собирательной способности реагента.

В свою очередь, собирательная активность ненасыщенных карбоновых кислот: олеиновой, линолевой, линоленовой превышает этот показатель насыщенной стеариновой кислоты. Объясняется это высоким поверхностным давлением пленок их ионно-молекулярных ассоциатов на границе раздела “газ – жидкость”, превышающим поверхностное давление стеариновой кислоты [4]. Согласно правилу Хукки и Вартиайнена [5], собирательная сила жирных кислот, применяемых при флотации, увеличивается с увеличением ненасыщенности углеводородных цепей. Эксперимент показал, что в указанной последовательности возрастает и поверхностное давление перечисленных кислот.

Установлено, что в тех случаях, когда заместитель увеличивает кислотные свойства соединения, а сам с водой не взаимодействует (Cl, Br) или взаимодействует слабо (SH), соединение является сильным собирателем. Если заместитель (NH_3 , SO_3H , OH) увеличивает гидрофильность соединения, реагент обладает большей растворимостью и меньшим поверхностным дав-

лением, соединение является слабым собирателем. Изменение флотационной силы реагента при использовании различных заместителей также объясняет предложенный в [1] механизм действия физической формы сорбции. Введение заместителей (Cl, Br) приведет к увеличению поверхностного давления в пленке реагента на границе раздела “газ – жидкость”. Скорость истечения единичного объема жидкости из прослойки в единицу времени увеличится, а кинетическое ограничение образованию флотационного контакта устраняется за более короткий интервал времени. Заместители (NH_3 , SO_3H , OH) увеличивают растворимость реагента и уменьшают поверхностное давление в пленке молекул на границе “газ – жидкость”, что приводит к уменьшению его собирательных свойств. Различная структура радикала, приводящая к различным значениям поверхностного давления пленки реагента на границе “газ – жидкость”, является причиной разных значений C_n , при которых достигается максимальная флотационная активность. Зависимость флотационной силы реагента от поверхностного давления его ионно-молекулярных ассоциатов на границе раздела “газ – жидкость” позволяет установить количественную связь молекулярной структуры с флотационной активностью реагента, дать их сравнительную характеристику.

Флотационные свойства разветвленных карбоновых кислот подчиняются установленному механизму. Сравнение кислот состава $\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COOH}$ показывает, что разветвленные кислоты отличаются большей флотационной активностью, но значительно меньшей избирательностью [6]. Высокая флотационная активность и снижение качества концентрата объясняются большим поверхностным давлением их пленок. Содержание P_2O_5 в концентрате в случае применения наиболее селективно работающей 2-октилдекановой кислоты уступает качеству концентрата при использовании олеиновой кислоты при одинаковом извлечении в 90 %. Причины снижения качества концентрата при увеличении собирательных свойств разветвленных кислот разъясняются в [1, 2].

Пены при флотации разветвленными кислотами менее минерализованы, что обусловлено значительным понижением поверхностного натяжения пузырьков после попадания на них первых минеральных частиц. Для последующих частиц механизм действия физической формы сорбции не срабатывает и закрепление их на границе раздела “газ – жидкость” не реализуется.

Проведенный сопоставительный анализ дает возможность предположить, что эффективное удаление жидкости из прослойки выполняет форма реагента-собирателя, обладающая активностью по отношению к границе раздела “газ – жидкость”. Для поиска реагента-собирателя с оптимальными свойствами необходимо установить связь между величиной поверхностного натяжения раствора, насыщенного активными на границе раздела “газ – жидкость” ассоциатами, и силой, оказываемой пленкой на жидкость. Для этого решалась задача удаления жидкости из прослойки растекающимся реагентом. Цель работы — оценка собирательной активности физически сорбируемого реагента-собирателя на основе предложенного механизма и проверка его адекватности известным экспериментальным и практическим данным. Поиск может быть выполнен как для существующих химических соединений, так и неизвестных в настоящее время, что позволит осуществлять целенаправленный синтез новых реагентов.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ ФИЗИЧЕСКИ СОБИРОВАННОГО РЕАГЕНТА-СОБИРАТЕЛЯ В ЭЛЕМЕНТАРНОМ АКТЕ ФЛОТАЦИИ

Рассмотрим течение тонкого слоя вязкой несжимаемой жидкости (прослойки), находящейся на твердой непроницаемой поверхности. Течение вызвано нанесением локализованного пятна поверхностно-активного вещества (ПАВ) на поверхность прослойки. Пятно ПАВ на поверхности прослойки является причиной возникновения градиента поверхностного натяжения. Поверхностные (капиллярные) силы возникают при наличии неоднородности поверхностного натяжения и действуют тангенциально к свободной поверхности жидкости [7]. Вовлекая в дви-

жение поверхность и прилегающие к ней слои жидкости, эти силы генерируют конвективное течение, получившее название конвекции Марангони. Возникающее сдвиговое течение заметно деформирует поверхность. Впереди фронта распространяющегося ПАВ образуется возвышение поверхности (гребень), сопровождаемое соответствующим уменьшением толщины слоя за растекающимся фронтом [8].

Тонкий слой вязкой несжимаемой жидкости ограничен снизу твердой поверхностью $z = 0$, сверху — свободной границей $z = H(r, t)$. Для описания осесимметричного течения используются уравнения Навье – Стокса в цилиндрической системе координат (r, θ, z) [9]:

$$\rho \left(\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) - \frac{v_r}{r^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} \right], \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} - \rho q + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} \right], \quad (2)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial r v_r}{\partial r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0, \quad (3)$$

где μ — коэффициент кинематической вязкости; ρ — плотность жидкости; p — давление; q — гравитационное ускорение, направленное в отрицательном направлении оси z ; вектор скорости имеет компоненты $(v_r, 0, v_z)$.

В предположении, что отношение характерного вертикального размера (толщины слоя жидкости в начальный момент H_0) к характерному горизонтальному размеру (например, начальный радиус пятна ПАВ R_0) значительно меньше единицы, уравнения (1)–(3) существенно упрощаются и принимают вид так называемых уравнений теории смазки. Теория смазки широко используется в моделировании течений в тонких пленках и позволяет при помощи рационального асимптотического подхода упростить уравнения Навье – Стокса до более разрешимых, но и сильно нелинейных уравнений в частных производных, которые все же сохраняют основную физику задачи. Метод смазки весьма распространен в теоретических работах и в численном моделировании течений, возникающих в тонких пленках [10]. Достаточно подробный вывод уравнений теории смазки содержится во многих монографиях и публикациях, например в [11]. В рассматриваемой модели ПАВ может диффундировать вдоль свободной поверхности с постоянной скоростью диффузии D_s и распространяться за счет конвекции вдоль указанной поверхности. Опуская вывод, приведем уравнения теории смазки в безразмерном виде:

$$h_t + \frac{1}{r} \left(\frac{1}{2} r h^2 \sigma_r \right)_r = \beta \frac{1}{r} \left(\frac{1}{3} r h^3 h_r \right)_r - k \frac{1}{r} \left(\frac{1}{3} r h^3 \left(h_{rr} + \frac{1}{r} h_r \right) \right)_r, \quad (4)$$

$$\Gamma_t = \frac{1}{r} (r h \Gamma \sigma_r)_r = \beta \frac{1}{r} \left(\frac{1}{2} r h^2 \Gamma h_r \right)_r - k \frac{1}{r} \left(\frac{1}{2} r h^2 \Gamma \left(h_{rr} + \frac{1}{r} h_r \right) \right)_r + \delta \frac{1}{r} (r \Gamma_r)_r, \quad (5)$$

где $\beta = \frac{\rho H_0^2 q}{S}$, $k = \frac{H_0^2 \sigma_m}{R_0^2 S}$, $\delta = \frac{\mu D_s}{S H_0}$.

В уравнении (4) $h(r, t)$ — толщина пленки, отнесенная к начальной толщине слоя H_0 . Нижние индексы обозначают дифференцирование по соответствующей переменной. Уравнение (4) получено из уравнений Навье – Стокса в предположении, что $H_0 / R_0 \rightarrow 0$. Уравнение (5), связанное с поверхностно-активными веществами, учитывает перенос ПАВ на межфазной поверхности, $\Gamma(r, t)$ представляет поверхностную концентрацию ПАВ. Зависимость поверхностного натяжения от концентрации $\sigma(\Gamma)$ определяет уравнение состояния, которое задается в

явном виде. При моделировании учтены следующие физические параметры: σ_0 , σ_m — поверхностные натяжения чистой жидкости и жидкости с добавлением ПАВ, H_0 , R_0 , $S = \sigma_0 - \sigma_m$. Время приведено к безразмерному с использованием масштабов:

$$r' = R_0 r, \quad z' = H_0 z, \quad \sigma' = \sigma_m + S\sigma,$$

$$v'_r = U v_r = \frac{SH_0}{\mu R_0} v_r, \quad v'_z = \frac{H_0 U}{R_0} v_z, \quad t' = \frac{\mu R_0^2}{SH_0} t, \quad \Gamma' = \Gamma_m \Gamma, \quad p' = \frac{S}{H_0} p.$$

Система уравнений (4), (5) решается численно с соответствующими начальными и граничными условиями:

- на твердой поверхности выполнены граничные условия прилипания и непротекания;
- на свободной поверхности выполнены кинематическое условие и условие на скачок нормального напряжения;
- при $r = 0$ $h(r, t)$, $\Gamma(r, t)$ — четные функции, следовательно, нечетные производные нулевые:

$$h_r(0, t) = \Gamma_r(0, t) = 0, \quad k h_{rrr}(0, t) = 0; \quad (6)$$

- при $r \rightarrow \infty$ свободная поверхность невозмущена, концентрация ПАВ нулевая:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} h(r, t) = 1, \quad \lim_{n \rightarrow \infty} \Gamma(r, t) = 0; \quad (7)$$

- начальные данные предполагают равномерную толщину пленки и постоянную концентрацию в круглом пятне радиусом $r = 1$:

$$h(r, 0) = 1, \quad \Gamma(r, 0) = \begin{cases} 1 - r^{10}, & r \leq 1, \\ 0, & r > 1. \end{cases} \quad (8)$$

Также рассматривались другие формы задания начальных данных (аналогичные предложенным в работе [12]).

ЗАВИСИМОСТЬ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ ПАВ

Чаще всего рассматривается линейная зависимость поверхностного натяжения от концентрации

$$\sigma(\Gamma) = 1 - m\Gamma. \quad (9)$$

Это уравнение, удобное при изучении задачи аналитически, использовано в нескольких экспериментальных работах [13, 14]. В [15] использовано уравнение состояния

$$\sigma(\Gamma) = (1 - \eta\Gamma)^{-3}, \quad \eta = 1.08, \quad (10)$$

которое применено в настоящей работе.

СХЕМА ЧИСЛЕННОГО АЛГОРИТМА

Решение задачи ищется в области $0 < r < L$. Условия на бесконечности задаются при $r = L$ в предположении, что возмущения не успевают достигнуть правой границы.

Используется равномерная сетка $\Omega_h = \left\{ r_i = (i - 0.5)\Delta r, i = 1, \dots, N; \Delta r = \frac{L}{N} \right\}$, $h_i^n = h(r_i, n \cdot \Delta t)$,

где шаг по времени Δt выбирается из условий устойчивости.

Конечно-разностная схема записана для консервативной формы уравнений (4), (5):

$$h_i^{n+1} = h_i^n - \frac{\Delta t}{r_i \Delta r} \left\{ \frac{1}{2} (F_{i+1/2}^{(1)} - F_{i-1/2}^{(1)}) - \frac{1}{3} \beta (F_{i+1/2}^{(2)} - F_{i-1/2}^{(2)}) + \frac{1}{3} k (F_{i+1/2}^{(3)} - F_{i-1/2}^{(3)}) \right\}, \quad (11)$$

$$G_i^{n+1} = G_i^n - \frac{\Delta t}{r_i \Delta r} \left\{ (G_{i+1/2}^{(1)} - G_{i-1/2}^{(1)}) - \frac{1}{2} \beta (G_{i+1/2}^{(2)} - G_{i-1/2}^{(2)}) + \frac{1}{2} k (G_{i+1/2}^{(3)} - G_{i-1/2}^{(3)}) - \delta (G_{i+1/2}^{(4)} - G_{i-1/2}^{(4)}) \right\}, \quad (12)$$

где приняты следующие обозначения для потоков:

$$F^{(1)} = (rh^2 \sigma_r), \quad F^{(2)} = (rh^3 r_r), \quad F^{(3)} = \left(rh^3 \left(h_{rr} + \frac{1}{r} h_r \right) \right)_r,$$

$$G^{(1)} = (rh \sigma_r \Gamma), \quad G^{(2)} = (rh^2 h_r \Gamma), \quad G^{(3)} = \left(rh^2 \Gamma \left(h_{rr} + \frac{1}{r} h_r \right) \right)_r, \quad G^{(4)} = (r \Gamma_r).$$

Потоки аппроксимируются явно с учетом направления конвективной скорости:

$$F_{i+1/2}^{(1)} = r_{i+1/2} h_{i+1/2}^2 \sigma'(\Gamma_{i+1/2}) \frac{\Gamma_{i+1} - \Gamma_i}{\Delta r}, \quad F_{i+1/2}^{(2)} = r_{i+1/2} h_{i+1/2}^3 \frac{h_{i+1} - h_i}{\Delta r},$$

$$F_{i+1/2}^{(3)} = r_{i+1/2} h_{i+1/2}^3 \frac{E_{i+2} - E_i}{\Delta r}, \quad E_{i+2} = \frac{h_{i+3} - 2h_{i+2} + h_{i+1}}{\Delta r} + \frac{1}{r_{i+3/2}} \frac{h_{i+2} - h_{i+1}}{\Delta r},$$

$$G_{i+1/2}^{(1)} = r_{i+1/2} h_{i+1/2} \Gamma_{i+1/2} \sigma'(\Gamma_{i+1/2}) \frac{\Gamma_{i+1} - \Gamma_i}{\Delta r}, \quad G_{i+1/2}^{(2)} = r_{i+1/2} h_{i+1/2}^2 \Gamma_{i+1/2} \frac{h_{i+1} - h_i}{\Delta r},$$

$$G_{i+1/2}^{(3)} = r_{i+1/2} h_{i+1/2}^2 \Gamma_{i+1/2} \frac{E_{i+2} - E_i}{\Delta r}, \quad G_{i+1/2}^{(4)} = r_{i+1/2} \frac{\Gamma_{i+1} - \Gamma_i}{\Delta r},$$

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Расчеты проводились для следующих значений параметров: $\mu = 1.052 \cdot 10^{-3}$ Па·с, $\rho = 10^3$ кг/м³, $g = 10.0$ м/с², $D_S = 10^{-8}$ м²/с, $\sigma_w = 72.7 \cdot 10^{-3}$ Н/м, $\sigma_m = 63.9 \cdot 10^{-3}$ Н/м.

На рис. 1 приведены форма поверхности пленки $h(r, t)$, концентрация ПАВ $\Gamma(r, t)$ и объемный расход как функции радиального расстояния на момент времени $t = 1.9785 \cdot 10^{-6}$ с.

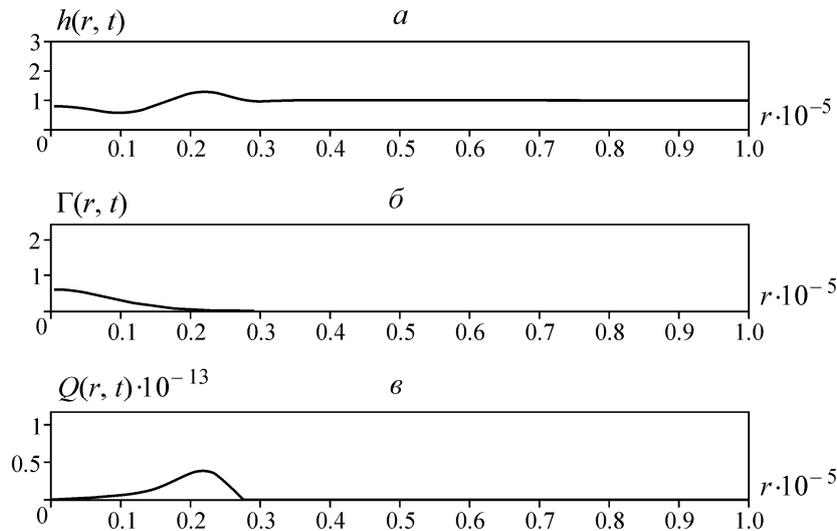


Рис. 1 Результаты расчета истечения жидкости из прослойки для линоленовой кислоты: *a* — форма свободной поверхности; *б* — концентрация реагента; *в* — расход жидкости как функции радиальной координаты в момент времени $t = 1.9785 \cdot 10^{-6}$ с; $\sigma_m = 63.9 \cdot 10^{-3}$ Н/м

Зависимость поверхностного натяжения от концентрации задана уравнением (10). Толщина слоя отнесена к начальной толщине пленки $H_0 = 4.0 \cdot 10^{-8}$ м. Значения безразмерных параметров: $\beta = 1.8182 \cdot 10^{-9}$, $k = 0.01162$, $\delta = 2.9886 \cdot 10^{-2}$. Размерные значения минимальной толщины пленки $h_{\min} = 2.2517 \cdot 10^{-8}$, максимального объемного расхода $Q_{\max} = 5.3051 \cdot 10^{-14}$ (вычисляется по формуле: $Q = 2\pi r \int_0^H v_r dz$). Начальный радиус ПАВ $R_0 = 10^{-6}$ м.

На рис. 2 представлена зависимость изменения силы $F = (Q_{\max} r_m) / t_m$ от $S = \sigma_w - \sigma_m$. Здесь $r_m = 2$ — значение радиальной координаты, при которой достигается максимальное значение расхода Q_{\max} ; t_m — момент времени, соответствующий значению, когда Q_{\max} достигается при $r_m = 2$.

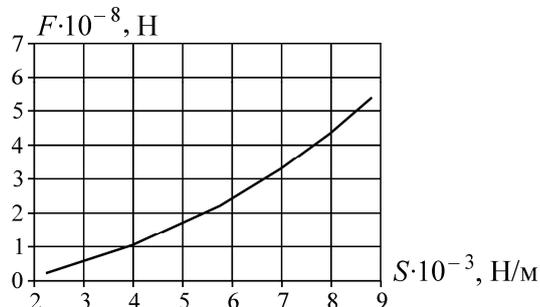


Рис. 2. Зависимость силы флотационного реагента от давления растекания

В таблице приведены значения F , Q_{\max} , t_m для олеиновой, линолевой и линоленовой кислот.

Давление растекания, сила флотационного реагента F и максимальный расход жидкости при $r = 0.2 \cdot 10^{-5}$ м для ряда ненасыщенных карбоновых кислот

Параметр	Кислота		
	олеиновая	линолевая	линоленовая
S , мН/м	6.9	7.9	8.8
F , Н	$3.2438 \cdot 10^{-8}$	$4.2896 \cdot 10^{-8}$	$5.3628 \cdot 10^{-8}$
Q_{\max} , м ³ /с	$4.0166 \cdot 10^{-14}$	$4.6898 \cdot 10^{-14}$	$5.3051 \cdot 10^{-14}$
t_m , с	$2.4765 \cdot 10^{-6}$	$2.1866 \cdot 10^{-6}$	$1.9785 \cdot 10^{-6}$

Поверхностное давление $S = \sigma_0 - \sigma_m$ указанных кислот различается незначительно и составляет соответственно 6.9, 7.9, 8.8 мН/м при площади 40 \AA^2 , занимаемой одной молекулой на свободной поверхности. Силы, действующие на жидкость в прослойке пленками перечисленных реагентов, равны соответственно $3.2438 \cdot 10^{-8}$, $4.2896 \cdot 10^{-8}$, $5.3628 \cdot 10^{-8}$ Н. Полученные значения согласуются с правилом Хукки и Вартиайнена.

Хорошо известна температурная зависимость собирательной активности карбоновых кислот. Рассмотрим изменение расхода жидкости и флотационной силы, обусловленных попаданием пентадекановой кислоты на границу раздела “газ – жидкость”, в зависимости от температуры. В [3] приводятся экспериментальные данные поверхностного давления кислоты: 2.25, 3.9, 5.8 мН/м при различных значениях температуры: 25.8, 30.0, 35.2 ° соответственно и площади 40 \AA^2 , занимаемой одной молекулой на свободной поверхности. Результаты расчетов показывают, что с повышением температуры флотационная сила растет: $2.0578 \cdot 10^{-9}$, $1.0096 \cdot 10^{-8}$, $2.2693 \cdot 10^{-8}$ соответственно, что согласуется с экспериментальными данными. Одновременно установлено, что флотационная сила пентадекановой кислоты меньше собирательной силы олеиновой кислоты.

ВЫВОДЫ

Результаты сопоставительного анализа показали, что собирательная активность карбоновых кислот коррелирует с величиной поверхностного давления их пленок на поверхности воды.

В предположении, что основным ограничением, препятствующим образованию флотационного контакта, является прослойка жидкости, заключенная между минеральной частицей и пузырьком газа, предложен метод количественной оценки собирательной способности флотационного реагента по величине силы, оказываемой пленкой реагента на жидкость.

Последовательность изменения сил, оказываемых пленками карбоновых кислот (олеиновой, линолевой, линоленовой) на жидкость в прослойке, находится в качественном согласии с последовательностью изменения их флотационной активности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кондратьев С. А.** Оценка флотационной активности реагентов-собирателей // Обогащение руд. — 2010. — № 4.
2. **Кондратьев С. А.** Оценка активности и селективности действия карбоновых кислот, используемых в качестве флотационных реагентов // ФТПРПИ. — 2012. — № 6.
3. **Поверхностно-активные вещества:** справочник / под. ред. А. А. Абрамзона, Г. М. Гаевого. — Л.: Химия, 1979.
4. **Smith T.** Monolayers on water. I. Theoretical equation for the liquid expanded state, Journal of colloid and interface science, 1967, Vol. 23.
5. **Hukki R. T., Vartiainen O.** An investigation of the collecting effects of fatty acids in tall oil on oxide minerals, particularly on ilmenite, Mining Engng., 1953, Vol. 5, No. 7.
6. **Алейников Н. А., Никишин Г. И., Огибин Ю. П., Петров А. Д.** Флотационные свойства разветвленных карбоновых кислот // Журн. прикл. химии. — 1962. — Т. 35. — № 9.
7. **Левич В. Г.** Физико-химическая гидродинамика. — 2-е изд. — М.: ГИФМЛ, 1959. [Translated into english: Levich V.G., Physicochemical hydrodynamics (Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1962)].
8. **Зуев А. Л., Костарев К. Г.** Особенности концентрационно-капиллярной конвекции // Успехи физ. наук. — 2008. — Т. 178. — № 10.
9. **Лойцянский Л. Г.** Механика жидкости и газа. — М.: Наука, 1987.
10. **Пухначев В. В.** Задача о равновесии свободной неизотермической пленки жидкости // ПМТФ. — 2007. — Т. 48. — № 3.
11. **Gaver, D. P., Grotberg, J.** The dynamics of a localized surfactant on a thin film, Journal of Fluid Mechanics, 1990, Vol. 213.
12. **Peterson E. R., Shearer M.** Radial spreading of surfactant on a thin liquid film, Appl. Math. Res. Express, 2010, doi:10.1093/amrx/abq015.
13. **Jensen O. E., Grotberg J. B.** The spreading of heat or soluble surfactant along a thin liquid film, Physics of Fluids, 1992, No. 5(1).
14. **Levy R., Shearer M., and Witelski T.** Gravity-driven thin liquid films with insoluble surfactant: Smooth traveling waves. European Journal of Applied Mathematics, 2008, Vol. 18, No. 6.
15. **Borgas M., Grotberg J. B.** Monolayer flow on a thin film, Journal of Fluid Mechanics, 1988, Vol. 193.

Поступила в редакцию 4/XI 2014