

УДК 532.6+544.72+547.288.4

ПОВЕРХНОСТНЫЕ СВОЙСТВА РАСТВОРОВ ДИКАТИОННЫХ ИМИДАЗОЛИЕВЫХ ПАВ С КОРОТКИМИ МОСТИКОВЫМИ ФРАГМЕНТАМИ

© 2021 г. А. А. Котенко¹, С. Л. Хилько¹, *

¹Институт физико-органической химии и углехимии им. Л.М. Литвиненко,
ул. Р. Люксембург, 70, Донецк-114, 283114 Украина

*e-mail: sv-hilko@yandex.ru

Поступила в редакцию 22.07.2020 г.

После доработки 07.09.2020 г.

Принята к публикации 25.09.2020 г.

Методами формы висячей капли и осциллирующей капли исследованы поверхностное натяжение и поверхностные дилатационные реологические характеристики водных растворов дикатионных имидазолиевых ПАВ с предельно короткими мостиковыми фрагментами на границе с воздухом. Показана высокая поверхностная активность таких ПАВ. Выявлены высокие значения дилатационного модуля вязкоупругости растворов ПАВ, которые возрастают с уменьшением длины мостикового фрагмента и увеличением длины углеводородных радикалов в молекуле ПАВ.

DOI: 10.31857/S0023291221020051

ВВЕДЕНИЕ

Димерные ПАВ представляют собой соединения, которые состоят из двух гидрофильных головных групп, двух гидрофобных “хвостов” и мостика (спейсера), который ковалентно связывает фрагменты гидрофильных молекул по полярным группам или вблизи этих групп [1–8]. Димерные ПАВ характеризуются свойствами, отличающимися от свойств их мономерных аналогов. Они обладают высокой поверхностной активностью на межфазных границах и низкими значениями критической концентрации мицеллообразования (ККМ), высокой способностью к образованию в растворе структур различной морфологии (сферические, эллипсоидальные, стержневидные и червеобразные мицеллы, а также везикулы спиральной или трубчатой формы), а также эффективной способностью к эмульгированию и солюбилизации [1–9]. Кроме того – это эффективные катализаторы в органической химии (мицеллярный катализ) [10–12], стабилизаторы наночастиц [3], средства доставки лекарственных препаратов и ДНК в клетки организмов [13, 14], а также антимикробные, противогрибковые агенты [15, 16] и ионные жидкости [17, 18]. Свойства димерных ПАВ определяют их экономическую эффективность и экологическую альтернативу мономерным ПАВ.

Свойства димерных ПАВ определяются природой всех составных частей молекул этих соединений. Головная гидрофильная часть может

иметь положительный заряд (дикатионные ПАВ), отрицательный заряд (дианионные ПАВ) или не иметь заряда (неионогенные димерные ПАВ). Гидрофобные радикалы, в основном, представлены неразветвленными насыщенными алкильными цепями. В большинстве случаев димерные ПАВ имеют симметричное строение, но известны примеры и несимметричных димерных ПАВ, молекулы которых имеют гидрофобные цепи разной длины [1–8]. В значительной степени свойства димерных ПАВ определяются природой мостикового фрагмента. Мостик может быть гидрофильным или гидрофобным, жестким или гибким, что решающим образом влияет на свойства водных растворов димерных ПАВ [2, 6, 19].

Большое количество работ посвящено димерным ПАВ с полиметиленовыми мостиковыми фрагментами [1, 6, 8, 9]. При этом основное внимание уделялось влиянию длины спейсера на поверхностное натяжение растворов димерных ПАВ и их агрегационное поведение на примере углеводородных мостиков с числом метиленовых групп больше 4 [6, 20–25]. В работе [6] отмечается, что для димерных аммониевых ПАВ величина ККМ зависит от длины мостикового фрагмента. Так, при увеличении числа метиленовых звеньев от 2 до 6 величина ККМ может несколько увеличиваться, а при дальнейшем росте числа метиленовых звеньев до 10 и более величина ККМ снижается. Это связано с тем, что структура димерных ПАВ может существенно изменяться в

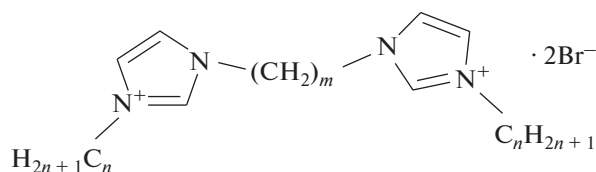


Рис. 1. Общая формула дикаationных имидазольевых ПАВ (дибромиды 1,3-бис(3'-алкилимидазолий-1'-ил)-2-алканов). $n = 10, 12, 14, 16$; $m = 2, 3, 4$.

зависимости от формы мостикового фрагмента. Возможен переход молекулы ПАВ с числом метиленовых групп в мостике 8–10 в форму “шпильки”. Когда число CH_2 -групп в мостиковом фрагменте превышает 10, он начинает сворачиваться так, что его средняя часть погружается внутрь мицеллы и это повышает гидрофобный эффект при мицеллообразовании [26]. В работе [27] оценивалось влияние длины полиметиленового спейсера на форму агрегатов на примере диимидазольевых ПАВ с метильными углеводородными радикалами. Для этих ПАВ отмечены снижение ККМ с увеличением длины спейсера (от 4 до 10 CH_2 -групп) и возможность образования разнообразных агрегатов молекул в мицеллярной фазе.

Форма молекулярных агрегатов димерных ПАВ с предельно короткими жесткими мостиковыми фрагментами и длинными углеводородными радикалами на межфазной границе раствор–воздух не выявлена.

Дилатационным реологическим свойствам поверхности растворов различных димерных ПАВ с разными мостиковыми фрагментами посвящено ограниченное число работ [6, 28–35], а применительно к растворам диимидазольевых ПАВ с предельно короткими полиметиленовыми мостиковыми фрагментами эти свойства вообще не изучены.

Целью работы было исследование поверхностного натяжения водных растворов диимидазольевых ПАВ с углеводородными радикалами разной длины и короткими метиленовыми мостиковыми фрагментами и дилатационных реологических характеристик их поверхностных слоев методами динамической тензиометрии и дилатационной реометрии.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе исследованы свойства межфазных слоев дикаationных имидазольевых ПАВ с алкильными радикалами $\text{C}_n\text{H}_{2n+1}$ ($n = 10–16$) и мостиковыми фрагментами с числом метиленовых групп (m) от 2 до 4.

Вещества были синтезированы по усовершенствованной общей схеме, приведенной в работах [36–38]. Идентификацию и определение степени

чистоты полученных соединений осуществляли методом ^1H ЯМР (спектры записаны на спектрометре Bruker Avance II (9.4 Тл) в D_2O). Общая формула таких ПАВ приведена на рис. 1.

Поверхностное натяжение (γ , мН/м) водных растворов имидазольевых ПАВ при постоянной (фиксированной) концентрации в зависимости от времени жизни поверхности (t , с) измеряли методом формы висячей капли (тензиометр ПАТ-2Р SINTERFACE Technologies, Германия).

Дилатационные реологические характеристики поверхностных слоев растворов имидазольевых солей изучали на тензиометре ПАТ-2Р. В этих экспериментах после достижения адсорбционно-го равновесия в системе $((5–7) \times 10^4$ с с момента формирования капли) осуществляются гармонические осцилляции капли (площадью A , объема V). Принцип работы тензиометра ПАТ-2Р (включая дилатационную реометрию) детально описан в работах [39, 40]. При варьировании частоты осцилляции капли f от 0.005 до 0.5 Гц использовали амплитуду осцилляций 6%. Результаты экспериментов с гармоническими осцилляциями капли анализировали с помощью преобразования Фурье, используя программное обеспечение тензиометра [39, 40]:

$$E(i2\pi f) = E(i\Omega) = A_0[F(\Delta\gamma)/F(\Delta A)],$$

где $E(i2\pi f)$ – дилатационный модуль вязкоупругости, $\Omega = 2\pi f$ – угловая частота осцилляции капли, A_0 – начальная площадь поверхности капли.

Дилатационный модуль E характеризует вязкоупругие свойства поверхностных слоев ПАВ и учитывает все релаксационные процессы, влияющие на поверхностное натяжение.

Модуль E выражается комплексным числом и включает реальную и мнимую компоненты: $E(i\Omega) = E_r + iE_i$ (i – мнимая единица). Реальная часть E_r (модуль упругости) отражает накопление энергии, а мнимая часть E_i – потери энергии в поверхностном слое вследствие релаксационных процессов. Выражения для модуля вязкоупругости E и фазового угла ϕ (характеризует запаздывание изменения поверхностного натяжения при изменении площади поверхности капли) имеют следующий вид [39, 40]:

$$E = [(E_r^2 + (iE_i)^2)]^{1/2}, \quad \phi = \arctg(iE_i/E_r).$$

Растворы ПАВ готовили в очищенной воде (Milli-Q), имеющей поверхностное натяжение 72.0 ± 0.2 мН/м, которое не изменялось во временном интервале до 10^5 с (около 28 ч).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование тензиометрических характеристик включало измерения динамического (γ_d) и

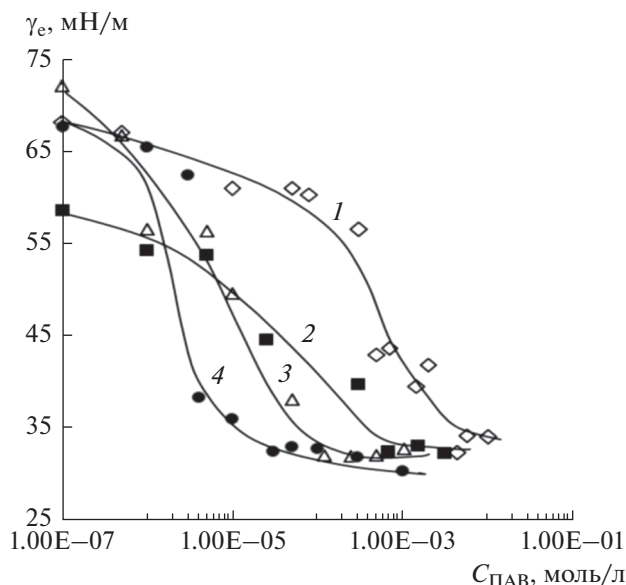


Рис. 2. Зависимости равновесного поверхностного натяжения γ_e от концентрации растворов дикаationных имидазолиевых ПАВ с мостиковым фрагментом с $m = 2$ и различной длиной углеводородного радикала n : 1 – 10, 2 – 12, 3 – 14, 4 – 16.

равновесного (γ_e) поверхностного натяжения растворов дикаationных имидазолиевых ПАВ на границе с воздухом, расчет ККМ и определение величины γ_{\min} по экспериментальным зависимостям $\gamma_e = f(C_{\text{ПАВ}})$. Были рассчитаны величины адсорбции на границе фаз раствор ПАВ–воздух по известному уравнению Гиббса

$$\Gamma = -(d\gamma/d\ln C_{\text{ПАВ}})/nRT,$$

где R – газовая постоянная, T – абсолютная температура, n – количество ионов, образующихся при полной диссоциации молекулы ПАВ в растворе (число Гиббса).

В случае полной диссоциации димерных ПАВ $n = 3$. Однако, как следует из данных, приведенных в работах [6, 33], возможна неполная диссоциация димерных ПАВ и величина n может быть равной 2. Величина n определяется природой поверхностно-активного иона и противоиона, а также концентрацией ПАВ в растворе. При расчете величины Γ в работе было использовано значение $n = 3$.

На рис. 2 приведены зависимости $\gamma_e = f(C_{\text{ПАВ}})$, откуда ожидаемо следует, что чем длиннее углеводородный радикал, тем ниже равновесное поверхностное натяжение растворов ПАВ.

Как следует из рис. 3, изменение размера мостикового фрагмента слабо влияет на величину поверхностного натяжения. В табл. 1 приведены характеристики растворов дикаationных имидазолиевых ПАВ с разной длиной углеводородного

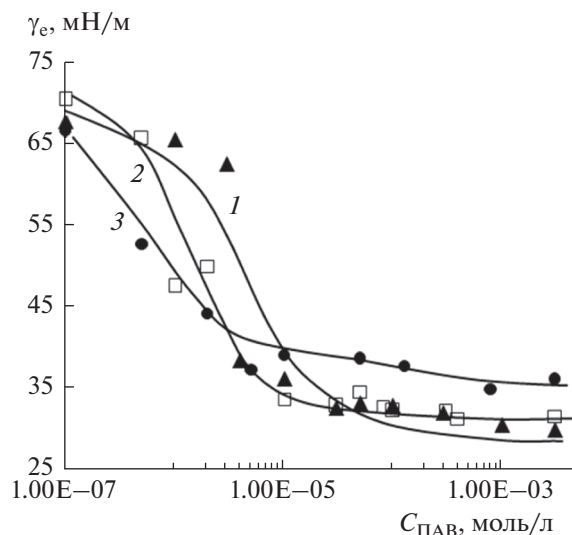


Рис. 3. Зависимости равновесного поверхностного натяжения γ_e от концентрации растворов дикаationных имидазолиевых ПАВ с углеводородными радикалами с $n = 16$ и различной длиной мостикового фрагмента m : 1 – 2, 2 – 3, 3 – 4.

радикала и предельно короткими мостиковыми фрагментами.

Отчетливо прослеживается зависимость ККМ от длины углеводородного радикала ПАВ. Величина ККМ уменьшается примерно на порядок при увеличении длины углеводородного радикала на две CH_2 -группы. Эти результаты согласуются с данными, приведенными в работах [6, 36, 38, 41], где исследованы диимидазолиевые и дипириимидиновые ПАВ с мостиковыми фрагментами разной длины, в том числе пропиленовыми, и различным числом атомов углерода в углеводородном радикале ($n = 8, 10, 12$).

Величины ККМ растворов ПАВ неоднозначно изменяются при увеличении числа метиленовых групп в мостиковом фрагменте от 2 до 4 – они могут немного увеличиваться при изменении длины спейсера (при $n = 10-14$) или оставаться практически неизменными (при $n = 16$). Зависимости минимального поверхностного натяжения (γ_{\min}) и величины адсорбции (Γ_{\max}) от параметров n и m для этих ПАВ не наблюдаются, величины γ_{\min} для всех образцов находятся в диапазоне 32–35 мН/м, а величины Γ_{\max} – в диапазоне $(0.39-0.64) \times 10^{-6}$ моль/м². Для ПАВ с $n = 16$ и $m = 2$ величина $\Gamma_{\max} = 0.91 \times 10^{-6}$ моль/м², а значение γ_{\min} несколько ниже, чем для других ПАВ, $\gamma_{\min} = 30$ мН/м.

Для получения дополнительной информации об особенностях формирования адсорбционного слоя ПАВ на границе раствор–воздух, наряду с тензиометрией, широко используется метод ди-

Таблица 1. Характеристики растворов дикатионных имидазолиевых ПАВ общей формулы $[C_nH_{2n+1} \cdot Im^+(CH_2)_m Im^+ C_nH_{2n+1}] \cdot 2Br^-$ с разным числом атомов С в углеводородных радикалах (n) и в мостиковом фрагменте (m), Im^+ – катион имидазолия

№ п/п	ПАВ	ККМ, моль/л	γ_{min} , мН/м	Γ_{max} , моль/м ²	E_{max} , мН/м
1	$n = 10, m = 2$	3.8×10^{-3}	32	0.42×10^{-6}	24
2	$n = 10, m = 3$	5.4×10^{-3}	33	0.39×10^{-6}	22
3	$n = 10, m = 4$	5.1×10^{-3}	33	0.52×10^{-6}	20
4	$n = 12, m = 2$	3.9×10^{-4}	32	0.52×10^{-6}	68
5	$n = 12, m = 3$	5.0×10^{-4}	33	0.41×10^{-6}	55
6	$n = 12, m = 4$	5.2×10^{-4}	33	0.47×10^{-6}	45
7	$n = 14, m = 2$	5.2×10^{-5}	32	0.49×10^{-6}	79
8	$n = 14, m = 3$	5.1×10^{-5}	35	0.49×10^{-6}	76
9	$n = 14, m = 4$	5.6×10^{-5}	35	0.64×10^{-6}	46
10	$n = 16, m = 2$	3.5×10^{-6}	30	0.91×10^{-6}	128
11	$n = 16, m = 3$	3.2×10^{-6}	32	0.49×10^{-6}	105
12	$n = 16, m = 4$	3.5×10^{-6}	35	0.49×10^{-6}	89

латационной реологии, который более чувствителен к взаимодействиям между адсорбированными молекулами. Информация о динамических процессах адсорбции/десорбции на межфазных границах, полученная методом дилатационной реологии, позволяет судить о структурных особенностях адсорбционных слоев [42, 43]. Кроме того, дилатационные реологические характеристики позволяют прогнозировать свойства дис-

персных систем, например, стабильность эмульсий и пен [44–46].

Согласно данным, приведенным на рис. 4, величины модулей вязкоупругости, E , и упругости, E_r , возрастают при увеличении частоты осцилляции капли. Модуль E_i незначительно возрастает, а величина фазового угла (ϕ) уменьшается с ростом частоты осцилляции капли для всех ПАВ, при этом величины E_i и ϕ находятся в диапазоне меньше 20–30 ед. Близкие значения параметров E и E_r и низкие значения величин E_i и ϕ характеризуют адсорбционные слои этих ПАВ как упругие.

На рис. 5 приведены зависимости модулей вязкоупругости и упругости от частоты осцилляции капли для дикатионных имидазолиевых ПАВ при различной длине мостикового фрагмента и постоянном размере углеводородного радикала ($n = 16$) и выбранной концентрации раствора ПАВ ($C_{ПАВ} = 10^{-5}$ моль/л). Рост частоты осцилляции приводит к увеличению значений E и E_r . Прослеживается отчетливая зависимость реологических параметров от числа метиленовых групп в мостиковом фрагменте. Для дикатионного ПАВ с $m = 2$ при частоте осцилляции капли $f = 0.5$ Гц модули E и E_r достигают максимальных значений, 128 и 126 мН/м соответственно. Величины модулей E и E_r для ПАВ с $m = 4$ при увеличении частоты осцилляции капли изменяются незначительно, а для ПАВ с $m = 3$ зависимости E и E_r от f занимают промежуточное положение между соответствующими зависимостями для ПАВ с $m = 4$ и $m = 2$.

Характер зависимостей модуля вязкоупругости от концентрации ПАВ с разными углеводо-

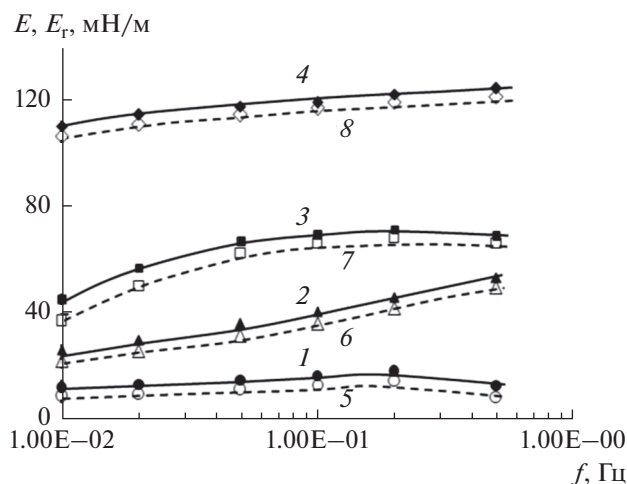


Рис. 4. Зависимости модуля вязкоупругости E (1–4) и его реальной компоненты E_r (5–8) от частоты осцилляции капель растворов дикатионных имидазолиевых ПАВ с постоянным размером мостикового фрагмента ($m = 2$) и различной длиной углеводородного радикала n : 1, 5 – 10, 2, 6 – 12, 3, 7 – 14, 4, 8 – 16. $C_{ПАВ} = 10^{-5}$ моль/л.

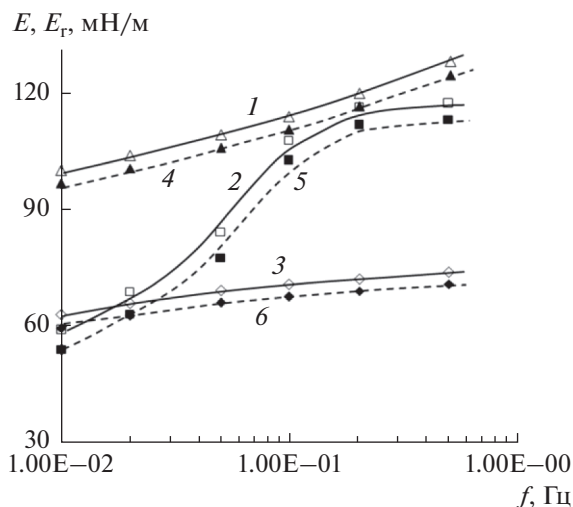


Рис. 5. Зависимости модуля вязкоупругости E (1–3) и его реальной компоненты E_r (4–6) от частоты осцилляции капель растворов дикатионных имидазолиевых ПАВ с постоянным размером углеводородного радикала ($n = 16$) и различной длиной мостикового фрагмента m : 1, 4 – 2, 2, 5 – 3, 3, 6 – 4. $C_{\text{ПАВ}} = 10^{-5}$ моль/л.

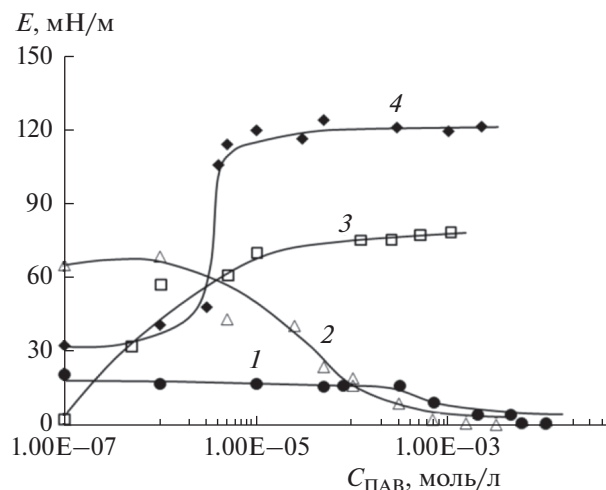


Рис. 6. Зависимости модуля вязкоупругости E при $f = 0.1$ Гц от концентрации растворов дикатионных имидазолиевых ПАВ с постоянным размером мостикового фрагмента ($m = 2$) и различной длиной углеводородного радикала n : 1 – 10, 2 – 12, 3 – 14, 4 – 16.

родными радикалами и постоянной длиной мостикового фрагмента ($m = 2$) существенно различается (рис. 6). Зависимости $E = f(C_{\text{ПАВ}})$ для ПАВ с $n = 10$ и 12 являются убывающими функциями, тогда как для ПАВ с $n = 14$ и 16 – это возрастающие функции.

Согласно данным, приведенным на рис. 7, уменьшение количества метиленовых групп в мостиговом фрагменте дикатионных имидазолиевых ПАВ от 4 до 2 при постоянной длине углеводородного радикала ($n = 16$) приводит к заметному росту значений модуля вязкоупругости.

Такие различия в реологических свойствах дикатионных ПАВ с короткими мостиками могут быть связаны с разным влиянием обменных процессов между поверхностным слоем и объемом раствора.

Сопоставление реологических характеристик растворов дикатионных ПАВ с разной длиной углеводородного радикала ($n = 12-16$) и пропиленовыми мостиками показало, что в случае, если мостиговые фрагменты модифицированы оксимной группой, то модуль вязкоупругости адсорбционных слоев таких ПАВ выше, чем для ПАВ с немодифицированными спейсерами (рис. 8).

Сравнение данных, приведенных на рис. 8 и в табл. 1 и 2 для растворов ПАВ с разной длиной углеводородного радикала и мостиковыми фрагментами, модифицированными оксимной группой ($m = 3$), показало, что для них значения модуля вязкоупругости ближе к значениям для ПАВ с этиленовыми мостиками, чем к значениям для ПАВ с пропиленовыми мостиками.

В работах [47–49] было отмечено, что сравнительно небольшие изменения в строении молекул имидазолиевых солей могут оказывать существенное влияние на свойства их агрегатов в растворах и поведение таких ПАВ на границе фаз. Влияние гибридизации атома углерода в составе мостикового фрагмента на строение и свойства дикатионных имидазолиевых солей в растворах было отмечено в работах [1, 19]. В молекулах дикатионных оксимов присутствуют sp^2 - и sp^3 -гибридизованные атомы уг-

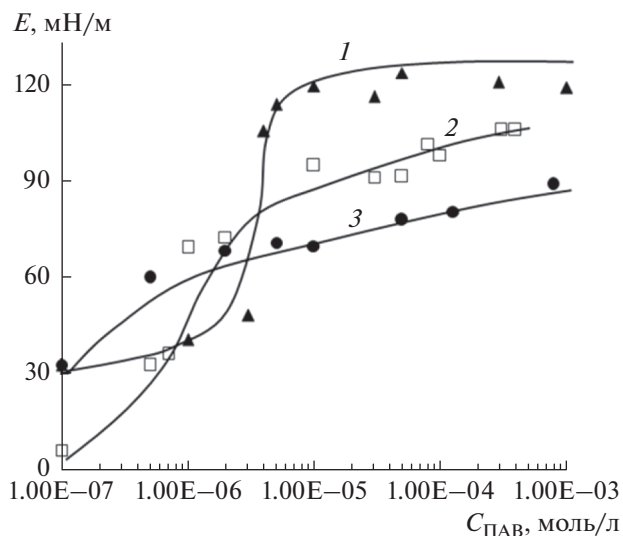


Рис. 7. Зависимости модуля вязкоупругости E при $f = 0.1$ Гц от концентрации растворов дикатионных имидазолиевых ПАВ с постоянным размером углеводородного радикала ($n = 16$) и различной длиной мостикового фрагмента m : 1 – 2, 2 – 3, 3 – 4.

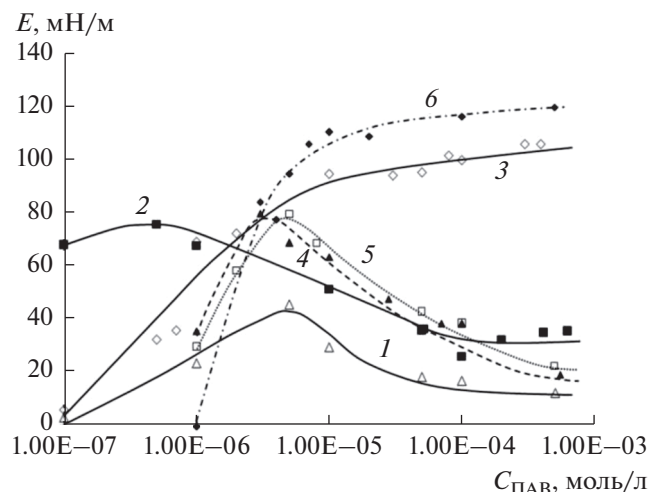


Рис. 8. Зависимости модуля вязкоупругости E при $f = 0.1$ Гц от концентрации растворов дикаатионных имидазолиевых ПАВ с постоянным размером мостикового фрагмента ($m = 3$) и различной длиной углеводородного радикала n : 1, 4 – 12, 2, 5 – 14, 3, 6 – 16; 1–3 – ПАВ с метиленовыми мостиковыми фрагментами, 4–6 – ПАВ с оксимными мостиковыми фрагментами.

лерода, что придает мостиковым фрагментам дополнительную жесткость, возможность образования внутримолекулярной водородной связи и, в силу этого, вероятно, уменьшения его длины по сравнению с немодифицированным пропиленовым мостиком.

Таблица 2. Экспериментальные значения максимального модуля вязкоупругости (E_{\max} при $f = 0.1$ Гц) для некоторых димерных ПАВ

№ п/п	ПАВ	E_{\max} , мН/м
1	$[C_{16}H_{33}Im^+CH_2(C=N-OH)CH_2Im^+C_{16}H_{33}] \cdot 2Cl^-$ 1,3-бис(3'-цетилимидазолий-1'-ил)-2-оксиминопропана дихлорид, $n = 16, m = 3$ [28]	120
2	$[C_{14}H_{29}Im^+CH_2(C=N-OH)CH_2Im^+C_{14}H_{29}] \cdot 2Cl^-$ 1,3-бис(3'-тетрадецилимидазолий-1'-ил)-2-оксиминопропана дихлорид, $n = 14, m = 3$	85
3	$[C_{12}H_{25}Im^+CH_2(C=N-OH)CH_2Im^+C_{12}H_{25}] \cdot 2Cl^-$ 1,3-бис(3'-додецилимидазолий-1'-ил)-2-оксиминопропана дихлорид, $n = 12, m = 3$	80
4	$[C_{12}H_{25}(CH_3)_3N^+(CH_2)_2N^+(CH_3)_3C_{12}H_{25}] \cdot 2Br^-$, $n = 12, m = 2$ 1,2-этан-бис(диметилдодециламмония) дибромид [29]	65
5	Смесь желатина и $[C_{12}H_{25}Im^+(CH_2)_4Im^+C_{12}H_{25}] \cdot 2Br^-$ [30]	100
6	$[C_{12}H_{25}N^+(CH_2CH_2OH)_2(CH_2)_3(CH_2CH_2OH)_2N^+C_{12}H_{25}] \cdot 2Br^-$ 1,3-пропан-бис[ди(2-гидроксилэтил)додециламмония] дибромид [31]	55
Бетайны:		
7	$CH_3(CH_2)_{14}CH_2O(CH_2CH_2O)_3CH_2CH(OH)CH_2N^+(CH_3)_2CH_2COO^-$ [32]	80
8	$[CH_3(CH_2)_6CH_2]_2CHCH_2OCH_2CH(OH)CH_2N^+(CH_3)_2CH_2COO^-$ [32]	100

Таким образом, отчетливо прослеживается влияние размера мостикового фрагмента на дилатационные реологические характеристики адсорбционных слоев дикаатионных имидазолиевых ПАВ.

Значение модуля вязкоупругости для дикаатионных имидазолиевых ПАВ с метиленовым мостиковым фрагментом $m = 2$ и углеводородным радикалом с $n = 16$ превышает значения E_{\max} для некоторых дикаатионных ПАВ, выбранных в качестве примеров (табл. 2). При этом были использованы литературные данные и данные, полученные для дикаатионных оксимов с углеводородными радикалами $n = 12$ и 14 при $m = 3$.

Можно отметить близкие значения E_{\max} для дикаатионных имидазолиевых (68 мН/м) и аммонийного (65 мН/м) ПАВ с одинаковыми значениями $n = 12$ и $m = 2$ (образцы 4 в табл. 1 и 2).

Высокие значения модуля вязкоупругости для димерных ПАВ могут быть связаны со способностью их молекул к образованию прочных адсорбционных слоев. Известно, что свойства адсорбционных пленок ПАВ определяются не только концентрацией молекул в поверхностном слое, но и их строением и расположением молекул на межфазной поверхности. Согласно данным, приведенным в табл. 2, разветвленные гидрофобные алкильные заместители бетаиновых молекул способны усиливать межмолекулярные взаимодействия в адсорбционном слое и, тем самым, способствовать росту динамического модуля вязкоупругости, причем увеличение размеров угле-

водородных радикалов приводит к значительно-
му росту E_{\max} (образцы 7 и 8) [33].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом формы висячей капли исследованы динамическое и равновесное поверхностное натяжение водных растворов дикатионных имидазолиевых солей (дибромидов 1,3-бис(3'-алкилимидазолий-1'-ил)-2-алканов) на границе с воздухом.

Показано, что ККМ этих ПАВ уменьшается примерно на порядок при увеличении длины углеводородного радикала на две CH_2 -группы. Эти результаты согласуются с литературными данными. Четких зависимостей значений ККМ, γ_{\min} , Γ_{\max} от длины мостикового фрагмента не выявлено.

Методом формы осциллирующей капли исследованы дилатационные реологические свойства адсорбционных слоев дикатионных имидазолиевых ПАВ на границе фаз водный раствор—воздух. Установлены зависимости модуля вязкоупругости от частоты осцилляций поверхности капли для растворов дикатионных ПАВ.

Выявлена отчетливая зависимость модуля вязкоупругости от размера мостикового фрагмента диимидазолиевых ПАВ. Поверхностная вязкоупругость растворов таких ПАВ зависит и от длины углеводородного радикала. ПАВ с $m = 2$ и $n = 16$ характеризуется высоким значением модуля вязкоупругости ($E_{\max} = 128$ мН/м), который превышает величины E_{\max} , характерные для некоторых дикатионных ПАВ.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы благодарят к. х. н. В.А. Михайлова (Институт физико-органической химии и углехимии им. Л.М. Литвиненко), синтезировавшего использованные в работе диимидазолиевые ПАВ.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Menger F.M., Keiper J.* // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2000. V. 39. P. 1906.
2. *Menger F.M., Keiper J.S., Azov V.* // *Langmuir.* 2000. V. 16. P. 2062.
3. *Hait S.K., Moulik S.P.* // *Current Sci.* 2002. V. 82. P. 1101.
4. *Sekhon B.S.* // *Resonance.* 2004. V. 9. № 3. P. 42.
5. *Kamal M. S.* // *J. Surfact. Deterg.* 2016. V. 19. P. 23.
6. *Zana R.* // *J. Colloid Interface Sci.* 2002. V. 248. P. 203.
7. *Menger F., Mbadugha B.N.* // *J Am. Chem. Soc.* 2001. V. 123. P. 875.
8. *Menger F.M., Littau C.A.* // *J. Am. Chem. Soc.* 1993. V. 115. P. 10083.
9. *Menger F.M., Littau C.A.* // *J. Am. Chem. Soc.* 1991. V. 113. P. 1451.
10. *Zakharova L.Ya., Mirgorodskaya A.B., Zhiltsova E.P., Kudryavtseva L., Konovalova A.* // *Molecular Encapsulation: Organic Reactions in Constrained Systems / Ed. by Brinker U.H., Mieusset J.-L.* New-York: Wiley, 2010. P. 397.
11. *Milton M.D., Garg P.* // *Appl. Organomet. Chem.* 2016. V. 30. P. 727.
12. *Проконьева Т.М., Капитанов И.В., Белоусова И.А., Шумейко А.Е., Кострикин М.Л., Туровская М.К., Разумова Н.Г., Попов А.Ф.* // *Журн. орг. химии.* 2015. Т. 51. С. 1105.
13. *Sharma R., Kamal A., Abdinejad M., Mahajan R.K., Kraatz H.-B.* // *Adv. Colloid Interface Sci.* 2017. V. 248. P. 35.
14. *Mirgorodskaya A.B., Zakharova L.Ya., Khairutdinova E.I., Lukashenko S.S., Sinyashin O.G.* // *Colloids Surf. A.* 2016. V. 510. P. 33.
15. *Wettig S.D., Wang C., Verrall R.E., Foldvari M.* // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2007. V. 7. P. 871.
16. *Sheikh M.S., Khanam A.J., Matto R.H., Kabir-ud-Din // J. Surfact. Deterg.* 2013. V. 16. P. 503.
17. *Fatma N., Panda M., Kabir-ud-Din, Beg M.* // *J. Mol. Liq.* 2016. V. 222. P. 390.
18. *Dong K., Liu X.M., Dong H.F., Zhang X.P., Zhang S.J.* // *Chem. Rev.* 2017. V. 117. P. 6636.
19. *Hayes R., Warr G.G., Atkin R.* // *Chem. Rev.* 2015. V. 115. P. 6357.
20. *Sood R., Alakoskela J.-M., Sood A., Vitovi P., Kinnunen P.K.J.* // *J. Appl. Sol. Chem. Model.* 2012. V. 1. P. 13.
21. *Anderson J.L., Ding R.F., Ellern A., Armstrong, D.W.* // *J. Am. Chem. Soc.* 2005. V. 127. P. 593.
22. *Frizzo C.P., Gindri I.M., Bender C. R., Tier A.Z., Villetti M.A., Rodrigues D.C., Machado G., Martins M.A.P.* // *Colloids Surf. A.* 2015. V. 468. P. 285.
23. *Hennemann B.L., Bender C.R., Salbego P.R.S., Meyer A.R., Belladonna A.L., Zanatta N., Bonacorso H.G., Villetti M.A., Martins M.A.P., Frizzo C.P.* // *J. Mol. Liq.* 2018. V. 252. P. 184.
24. *Moosavi M., Khashei F., Sharifi A., Mirzaei M.* // *J. Chem. Thermodyn.* 2017. V. 107. P. 1.
25. *Marullo S., Rizzo C., Dintcheva N.T., Giannici F., D'Anna F.* // *J. Colloid Interface Sci.* 2018. V. 517. P. 182.
26. *Холмберг К., Йёнссон Б., Кронберг Б., Лундман Б.* Поверхностно-активные вещества и полимеры в водных растворах. М.: БИНОМ, 2007.
27. *Frizzo C.P., Gindri I.M., C.R. Bender, Tier A.Z., Villetti M.A., Rodrigues D.C., Machado G., Martins M.A.P.* // *Colloids Surf. A.* 2015. V. 468. P. 285.
28. *Хилько С.Л., Котенко А.А., Гребенюк С.А., Заречная О.М., Михайлов В.А.* // *Коллоид. журн.* 2019. Т. 81. С. 344.
29. *Wu D., Feng Y., Xu G., Chena Y., Cao X., Li Y.* // *Colloids Surf. A.* 2007. V. 299. P. 117.
30. *Ao M., Xu G., Kang W., Meng L., Gong H., Zhou T.* // *Soft Matter.* 2011. V. 7. P. 1199.

31. *Pei X., Zhang Q., Liu Zh., Song B., Li R., Zhao J., Cui Z.* // Colloid Polym. Sci. 2016. V. 294. P. 1405.
32. *Zhou Zh., Ma D.-Sh., Zhang Q., Wang H.-Zh., Zhang L., Luan H., Zhu Y., Zhang L.* // Colloids Surf. A. 2018. V. 538. P. 739.
33. *Acharya D.P., Gutiérrez J.M., Aramaki K., Aratani K., Kunieda H.* // J. Colloid Interface Sci. 2005. V. 291. P. 236.
34. *Cao X.L., Feng J., Guo L.L., Zhu Y., Zhang L., Zhang L., Luo L., Zhao S.* // Colloids Surf. A. 2016. V. 490. P. 41.
35. *Liu X.P., Feng J., Zhang L., Zhao S., Yu J.* // Acta Phys.-Chim. Sin. 2010. V. 26. P. 1277.
36. *Ao M., Huang P., Xu G., Yang X., Wang Y.* // Colloid Polym. Sci. 2009. V. 287. P. 395.
37. *Ao M., Xu G., Zhu Y., Bai Y.* // J. Colloid Interface Sci. 2008. V. 326. P. 490.
38. *Ren C., Wang F., Zhang Z., Nie H., Li N., Cui M.* // Colloids Surf. A. 2015. V. 467. P. 1.
39. *Loglio G., Pandolfini P., Miller R., Makievski A.V., Ravera F., Ferrari M., Liggieri L.* Novel Methods to Study Interfacial Layers. Amsterdam: Elsevier, 2001.
40. *Zholob S.A., Makievski A.V., Miller R., Fainerman V.B.* // Adv. Colloid Interface Sci. 2007. V. 322. P. 134.
41. *Hao J., Wang P., Zhang Y., Zhang Y.* // J. Surfact. Deterg. 2016. V. 19. P. 915.
42. *Miller R., Fainerman V.B., Makievski A.V., Kragel J., Grigoriev D.O., Kazakov V.N., Sinyachenko O.V.* // Adv. Colloid Interface Sci. 2000. V. 86. P. 39.
43. *Murray B.S., Dickinson E.* // Food Sci. Technol. Int. 1996. V. 2. P. 131.
44. *Aksenenko E.V., Kovalchuk V.I., Fainerman V.B., Miller R.* // Adv. Colloid Interface Sci. 2006. V. 122. P. 57.
45. *Ducel V., Richard J., Popineau Y., Boury F.* // Biomacromolecules. 2004. V. 5. P. 2088.
46. *Miller R., Alahverdjiyeva V.S., Fainerman V.B.* // Soft Matter. 2008. V. 4. P. 1141.
47. *Singh T., Kumar A.* // J. Phys. Chem. B. 2007. V. 12. P. 7843.
48. *Shi L., Zheng L.* // J. Phys. Chem. B. 2012. V. 116. P. 2162.
49. *Frizzo C.P., Bender C.R., Gindri I.M., Villetti M.A., Machado G., Bianchi O., Martins M.A.P.* // J. Phys. Chem. C. 2016. V. 120. P. 14402.