

УДК 531.31:541.18

**СТРУКТУРНЫЕ, ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
ПОВЕРХНОСТИ СФЕРИЧЕСКИХ МИЦЕЛЛ В РАСТВОРАХ
ГОМОЛОГОВ *n*-АЛКИЛСУЛЬФАТОВ НАТРИЯ.
I. СТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

**В.С. Кузнецов¹, Н.В. Усольцева¹, А.П. Блинов¹, Н.В. Жарникова¹,
А.И. Смирнова¹, В.Г. Баделин²**

¹Ивановский государственный университет, Россия

E-mail: nv_usoltseva@mail.ru

²Институт химии растворов им. Г.А. Крестова РАН, Иваново, Россия

Статья поступила 22 ноября 2015 г.

С доработки — 21 января 2016 г.

На основе чисел агрегации мицелл и эффективных размеров гидратированных поверхностно-активных ионов и противоионов первой координационной сферы вычислены средние геометрические характеристики поверхностного слоя ионных сферических мицелл в растворах гомологов *n*-алкилсульфатов натрия с числом углеродных атомов в молекуле $n_C = 8, 10, 12$ и 14 , в том числе установлены: 1) размеры ядра мицеллы; 2) толщина двойного электрического слоя на поверхности; 3) параметры взаимного расположения гидрофильных и гидрофобных ионов; 4) число молекул "свободной" воды, а также показана их зависимость от номера гомолога и степени связывания противоионов.

DOI: 10.15372/JSC20160812

Ключевые слова: ионные сферические мицеллы, структура поверхности, двойной электрический слой, числа агрегации.

ВВЕДЕНИЕ

Молекулярно-термодинамическое и компьютерное моделирование биологических наноразмерных систем часто проводится с помощью мицеллярных моделей, во многом имитирующих структуру и биохимическую функцию липидов, белков, биополимеров и клеточных мембран [1–3].

Поскольку именно в поверхностном слое подобных биологических структур и происходят основные энергетические и транспортные события [4], естественно возрастание интереса к детальному изучению структуры и свойств поверхности мицелл в растворах поверхностно-активных веществ (ПАВ) [5, 6]. Важно, чтобы характеристики поверхности мицелл для гомологических рядов ПАВ не были оценены лишь по порядку величины (как это обычно делается [7]), а выявлены их зависимости от номера гомолога (числа агрегации или длины l_C углеводородного радикала молекулы). К таким характеристикам, тесно связанным с архитектурой поверхности, относятся, прежде всего, поверхностное и межфазное натяжение, энергия ионов, образующих двойной электрический слой (ДЭС) на поверхности мицеллы, и статическая диэлектрическая проницаемость ϵ в этом слое.

СТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТИ ИОННЫХ СФЕРИЧЕСКИХ МИЦЕЛЛ В РАСТВОРАХ *n*-АЛКИЛСУЛЬФАТОВ НАТРИЯ

Численные расчеты методом молекулярной динамики показали, что в анионных мицеллах ПАВ не происходит проникновения молекул воды в гидрофобное ядро [8]. Однако молекулы воды, не входящие в первую гидратную оболочку ионов, могут, в принципе, проникать при мицеллообразовании в пространство между вытянутыми из ядра частями углеводородных радикалов (квазикапельная модель мицеллы [9]). Явление вытягивания части углеводородных радикалов из ядра мицеллы (образование "короны") происходит за счет установления гидрофильно-гидрофобного баланса [7]. В монографии [7] на примере мицеллы додецилсульфата натрия вычислена доля радикалов молекул, не полностью входящих в ядро. Ранее мы рассмотрели электростатические взаимодействия в мицеллярных растворах *n*-алкилсульфатов натрия [10]. Для настоящей работы интерес представляют средние значения длин вытянутых из ядра радикалов и, соответственно, средние размеры ядер мицелл для каждого изучаемого гомолога: средние величины определяют поведение системы в целом. Такую оценку можно провести при сравнении экспериментально найденных $n_{\text{эксп}}$ и теоретических $n_{\text{теор}}$ чисел агрегации поверхностно-активных ионов. При этом $n_{\text{эксп}} > n_{\text{теор}}$.

В представленной работе была поставлена задача полуэмпирическим методом получить указанные выше характеристики ионных сферических мицелл в водных растворах четырех гомологов *n*-алкилсульфатов натрия с числом атомов углерода в радикале молекулы $n_C = 8, 10, 12$ и 14 при критических концентрациях мицеллообразования (ККМ) и $T = 303$ К.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Из всех экспериментально определяемых мицеллярных параметров числа агрегации $n_{\text{эксп}}$ являются наиболее точными (хотя разброс данных может достигать 15 %) [8, 11]. Теоретические значения чисел агрегации в капельной модели мицеллы определяются известным образом [7, 12]:

$$n_{\text{теор}} = \frac{4}{3} \pi \cdot l_C^3 / V_C = \frac{4\pi \cdot l_C^2}{3a_C}, \quad (1)$$

где, согласно формуле Тэнфорда [6, 9, 10]:

$$l_C = 1,5 + 1,265 \cdot n_C(\text{Å}), \quad (2)$$

$a_C = 21,0 \text{ Å}^2$ — средняя площадь сечения линейного углеводородного радикала; $V_C = a_C \cdot l_C$ [8, 12].

Можно подобрать такую длину радикала ($l_C + \Delta l_C$), что она будет удовлетворять равенству (1) в капельной модели, но для $n_{\text{эксп}}$:

$$n_{\text{эксп}} = \frac{(4/3)\pi(l_C + \Delta l_C)^3}{(V_C + \Delta V_C)}. \quad (3)$$

В этом случае малые параметры Δl_C и ΔV_C будут характеризовать для данного гомолога степень отклонения чисто капельной модели мицеллы в пользу квазикапельной.

При $n_{\text{эксп}} > n_{\text{теор}}$, Δl_C и $\Delta V_C > 0$. Если $V_C = a_C \cdot l_C$ и $\Delta V_C = a_C \cdot \Delta l_C$, то

$$n_{\text{эксп}} = (4\pi / 3a_C)(l_C + \Delta l_C)^2. \quad (4)$$

Известно, что большая часть углеводородных радикалов в плотноупакованном ядре находится в разупорядоченном или даже в свернутом состоянии [11], часть радикалов выступает из ядра и его средний радиус $l_0 \leq l_C$ [11, 12]. Тогда, сравнивая (4) и (1), можно считать Δl_C усредненным значением длины той части радикала, которая выступает из ядра, при этом

$$l_0 = l_C - \Delta l_C. \quad (5)$$

Указанное сравнение формул (1) и (4) дает эквивалентные формулы для вычисления Δl_C :

$$\Delta l_C = \sqrt{\frac{3a_C \cdot n_{\text{эксп}}}{4\pi}} - l_C = l_C \left(\sqrt{\frac{n_{\text{эксп}}}{n_{\text{теор}}}} - 1 \right). \quad (6)$$

В соответствии с уравнением упаковки [13], фактор упаковки молекул (ионов) для сферических мицелл $g = a_c/a_0 \approx 1/3$ (a_0 — площадь, приходящаяся на одну полярную часть ПАВ на поверхности ядра). Если $a_0 \approx 63,0 \text{ \AA}$, а радиус гидратированного сульфат-иона, принятый за радиус сульфатной "головы" поверхностно-активного иона, $r_r = 3,2 \text{ \AA}$ [14], то ясно, что каждый такой ион имеет вокруг себя на сферической поверхности со средним радиусом $(l_c + r_r)$ свободную площадь, равную примерно половине a_0 . Строго говоря, эта так называемая "посадочная площадь" a_0 зависит от кривизны сферической поверхности. Но в [7] показано, что при значительных числах агрегации (десятки и более молекул, что имеет место для изучаемых мицелл) указанная зависимость $a_0(l_c)$ становится слабой и площадь a_0 на сферической поверхности оказывается очень близкой к площади ее проекции на касательную плоскость к сфере в окрестности рассматриваемой "посадочной площадки".

В предположении о жесткости выступающих из ядра фрагментов углеводородных цепей и постоянстве радиусов головных частей r_r поверхностно-активных ионов и противоионов r_n можно геометрически рассчитать указанные выше структурные параметры поверхности мицелл.

Будем считать, что для определенной мицеллы (с постоянными значениями l_0 , l_c , Δl_c , r_r , r_n и $n_{\text{эксп}}$) центры головных частей поверхностно-активных ионов располагаются в узлах сетки на сферической поверхности радиуса $(l_c + r_r)$. Гидратированные противоions плотного слоя могут частично внедряться в свободное пространство между головными частями поверхностно-активных ионов. При полном связывании противоионов ($\beta = 1$) ячейки этой сетки, будучи спроектированными на касательную плоскость к сферической поверхности в окрестности рассматриваемой ячейки, представляют собой ромбы с острым углом 60° . При $\beta < 1$ высвобождается некоторая площадь в пользу противоионов, для которых ромбовидные ячейки служат "посадочными площадками". Вычисление этих площадей является основой для указанных геометрических расчетов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В таблице приведены значения длин l_c углеводородных радикалов молекул, теоретических $n_{\text{теор}}$ и экспериментальных $n_{\text{эксп}}$ чисел агрегации при ККМ, взятых из [15—20], и $T = 303 \text{ K}$, а также вычисленные средние значения l_0 радиусов ядер и длин Δl_c для мицелл гомологов алкилсульфатов натрия с $n_c = 8, 10, 12$ и 14 . Простая экстраполяция зависимости $\Delta l_c(n_c)$ показывает, что при $\Delta l_c \rightarrow 0$ $n_c \approx 20$. Начиная с этого гомолога $l_0 \approx l_c$, исчезает "корона" мицеллы, реализуется идеальная капельная модель мицеллы, что согласуется с некоторыми литературными данными [7, 11, 12].

На рис. 1 представлена проекция "посадочной площадки" на касательную плоскость противоиона в виде ромба $ABED$ (главное сечение противоиона изображено в виде заштрихованного круга радиуса r_n). Вершины ромба являются центрами окружностей с радиусами $AA' = BB' = DD' = EE' = r$; радиус r определяет в то же время "посадочную площадку" a_0 головной части поверхностно-активного иона. При этом $AB = BE = ED = AD = BD = 2r$. Если площадь ромба $ABED$ равна σ , то

$$r^2 = \sigma / 2\sqrt{3}. \quad (7)$$

При $\beta = 1$ и значительных числах агрегации ($n_{\text{эксп}} > 10$):

$$\sigma \approx a_0 = \frac{4\pi(l_c + r_r)^2}{n_{\text{эксп}}} \quad (8)$$

Структурные характеристики поверхности сферических мицелл гомологов алкилсульфатов натрия

n_c	8	10	12	14	ККМ, моль/дм ³	0,133	0,031	0,008	0,002
$l_c, \text{ \AA}$	11,62	14,15	16,68	19,21	$l_0, \text{ \AA}$	9,99	13,11	16,02	18,90
$n_{\text{теор}}$	27	40	56	74	$\Delta l_c, \text{ \AA}$	1,63	1,04	0,66	0,31
$n_{\text{эксп}}$	35	46	60	76					

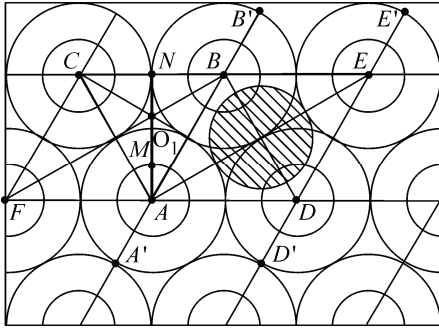


Рис. 1. Проекция на касательную плоскость "посадочной площадки" $ABED$ противоиона мицеллы (заштрихован) и головных частей поверхностно-активных ионов с центрами в точках A, B, E, D и C

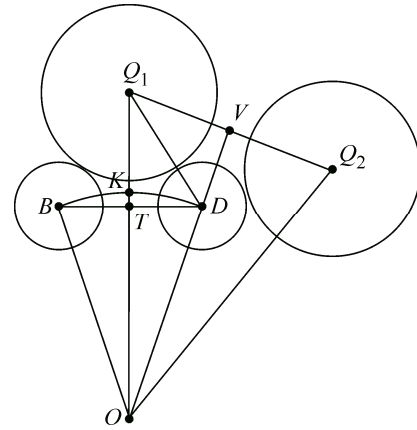


Рис. 2. Сечение мицеллы вдоль малой диагонали BD (см. рис. 1), нормальное к плоскости ромба $ABED$

и тогда

$$r^2(\beta=1) = 2\pi(l_C + r_r)^2 / n_{\text{эксп}} \cdot \sqrt{3}. \quad (9)$$

В общем случае при $\beta < 1$ образуются пустые ячейки, и ромбы сжимаются до меньших размеров со стороной, равной $2r_r$. Избыток площади $\Delta\sigma$, который при этом образуется, в среднем равномерно распределяется между занятыми противоионами ячейками:

$$\Delta\sigma = \sigma - \sigma_r = \left[\frac{4\pi(l_C + r_r)^2}{n_{\text{эксп}}} \right] - \pi r_r^2. \quad (10)$$

Число занятых ячеек $n_{\text{эксп}} \cdot \beta$, а полный избыток площади, очевидно, равен $\Delta\sigma \cdot n_{\text{эксп}}(1 - \beta)$. Тогда избыток площади в расчете на одну ячейку:

$$\frac{\Delta\sigma \cdot n_{\text{эксп}} \cdot (1 - \beta)}{n_{\text{эксп}} \cdot \beta} = \Delta\sigma \cdot \frac{(1 - \beta)}{\beta}, \quad (11)$$

а площадь ромба σ' при значениях $\beta < 1$ будет равна

$$\sigma' = \sigma + \Delta\sigma \cdot \frac{1 - \beta}{\beta}. \quad (12)$$

Площадь σ' в то же время является сложной функцией, зависящей от $2r(\beta)$

$$\sigma' = \sigma'(2r(\beta)) = \frac{4r^2(\beta)}{2} \cdot \sqrt{3} = 2\sqrt{3} \cdot r^2(\beta). \quad (13)$$

Подстановка (8), (10) и (13) в (12) и преобразования дают формулу для квадрата $r(\beta)$:

$$r^2(\beta) = \frac{1}{2\sqrt{3}} \left[\frac{1}{\beta} \cdot \frac{4\pi}{n_{\text{эксп}}} \cdot (l_C + r_r)^2 - \left(\frac{1}{\beta} - 1 \right) \cdot \pi r_r^2 \right]. \quad (14)$$

Очевидно, что при $\beta = 1$ (14) переходит в (9).

На рис. 2 изображены главные сечения противоионов и головных частей поверхностно-активных ионов в плоскости, перпендикулярной плоскости ромба $ABED$ на рис. 1 и проходящей вдоль малой диагонали BD этого ромба. Точки дуги BD (см. рис. 2) расположены на расстоянии $l(-) = OB = OK$ от центра O мицеллы; при этом точки B и D являются центрами головных частей поверхностно-активных ионов, так что $l(-) = l_C + r_r$. Центры противоионов Q_1 и Q_2 находятся на расстоянии от центра O мицеллы, равном $l(+) = OQ_1 = OQ_2$. Таким образом, толщина Δl ДЭС: $\Delta l = OQ_1 - OK = OQ_1 - OB = OQ_1 - OD = l(+) - l(-)$ (см. рис. 2). Рассматривая прямоугольный треугольник TQ_1D и учитывая, что $BT = TD \equiv r(\beta)$, а также, что $Q_1D = r_{\text{п}} + r_r$, находим:

$$\Delta l = \delta(\beta) - h(\beta), \tag{15}$$

где

$$\delta(\beta) = \sqrt{(r_{\text{н}} + r_r)^2 - r^2(\beta)}, \tag{16}$$

и высота шарового сегмента $\text{TK} \equiv h(\beta)$

$$h(\beta) = \left[(l_C + r_r) - \sqrt{(r_{\text{н}} + r_r)^2 - r^2(\beta)} \right]. \tag{17}$$

Удобно нормировать Δl к толщине плоского ДЭС, образующегося в случае конденсированной пленки ПАВ на поверхности раствора [11, 21]:

$$\Delta l / \Delta l_{\text{max}} = \Delta l / (r_{\text{н}} + r_r).$$

Нетрудно найти также расстояние $L \equiv Q_1Q_2$ между центрами ближайших противоионов (см. рис. 2). Рассматривая подобные прямоугольные треугольники OTD и OQ_1V и учитывая, что $Q_1V = VQ_2 = QQ_1/2 \equiv L/2$, находим:

$$L = \frac{2r(\beta)}{l_C + r_r} \cdot (l+) = 2r(\beta) \left(1 + \frac{\Delta l}{l_C + r_r} \right). \tag{18}$$

Удобно ввести безразмерный параметр $\lambda_{\text{н}} \equiv L/2r_{\text{н}}$, показывающий степень сближения противоионов

$$\lambda_{\text{н}} = \left[1 + \frac{\Delta l}{l_C + r_r} \right] \cdot \frac{r(\beta)}{r_{\text{н}}}. \tag{19}$$

Аналогично, степень сближения центров головных частей гидрофобных ионов может быть определена как:

$$\lambda_r = \frac{r(\beta)}{r_r}. \tag{20}$$

Далее рассматривается вопрос о возможности размещения молекул "свободной" воды в поверхностном слое мицелл. Пусть эффективный радиус молекулы воды равен $r_{\text{в}}$. Если $r_{\text{в}} < \rho \equiv O_1M = (2r/N_3) - r_r$ и $r_{\text{в}} < d \equiv O_1N$ (см. рис. 1), то молекула воды может пройти внутрь треугольной полости, начинающейся с головных частей поверхностно-активных ионов с центрами в точках A, B и C и простирающейся на глубину $H = x + y$ в направлении к центру O мицеллы (рис. 3). При этом

$$\begin{aligned} y &= SR = l_C + r_r + \Delta l - r_{\text{н}} - l_0 = \Delta l_C + \Delta l + r_r - r_{\text{н}}, \\ x &= Q_2P; \quad SQ_2 = WP \equiv d; \quad QP = r_{\text{н}} \quad \text{и} \quad OR = l_0. \end{aligned} \tag{21}$$

Точка Q_1 (см. рис. 1 и 3) расположена ближе к центру O мицеллы, чем точка Q_2 (см. рис. 3), и $Q_1Q_2 \approx \sqrt{(r_{\text{н}} + r_r)^2 - r^2} - r_{\text{н}}$. Именно в плоскости, проходящей через точку Q_1 перпендикулярно радиальному направлению мицеллы, находятся центры головных частей поверхностно-активных ионов (точки A, B, C, F на рис. 1 и 3).

Величина x находится из условия (см. рис. 3):

$$r_{\text{н}}^2 = d^2 + (r_{\text{н}} - x)^2 \tag{22}$$

и как бы увеличивает глубину y треугольной полости.

Расчеты показывают, что минимальные значения параметров ρ и d ($n_C = 8, \beta = 1$) равны 2,75 и 1,91 Å соответственно, в то время как $r_{\text{в}} = 1,4$ Å [14]. Таким образом,

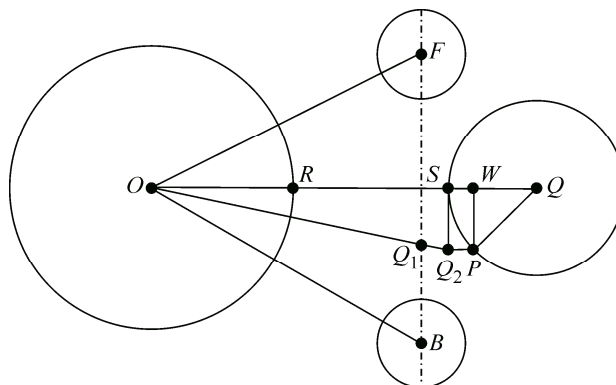


Рис. 3. Сечение мицеллы вдоль большой диагонали BF (см. рис. 1), нормальное к плоскости ромба $ABCF$ (на рис. 1 соответствующий противоион не указан)

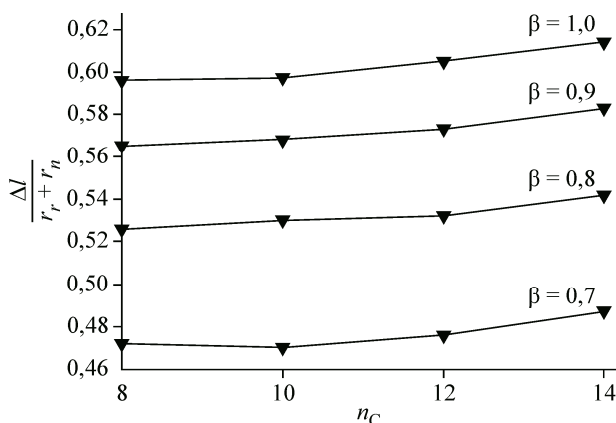


Рис. 4. Приведенная толщина ДЭС на поверхности мицелл гомологов алкилсульфатов натрия в зависимости от n_C и степени связывания противоионов β . $r_r = 3,2 \text{ \AA}$; $r_n = 3,2 \text{ \AA}$

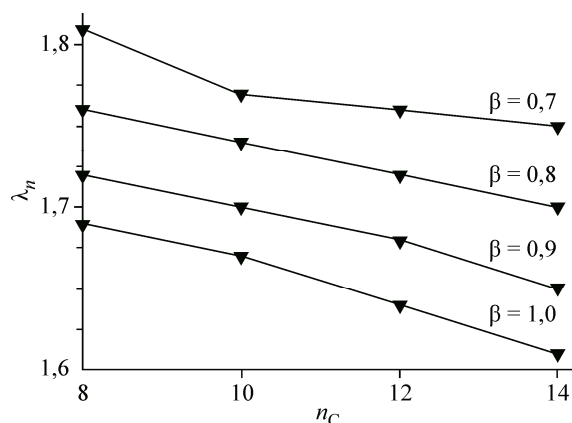


Рис. 5. Степень сближения противоионов в мицеллах гомологов алкилсульфатов натрия в зависимости от n_C и степени связывания противоионов β

возможность размещения некоторого количества молекул воды в рассматриваемой полости определяется функцией $H/d_b = (H/d_b)(n_C, \beta)$.

На рис. 4—7 представлены структурные характеристики поверхности (в приведенном виде) мицелл гомологов алкилсульфатов натрия с $n_C = 8, 10, 12$ и 14 в зависимости от степени связывания противоионов β , являющейся функцией состояния мицеллы.

При увеличении β плотность ионов в поверхностном слое мицеллы возрастает, и характеристики, рассматриваемые в радиальном направлении (толщина Δl ДЭС и глубина H полости), увеличиваются (см. рис. 4 и 7). В то же время как расстояния между поверхностно-активными ионами и противоионами, наоборот, уменьшаются (см. рис. 5 и 6). Площадь S_r поверхности, на которой расположены сульфатные "головы" ионов $S_r \sim (l_C + r_r)^2$, а $n_{\text{экср}} \sim (l_C + \Delta l_C)^2$ (формулы (4), и (9)) и Δl_C в гомологическом ряду изучаемых ПАВ убывает до десятых долей ангстрема. Эти обстоятельства и объясняют слабовозрастающую зависимость $\lambda_r(n_C)$ при $\beta = \text{const}$ (см. рис. 6). При рассмотрении формул (9), (14) и (18) находим, что расстояния между противоионами $L \sim \lambda_n \sim \frac{1}{l_C + \Delta l}$, и с увеличением n_C (числа углеродных атомов в углеводородном ради-

кале) l_C возрастает (увеличивается, хотя и слабо, и Δl (см. рис. 4)), и функция $\lambda_n(n_C)$ является убывающей (см. рис. 5).

Функция $(H/d_b)(n_C)$ (см. рис. 7) хорошо аппроксимируется формулой:

$$(H/d_b) = A \cdot n_C^{-B} + C \quad (23)$$

с относительным отклонением аппроксимированных значений H/d_b от рассчитанных ранее, не превышающем 0,96 % для всех значений n_C и параметра β , используемых в настоящей работе. Здесь A , B и C — безразмерные константы. Например, при $\beta = 1$ $A = 53,88$, $B = 2,15$ и $C = 1,55$; при $\beta = 0,7$ эти константы равны 64,24, 2,28 и 1,66 соответственно. При $\beta = 0,8$ и $0,9$ эти величины имеют промежуточные значения. При $n_C = 20$ (гомолог, мицеллы которого уже лишены своей "короны") и $\beta = 0,7$ $(H/d_b) = 1,73$, и в пределе при $n_C \rightarrow \infty$ $(H/d_b) \rightarrow C$, т.е. константа C уравнения (23) является предельным минимальным значением числа молекулы воды, способных разместиться в одной свободной полости на поверхности мицеллы. Число ячеек-ромбов, являющихся "посадочными площадками" для противоионов в мицелле, равно $\beta \cdot n_{\text{экср}}$, а число полостей для размещения молекул свободной воды — $2 \cdot \beta n_{\text{экср}}$. Для додецилсульфата натрия при $\beta = 0,8$ значение $(H/d_b) = 1,96$ (см. рис. 7) и $n_{\text{экср}} = 60$; общее число молекул воды в поверхностном слое равно примерно 156. При уменьшении β и возрастании n_C число молекул воды уменьшается (лиофобизация).

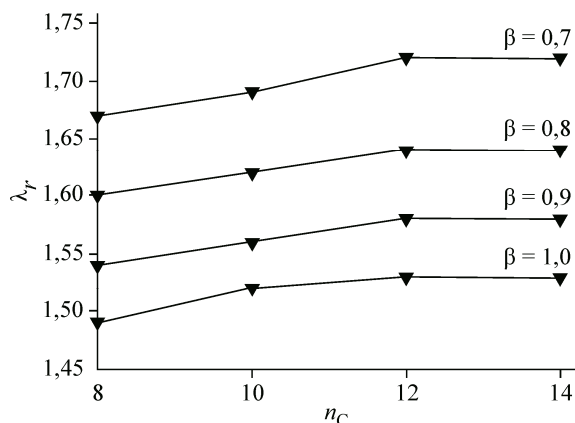


Рис. 6. Степень сближения головных частей поверхностно-активных ионов в мицеллах гомологов алкилсульфатов натрия в зависимости от n_C и степени связывания противоионов β

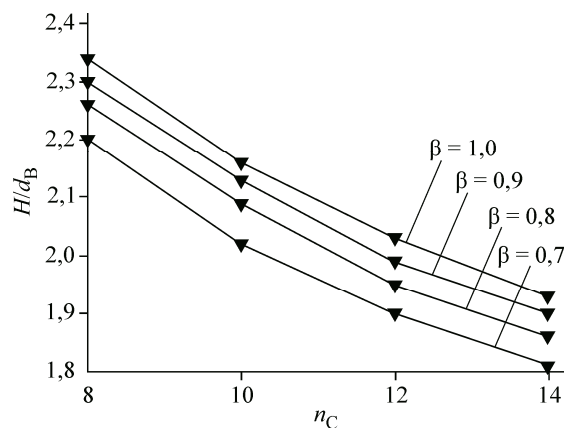


Рис. 7. Глубина полости (приведенная к размеру молекулы воды) в поверхностном слое мицелл гомологов алкилсульфатов натрия в зависимости от n_C и степени связывания противоионов β ; $d_B = 2,8 \text{ \AA}$

Однако в узком поверхностном ДЭС молекулы "свободной" воды находиться, по-видимому, не могут. Ограничимся вычислением лишь одного размера. Из рис. 1 находим величину $\nabla = (AE/2) - r_n - r_r$, которая определяет зазор, через который в ДЭС может проникнуть молекула воды. Оценка показывает, что

$$\nabla \approx \sqrt{\frac{\sqrt{3}}{2}} \sigma - 6,8(\text{\AA}) \approx 0,6 \text{ \AA} < d_B = 2,8 \text{ \AA}.$$

Следовательно, молекулы воды, не входящие в первую гидратную оболочку ионов, в поверхностном ДЭС находиться не могут.

ВЫВОДЫ

На основании известных чисел агрегации и эффективных размеров ионов в ДЭС вычислены структурные характеристики поверхностного слоя сферических мицелл в растворах гомологов n -алкилсульфатов натрия с числом углеродных атомов в молекуле $n_C = 8, 10, 12$ и 14 . При этом с увеличением номера гомолога и степени связывания противоионов толщина ДЭС на поверхности мицелл возрастает, а степень сближения противоионов уменьшается. Эти данные используются во второй части работы для вычисления электростатических и термодинамических свойств поверхности указанных объектов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 15-43-03003 р_центр_а) и частично в рамках выполнения госзадания Минобрнауки РФ (НИР № 4.106.2014К).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Carlton R.J., Hunter J.T., Miller D.S. et al. // Liquid Crystals Reviews. – 2013. – 1, N 1. – P. 29.
2. Бродская Е.Н. // Коллоид. журн. – 2012. – 74, № 2. – С. 167.
3. Методы компьютерного моделирования для исследования полимеров и биополимеров / Ред. В.А. Иванов, А.Л. Рабинович, А.Р. Хохлов. – М.: КД "ЛИБРОКОМ", 2009.
4. Ващенко О.В., Ермак Ю.Л., Лисецкий Л.Н. // Биофизика. – 2013. – 58, № 4. – С. 663.
5. Миргород Ю.А. // Журн. структур. химии. – 2008. – 49, № 5. – С. 920.
6. Szabolcs Vass // Struct. Chem. – 1991. – 2, N 3. – P. (167)375.
7. Русанов А.И. Мицеллообразование в растворах поверхностно-активных веществ. – СПб.: Химия, 1992.
8. Boek E.S., Jusufi A., Löwen H. et al. // J. Phys.: Condens. Matter. – 2002. – 14, N 40. – P. 9413.
9. Гришин А.П., Русанов А.И., Куни Ф.М. и др. // Коллоид. журн. – 2003. – 65, № 2. – С. 168.

10. Кузнецов В.С., Усольцева Н.В., Быкова В.В. // Журн. структур. химии. – 2012. – **53**, № 1. – С. 87.
11. Холмберг К., Йёнссон Б., Кронберг Б. и др. Поверхностно-активные вещества и полимеры в водных растворах. – М.: БИНОМ, 2007.
12. Русанов А.И., Гринин А.П., Куни Ф.М. и др. // Журн. общ. химии. – 2002. – **72**, № 4. – С. 651.
13. Israelachvili J.N., Mitchell D.J., Ninham B.W. // J. Chem. Soc., Faraday Trans. II. – 1976. – **72**. – P. 1525.
14. Israelachvili J.N. Intermolecular and Surface Forces. 2nd ed. – London: Academic Press Limited, 1992.
15. Абрамзон А.А. и др. Поверхностно-активные вещества: Справочник / Под ред. А.А. Абрамзона и Г.М. Гаевого. – Л.: Химия, 1979.
16. Bockstahl F., Pachoud E., Duplâtre G. et al. // J. Chem. Phys. – 2000. – **256**, Iss. 3. – P. 307.
17. Stigter D. // J. Colloid and Interface Sci. – 1967. – **23**, Iss. 3. – P. 379.
18. Thévenot C., Grassl B., Bastiat G. et al. // Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspect. – 2005. – **252**. – P. 105.
19. Mazer N.A., Benedek G.B., Carey M.C. // J. Phys. Chem. – 1976. – **80**, N 10. – P. 1075.
20. Bales B.L., Messina L., Vidal A. et al. // J. Phys. Chem. B. – 1998. – **102**, N 50. – P. 10347.
21. Абрамзон А.А. Поверхностно-активные вещества. Свойства и применение. – Л.: Химия, 1981.