

УДК 622.7

**ОЦЕНКА СОБИРАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ
ЛЕГКО ДЕСОРБИРУЕМЫХ ФОРМ КСАНТОГЕНАТОВ**

С. А. Кондратьев¹, Н. П. Мошкин², И. А. Коновалов¹

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. М. А. Лаврентьева, 15, 630090, г. Новосибирск, Россия*

Рассмотрена собирательная способность легко десорбируемых форм (ДС-формы) этилового и бутилового ксантогенатов. Дано *визуальное* доказательство расширения “сухого” пятна на минеральной поверхности при десорбции с нее активных по отношению к границе раздела “газ – жидкость” форм ксантогената. Показано, что ДС-формы реагента, представленные продуктами от взаимодействия ксантогенатов с солями тяжелых металлов, могут оказать эффект удаления жидкости из прослойки, разделяющей минеральную частицу и пузырек газа. Основная сила, действующая в прослойке на жидкость, обусловлена неоднородностью поверхностного натяжения, возникшей в момент локального прорыва, и поверхностным давлением молекул в пленке ДС-форм реагента. Собирательная способность ДС-форм ксантогената определена как мера его воздействия на объем жидкости в прослойке. Дана численная оценка сил, оказываемых на жидкость в прослойке легко десорбируемыми формами этилового и бутилового ксантогенатов. Установлена зависимость объемного расхода жидкости, вытекающей из прослойки, от поверхностного натяжения активных на границе раздела “газ – жидкость: форм реагента. Показано, что собирательная способность реагента зависит от поверхностного натяжения раствора его ДС-форм и определяется структурой углеводородного фрагмента собирателя.

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

В [1] указывается на содержание в пульпе большого числа производных форм ксантогената: ксантогенат-ион, моноиокарбонат-ион, ксантогеновая кислота, диксантогенид. Автор отмечает, что, несмотря на большое число исследований по взаимодействию сульфидных минералов с ксантогенатами, остается неясным, какой продукт ответственен за гидрофобизацию минерала. В ряде работ утверждается, что активные по отношению к границе раздела “газ – жидкость” формы реагента имеют собирательные свойства.

Динамика изменения поверхностного натяжения раствора олеата натрия и извлечение гематита в зависимости от рН исследовались в [2]. Максимальное извлечение минерала и скорость понижения поверхностного натяжения раствора наблюдаются в одной и той же области рН, близкой к нейтральной. В этой же области формируются поверхностно активные по отношению к границе раздела “газ – жидкость” ионно-молекулярные формы реагента $(\text{RCOO})_2\text{H}^-$.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 15-17-10017).

В ряде работ установлено, что существенное влияние на собирательную способность и селективность действия собирателей оказывает их активность по отношению к границе раздела “газ–жидкость”. Корреляция поверхностного давления в пленке реагента на свободной поверхности жидкости и флотированности кварца на примере катионных реагентов экспериментально доказана в [3]. В [4] показано, что комбинация адсорбции ионно-молекулярных ассоциатов $(\text{RNH}_3^+)(\text{RNH}_2)$ аминов на поверхности минералов и высокого поверхностного натяжения “свежих” пузырьков благоприятна для достижения высоких флотационных показателей. Использование пузырьков с пониженным поверхностным натяжением привело к падению показателей флотации минерала. В [5] установлена зависимость собирательной способности аэрофлотов от их динамической активности по отношению к границе раздела “газ–жидкость”. В [6, 7] отмечен факт подавления флотационной активности при использовании длинноцепочечных флотационных реагентов-собирателей. Высокая концентрация длинноцепочечных реагентов приводит к адсорбции их пузырьками и понижению поверхностного натяжения последних. Величина неоднородности поверхностного натяжения после локального прорыва прослойки, разделяющей минеральную частицу и пузырек газа, недостаточна для создания требуемого поверхностного давления растекания. Не растекающийся или плохо растекающийся по поверхности пузырька реагент не в состоянии увлечь и удалить жидкость из прослойки после ее прорыва.

В работах [8, 9] показано, что физическая форма сорбции реагента позволяет снять кинетическое ограничение, препятствующее образованию флотационного контакта. Под кинетическим ограничением подразумевается прослойка жидкости между минеральной частицей и пузырьком газа. В момент столкновения минеральной частицы с пузырьком происходит локальный прорыв прослойки, 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, например карбоновых кислот $(\text{RCOO})_2\text{H}^+$, аминов $(\text{RNH}_3^+)(\text{RNH}_2)$, 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.

Количество собирателя на границе раздела “газ–жидкость” зависит от его поверхностной активности, остаточной концентрации (несорбируемая часть) и возможности перехода на указанную границу раздела предварительно сорбированной минеральной поверхностью части собирателя. Эту часть реагента или продуктов его превращения (для ксантогенатов, например, $\text{Me}(\text{ROCSS})_3^-$) будем рассматривать как десорбируемую форму (ДС-форму). Если для карбоновых кислот, аминов имеются многочисленные примеры, доказывающие зависимость их собирательной способности от активности по отношению к свободной поверхности воды, то для ксантогенатов эта связь не очевидна. Выявление таких активных ДС-форм ксантогенатов позволит усилить селективность флотационного разделения путем их подавления на минералах вмещающих пород и генерации на извлекаемом минерале. С этих позиций представляется интересным исследовать действие собирателей из класса ксантогенатов, широко применяемых при флотации сульфидных руд. Эти реагенты характеризуются незначительной поверхностной активностью по отношению к границе раздела “газ–жидкость”, и поиск их производных форм, активных по отношению к указанной границе и способных оказать эффект удаления жидкости из прослойки, представляется важным, так как позволяет установить общую для собирателей закономерность.

Целью данной работы является:

- поиск активных по отношению к границе раздела “газ–жидкость” ДС-форм ксантогенатов;
- экспериментальное подтверждение предложенного ранее на примере карбоновых кислот механизма действия ДС-форм этилового и бутилового ксантогенатов;
- численное определение собирательной силы ДС-форм ксантогенатов в предположении, что указанная сила реализуется при удалении жидкости из прослойки и расширении “сухого” пятна на минеральной поверхности.

МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Определение скорости растекания по поверхности воды производных форм ксантогенатов осуществлялось на установке, представляющей собой кювету с водой (рис. 1). Кювета устанавливалась под камерой, которая могла записывать видеофайл растекания поверхностно-активных по отношению к границе раздела “газ–жидкость” форм ксантогената. В качестве поверхностно-активных веществ использовались производные от взаимодействия этилового и бутилового ксантогенатов (ГОСТ 7927-75) с сульфатом меди (ГОСТ 4165-78), сульфатом цинка (ГОСТ 4174-77) и нитратом свинца (ГОСТ 4236-77). Растворы готовились в мольном соотношении сульфата меди и ксантогената 1 : 10; 1 : 50; 1 : 100. Концентрация сульфата меди составляла $2.65 \cdot 10^{-4}$, $5.3 \cdot 10^{-5}$, $2.65 \cdot 10^{-5}$ моль/л. Растворы с мольным соотношением 1 : 2 и при избытке меди не применялись ввиду отсутствия их активности по отношению к границе раздела “газ–жидкость”. Съемка выполнялась камерой Casio EXILIM EX-F1 со скоростью 300 кадров в секунду. Приготовленный раствор на кончике иглы переносился на поверхность воды, находящейся в кювете.

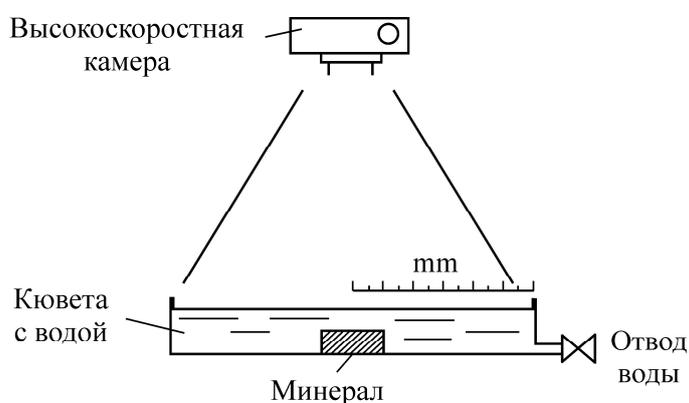


Рис. 1. Установка по определению скорости растекания по поверхности воды продуктов взаимодействия ксантогенатов с солями тяжелых металлов и осушения минеральной поверхности

Влияние ДС-форм реагента на осушение минерала определялось на той же установке. Предварительно поверхность минерала очищалась от окислов, после чего образец на 5–10 мин помещался в воду. Затем минерал на 3 мин помещался в раствор, содержащий бутиловый ксантогенат (5%) и сульфат цинка в молярном соотношении 1 : 50. Далее раствор вытеснялся из кюветы дистиллированной водой, контакт минерала с поверхностью воды при этом исключался. Значение рН воды в кювете изменялось от слабокислой до щелочной (рН 9). Уровень воды в кювете понижался до прорыва слоя жидкости над поверхностью минерала, после чего отвод воды прекращался. Момент прорыва прослойки воды, растекание производных форм ксантогенатов и расширение “сухого” пятна записывались в видеофайл.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Первоначально выполнялся поиск активных по отношению к границе раздела “газ–жидкость” ДС-форм ксантогенатов. Для этого определялась скорость растекания по поверхности воды продуктов взаимодействия солей металлов с этиловым и бутиловым ксантогенатами, ионно-молекулярных ассоциатов. Поверхностно-активные растворы сульфата меди с ксантогенатами готовились в мольном соотношении 1 : 10; 1 : 50; 1 : 100. Перед каждым экспериментом кювета промывалась раствором соды и заполнялась дистиллированной водой.

На рис. 2а приведена скорость движения фронта растекающейся пленки, сформированной производными формами от взаимодействия этилового ксантогената с сульфатом меди, от времени, а на рис. 2б — производных форм бутилового ксантогената и сульфата меди при указанных мольных соотношениях исходных компонентов.

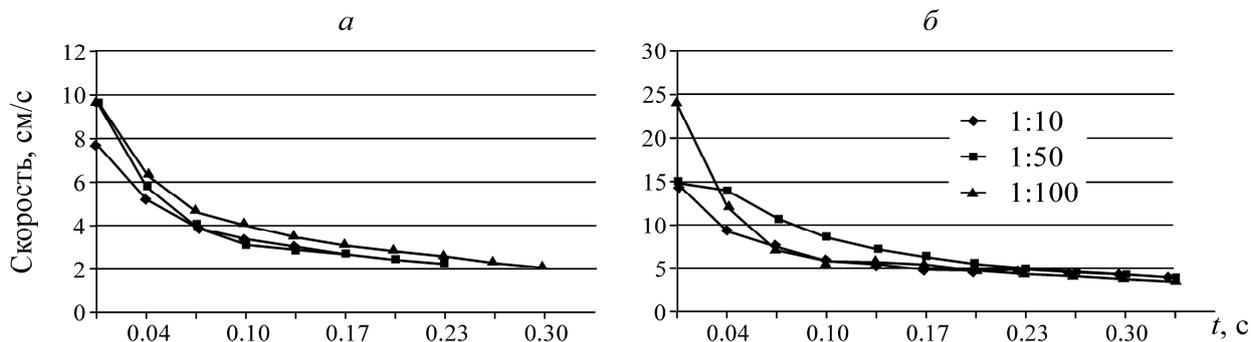


Рис. 2. Скорость растекания производных форм от взаимодействия сульфата меди с этиловым (а) и бутиловым (б) ксантогенатом на поверхности воды в зависимости от времени

Сравнение скоростей растекания производных форм, полученных при смешении сульфата меди с этиловым и бутиловым ксантогенатами, показывает, что продукты реакции последнего имеют большую скорость растекания по поверхности воды (рис. 2а). Следовательно, его активные по отношению к границе раздела “газ–жидкость” ДС-формы могут оказать большее влияние на скорость удаления жидкости из прослойки, что находится в соответствии с практикой флотации. Известно, что бутиловый ксантогенат обладает большей собирательной способностью по сравнению с этиловым.

Выполнены эксперименты по определению скорости растекания производных от взаимодействия бутилового ксантогената с сульфатом цинка, сульфатом меди, нитратом свинца (рис. 3). Из сравнения графиков следует, что скорость растекания определяется в основном длиной углеводородного радикала и не зависит от природы металла.

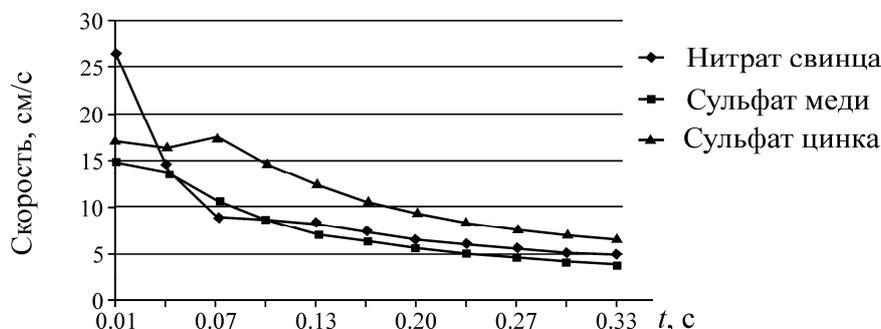


Рис. 3. Скорость растекания производных форм от взаимодействия нитрата свинца, сульфата меди и сульфата цинка с бутиловым ксантогенатом на поверхности воды в зависимости от времени. Мольное соотношение компонентов 1 : 50

Далее выполнено экспериментальное подтверждение предложенного ранее механизма действия ДС-форм реагентов на примере этилового и бутилового ксантогенатов (рис. 4).

Отвод воды из кюветы сопровождался падением ее уровня. В момент локального прорыва прослойки воды над минералом (рис. 4*а*) ДС-формы реагента попадали на границу раздела “газ–жидкость”. Растекание активных форм реагента и увлечение ими в свое движение воды, находящейся в прослойке над минералом, приводило к увеличению площади “сухого” пятна, образовавшегося в момент прорыва на минерале (рис. 4*б–г*) (белые крапинки на поверхности воды — тальк).

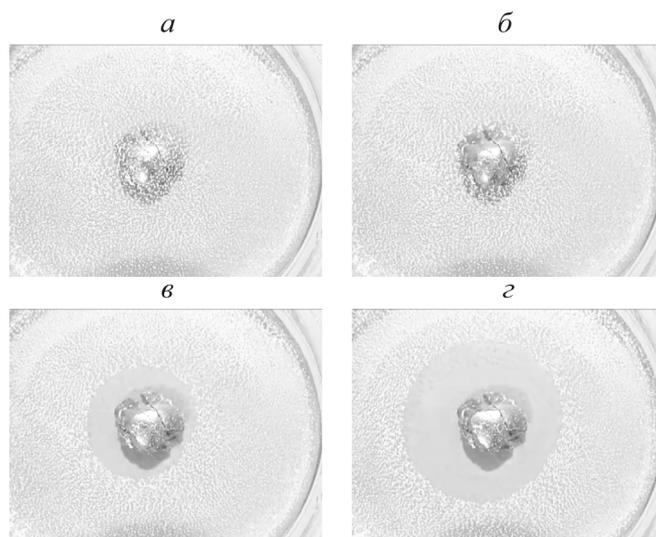


Рис. 4. Стоп-кадры прорыва прослойки и растекания ДС-форм ксантогената: *а* — прорыв прослойки воды над поверхностью минерала; *б, в, г* — растекание ДС-форм реагента и осушение минерала через 0.1, 0.2 и 0.4 с соответственно

На рис. 5 приведены фотографии поведения поверхности воды над минералом, для которого выполнялась операция обработки раствором, содержащим только бутиловый ксантогенат.

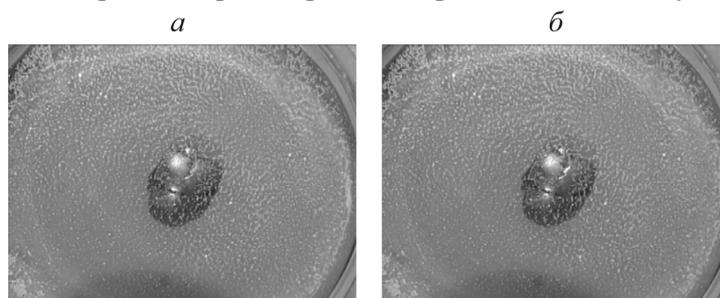


Рис. 5. Стоп-кадры прорыва прослойки. *а* — прорыв прослойки воды над поверхностью минерала; *б* — после прорыва прослойки воды через 0.5 с

После локального прорыва водной прослойки над минералом самопроизвольного расширения “сухого” пятна не наблюдается.

РАЧЕТНАЯ СИЛА ДС-ФОРМ КСАНТОГЕНАТОВ

Под силой ДС-форм реагента будем понимать меру воздействия растекающейся пленки активных форм ксантогенатов на жидкость в прослойке. Для численной оценки силы воспользуемся решением задачи удаления жидкости из прослойки при возникновении градиента поверх-

ностного натяжения [10]. Для этого предположим, что на минеральной поверхности находятся сорбированные ДС-формы ксантогената. После локального прорыва прослойки указанные формы реагента получают доступ к границе раздела “газ – жидкость”, поверхностное натяжение которой практически равно поверхностному натяжению воды (что моделирует поверхность “свежих” пузырьков). При наличии неоднородности поверхностного натяжения возникают поверхностные (капиллярные) силы, действующие тангенциально к свободной поверхности жидкости [11]. Вовлекая в движение поверхность и прилегающие к ней слои жидкости, эти силы генерируют конвективное течение, получившее название конвекции Марангони.

В [10] рассматривалось течение тонкого слоя вязкой несжимаемой жидкости (прослойки), находящейся на твердой непроницаемой поверхности. Указанный слой жидкости (прослойка воды) ограничен снизу твердой поверхностью $z = 0$, сверху — свободной границей $z = H(r, t)$. Для описания осесимметричного течения использовались уравнения Навье – Стокса в цилиндрической системе координат (r, θ, z) [12]:

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

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

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

здесь μ — коэффициент кинематической вязкости; ρ — плотность жидкости; p — давление; q — гравитационное ускорение, вектор ускорения направлен в сторону отрицательных значений 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 (начальный радиус пятна ПАВ R_0) значительно меньше единицы, уравнения (1)–(3) существенно упрощаются и принимают вид так называемых уравнений “тонкого слоя жидкости” (“теории смазки”). Такой подход широко используется при моделировании течений в тонких пленках, он 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 [13]. Достаточно подробный вывод уравнений теории смазки содержится во многих публикациях, например в [14]. В рассматриваемой модели физическая форма сорбции реагента может диффундировать вдоль свободной поверхности с постоянной скоростью диффузии D_s и распространяться за счет конвекции вдоль указанной поверхности. 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 приняты обозначения для безразмерных параметров: $\beta = \rho H_0^2 q / S$, $k = H_0^2 \sigma_m / R_0^2 S$, $\delta = \mu D_s / S H_0$. В уравнении (4) $h(r, t)$ — толщина прослойки, 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 (ДС-форм реагента) 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 — начальная толщина слоя жидкости; R_0 — начальный радиус пятна ПАВ; $S = \sigma_0 - \sigma_m$. Уравнения (4), (5) приведены к безразмерному с использованием масштабов (размерные величины отмечены штрихом):

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

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

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:

$$h_r(0, t) = \Gamma_r(0, t) = 0, \quad kh_{rrr}(0, t) = 0;$$

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

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

- начальные данные предполагают равномерную толщину прослойки воды $h(r, 0) = 1$ и концентрацию ДС-форм реагента в виде круглого диска радиусом $r = 1$, сглаженного по углам:

$$\Gamma(r, 0) = \begin{cases} 1, & r \leq RI, \\ 0.5 \cos \left[\frac{\pi(r - RI)}{(1 - RI)} \right], & RI \leq r \leq 1, \\ 0, & r > 1. \end{cases}$$

Здесь $0 < RI < 1$. Такая форма задания начальных данных предложена в [14].

ЗАВИСИМОСТЬ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ ПАВ

Линейная зависимость поверхностного натяжения от концентрации

$$\sigma(\Gamma) = 1 - m\Gamma$$

является простейшей и часто используется при аналитическом изучении задачи. Линейное уравнение было также принято в нескольких экспериментальных работах [15, 16]. Более реалистичная форма зависимости между поверхностным натяжением и концентрацией ПАВ задается следующим уравнением состояния [14, 17]:

$$\sigma\Gamma = \frac{\eta + 1}{(1 + \theta(\eta)\Gamma)^3} - \eta, \quad \theta(\eta) = \left(\frac{\eta + 1}{\eta} \right)^{\frac{1}{3}} - 1, \quad \eta = \frac{\sigma_m}{S}, \quad (6)$$

которое применено в настоящей работе.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Изучение концентрационной конвекции Марангони связано с достаточно серьезными трудностями. Основная проблема состоит в необходимости контролировать в нестационарном режиме локальные значения поверхностного натяжения слоя жидкости, по которому распространяется ПАВ. Кроме того, не всегда известна достоверная зависимость градиента поверхностного натяжения от концентрации ПАВ. Уравнения Навье – Стокса в приближении теории тонкого слоя недостаточно точно описывают растекание ПАВ в воде. Например, в [18] отмечено, что в ряде экспериментов наблюдалась задержка в развитии конвекции при наличии градиента ПАВ на свободной межфазовой поверхности. По этим причинам большинство экспериментальных исследований и данных численного моделирования носят качественный характер и не дают количественных результатов с достаточной точностью. По-видимому, для получения более точных количественных результатов необходимо применять полные уравнения Навье – Стокса с более детальным учетом дополнительных эффектов.

Расчеты проводились для следующих значений параметров: $\mu = 1.052 \cdot 10^{-3}$ Па·с; $\rho = 10^3$ кг/м³; $q = 10.0$ м/с²; $D_S = 10^{-8}$ м²/с; $\sigma_w = 72.3 \cdot 10^{-3}$ Н/м. Значения σ_m производных форм ксантогената, полученных при смешении сульфата меди с этиловым и бутиловым ксантогенатами, неизвестны. Можно предположить, что они зависят от плотности сорбции ионно-молекулярных ассоциатов (производных форм) ксантогенатов, закрепившихся на минеральной поверхности, длины их углеводородного фрагмента. Ввиду высокой концентрации анионов ксантогената в растворе возможно образование ассоциатов $\text{Me}(\text{ROCSS})_3^-$ [19]. В приближении тонкого слоя получить точные значения σ_m по скорости растекания не представляется возможным. Выбраны приближенные оценки σ_m для указанных продуктов взаимодействия ксантогенатов с солями тяжелых металлов. Приняты следующие значения: $\sigma_m = (25 \div 32) \cdot 10^{-3}$ Н/м для бутилового и $\sigma_m = (30 \div 45) \cdot 10^{-3}$ Н/м для этилового ксантогенатов.

На рис. 6 приведены профиль поверхности прослойки $h(r, t)$, поверхностная концентрация реагента $\Gamma(r, t)$ и объемный расход как функции радиального расстояния на момент времени $t = 5 \cdot 10^{-5}$ с.

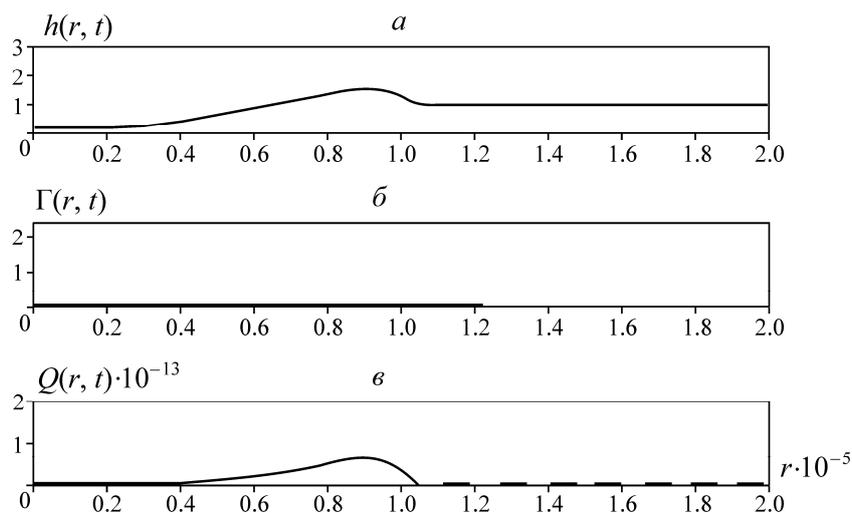


Рис. 6. Результаты расчета истечения жидкости из прослойки, обусловленного растеканием продуктов от взаимодействия ксантогената с сульфатом цинка: *a* — форма свободной поверхности; *b* — концентрация реагента; *v* — расход жидкости как функции радиальной координаты в момент времени $t = 5 \cdot 10^{-5}$ с, $\sigma_m = 32.3 \cdot 10^{-3}$ Н/м

Зависимость поверхностного натяжения от концентрации задана уравнением (6). Толщина слоя отнесена к начальной толщине пленки $H_0 = 4.0 \cdot 10^{-8}$ м. Начальный радиус пятна реагента на границе раздела “газ–жидкость” принят равным $R_0 = 10^{-6}$ м. Значения безразмерных параметров $\beta = 4 \cdot 10^{-9}$, $k = 0.00129$, $\delta = 6.575 \cdot 10^{-3}$. Объемный расход в вертикальном сечении $r = \text{const}$ вычисляется по формуле $Q(r, t) = 2\pi r \int_0^H v_r dz$. Сила ДС-форм, полученных от взаимодействия этилового и бутилового ксантогенатов с сульфатом меди, находится из уравнения $F = \rho Qx/t$. В таблице приведены значения F , соответствующие $Q = Q_{\max}$, $t = t_m$. Здесь $Q_{\max} = \max_{0 < r < r_{\infty}} Q(r, t_m)$ — максимальное значение расхода; $r_m = 0.2 \cdot 10^{-5}$ — значение радиальной координаты при которой достигается максимальное значение расхода; t_m — момент времени, соответствующий достижению Q_{\max} и $r_m = 0.2 \cdot 10^{-5}$ м.

Давление растекания S , сила F ДС-форм, полученных от взаимодействия этилового и бутилового ксантогенатов с сульфатом цинка, максимальный расход жидкости Q_{\max} при $r_m = 0.2 \cdot 10^{-5}$ м (приведены размерные значения)

Параметр	Ксантогенат			
	этиловый		бутиловый	
$S = \sigma_w - \sigma_m$, мН/м	30	35	40	50
F , Н	$4.4930 \cdot 10^{-3}$	$6.2610 \cdot 10^{-3}$	$8.4166 \cdot 10^{-3}$	$1.3145 \cdot 10^{-2}$
Q_{\max} , м ³ /с	$5.4376 \cdot 10^{-13}$	$6.4524 \cdot 10^{-13}$	$7.4984 \cdot 10^{-13}$	$9.5556 \cdot 10^{-13}$
t_m , с	$2.4205 \cdot 10^{-7}$	$2.0612 \cdot 10^{-7}$	$1.7818 \cdot 10^{-7}$	$1.4539 \cdot 10^{-7}$

На рис. 7 приведен график изменения силы $F(t) = \rho \frac{Q_{\max}(r_m, t)r_m}{t}$ в зависимости от времени.

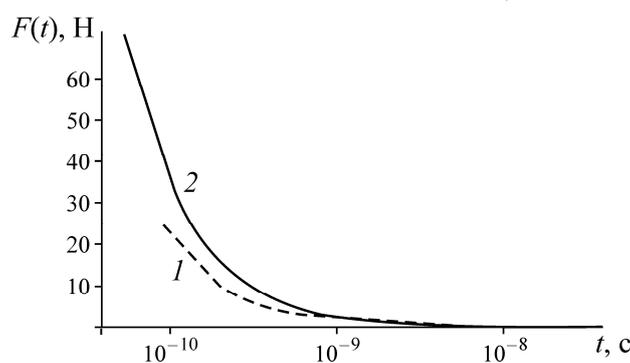


Рис. 7. Изменение со временем силы ДС-форм ксантогенатов для $S = 30$ (1) и $S = 50$ (2)

ВЫВОДЫ

Выполнен поиск активных по отношению к границе раздела “газ–жидкость” и легко десорбируемых с минеральной поверхности химических соединений.

Экспериментально доказано, что продукты взаимодействия ксантогенатов с солями тяжелых металлов оказывают эффект удаления жидкости из прослойки, разделяющей объекты взаимодействия: минеральную частицу и пузырек газа. Установлено, что указанный эффект проявляется в области рН от слабокислой до щелочной.

Собирательная способность ДС-форм ксантогенатов определена как мера их воздействия на объем жидкости в прослойке. Воздействие ДС-форм реагентов на прослойку воды усиливается с увеличением длины углеводородного фрагмента, что соответствует практике флотации ксантогенатами.

Установленная ранее закономерность в работе ДС-форм карбоновых кислот и дитиофосфатов подтверждена на примере ксантогенатов. Показано что основное назначение активных по отношению к границе раздела “газ–жидкость” ДС-форм ксантогенатов — снятие кинетических ограничений формированию флотационного контакта. Указанная закономерность может рассматриваться как шаг в решении задачи по раскрытию связи собирательной способности флотационного реагента и его молекулярной структуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Bulatovic Srdjan M.** Handbook of flotation reagents chemistry, theory and practice: flotation of sulfide ores, Elsevier science & technology books, 2007.
2. **Kulkarni R. D., Somasundaran P.** Kinetics of oleate adsorption at the liquid/air interface and its role in hematite flotation, Symposium series, AIChE, 1975, Vol. 71, No. 150.
3. **Bleier A., Goddard E.D., Kulkarni R. D.** Adsorption and critical flotation conditions, Journal of colloid and Interface Science, 1977, Vol. 59, No. 3.
4. **Finch J. A. Smith G. W.** Dynamic surface tension of alkaline dodecylamine solutions, Journal of Colloid and Interface Science, 1973, Vol. 45, No.1.
5. **Живанков Г. В., Рябой В. И.** Собирательные свойства и поверхностная активность высших аэрофлотов // Обогащение руд. — 1985. — № 3.
6. **Wark E., Wark I.** Influence of micelle formation on flotation, Nature, Vol. 143, 1939.
7. **Классен В. И., Тихонов С. А.** Действие олеата натрия на флотационные свойства поверхности пузырьков воздуха // Цв. металлы. — 1960. — № 10.
8. **Кондратьев С. А.** Оценка флотационной активности реагентов–собирателей // Обогащение руд. — 2010. — № 4.
9. **Кондратьев С. А.** Оценка активности и селективности действия карбоновых кислот, используемых в качестве флотационных реагентов // ФТПРПИ. — 2012. — № 6.
10. **Кондратьев С. А., Мошкин Н. П.** Оценка собирательной силы флотационного реагента // ФТПРПИ. — 2015. — № 1.
11. **Левич В. Г.** Физико-химическая гидродинамика. 2-е изд. — М.: Физматлит, 1959 [English Editions: Levich V. G., Physico-chemical Hydrodynamics, Englewood, New York: Prentice-Hall, Scripta Technica, Inc., 1962].
12. **Лойцянский Л. Г.** Механика жидкости и газа. — М.: Наука, 1987.
13. **Пухначев В. В.** Задача о равновесии свободной неизотермической пленки жидкости // ПМТФ. — 2007. — Т. 4. — № 3.
14. **Gaver D. P., Grotberg J.** The dynamics of a localized surfactant on a thin film, Journal of Fluid Mechanics, 1990, Vol. 213.
15. **Jensen O. E., Grotberg J. B.** The spreading of heat or soluble surfactant along a thin liquid film, Physics of Fluids A Fluid Dynamics 01/1993; 5(1):58-68. DOI: 10.1063/1.858789.
16. **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.
17. **Borgas M., Grotberg J. B.** Monolayer flow on a thin film, Journal of Fluid Mechanics, 1988, Vol. 193.
18. **Бирих Р.В., Мизев А. И., Рудаков Р. Н., Мазунина Е. С.** Концентрационная конвекция, инициируемая затопленным источником ПАВ // Конвективные течения. — 2009. — Вып. 4.
19. **Хан Г. А., Габриелова Л. И., Власова. Н. С.** Флотационные реагенты и их применение. — М.: Недра, 1986.