



УДК 544.77

## Адсорбция додецилсульфата натрия, хлорида додециламмония и Твинов из водных растворов на парафине

Стрельцова Е.А., Гросул А.А.

*Одесский национальный университет имени И.И. Мечникова, Одесса, Украина.*

Поступила в редакцию 18.09.2013 г.

### Аннотация

Изучена адсорбция додецилсульфата натрия, хлорида додециламмония и Твина-40, Твина-60, Твина-80 из водных растворов на парафине и выбраны уравнения изотермы адсорбции, наиболее полно описывающие экспериментально полученные данные.

**Ключевые слова:** адсорбция, поверхностно-активное вещество, парафин

The adsorption of sodium dodecylsulfate, alkylammonium chloride and Twin-40, Twin-60, Twin-80 from water solution on the paraffin are investigated and the equations of an isotherm the adsorptions most full describing experimentally received data are chosen.

**Keywords:** adsorption, surfactant, paraffin

### Введение

Постоянный интерес к изучению адсорбции поверхностно-активных веществ (ПАВ) из водных растворов на твердых поверхностях различной природы, обусловлен необходимостью дальнейшего развития теории адсорбции из растворов, которая в настоящее время разработана недостаточно [1], а также для оптимизации таких технологий как флотация, стабилизация дисперсий, очистка сточных вод, нефтепереработка и т.д. [2,3].

Несмотря на большое количество имеющихся уравнений изотермы адсорбции, не ясно, можно ли их использовать для описания изотерм адсорбции ПАВ на твердых низкоэнергетических поверхностях из водных растворов, и какие из них наиболее предпочтительны.

Цель данной работы - изучить адсорбцию анионного (АПАВ), катионного ПАВ (КПАВ) и неионогенных ПАВ (НПАВ) на низкоэнергетической поверхности парафина из водных растворов, и выяснить возможность использования наиболее распространенных теорий адсорбции, разработанных для границы раздела фаз твердое тело – газ, для описания экспериментально полученных данных.

## Эксперимент

В качестве АПАВ, КПАВ и НПАВ были выбраны: предварительно однократно перекристаллизованный додецилсульфат натрия (ДДСН) фирмы Fluka марки ч., без дополнительной очистки хлорид додециламмония (ХДДА) марки х.ч. и Твины фирмы Acros Organics марки ч.д.а. Выбор в качестве НПАВ Твинов со средним числом оксиэтильных групп 20 – Твина-40 (оксиэтильный монопальмитат сорбитана), Твина-60 (оксиэтильный моностеарат сорбитана) и Твина-80 (оксиэтильный моноолеат сорбитана) обусловлен их доступностью, биологической мягкостью, сравнительно низкой стоимостью и широким использованием в фармацевтической, пищевой и других отраслях промышленности [4]. Растворы готовили на дистиллированной воде в следующих интервалах концентраций: ДДСН –  $(3,5-17,4) \cdot 10^{-5}$  моль/л, ХДДА –  $(4,5-12,0) \cdot 10^{-5}$  моль/л, Твины –  $(0,3-1,9) \cdot 10^{-5}$  моль/л. Эксперименты проводили при температуре 291 – 293 К.

В качестве адсорбента использовали 1 % водную суспензию парафина, полученную путем ультразвукового диспергирования последнего с помощью УЗГ 13-01/22 с частотой стриктера 22 кГц в нагретой до 353 К дистиллированной воде. Дисперсионный анализ образующихся при диспергировании суспензий осуществляли с помощью микроскопа МБИ-11, снабженного сеткой Горяева и фотонасадкой [5]. Дисперсионный анализ показал, что частицы суспензии имеют сферическую форму и близки по размерам. Средний радиус частиц составляет  $2 \cdot 10^{-5}$  м. Удельная поверхность частиц парафина, вычисленная по формуле

$$S_{уд} = \frac{S}{V \cdot \rho} = \frac{3}{r\rho},$$
 где  $S, V, \rho, r$  - соответственно поверхность, объем, плотность и

усредненный радиус частиц, равна  $0,2 \text{ м}^2/\text{г}$ . Электрокинетический потенциал частиц парафина, определенный методом микроэлектрофореза [6] равнялся  $-15 \text{ мВ}$ . Суспензию парафина вводили в систему в количестве 0,5 мл на 25 мл раствора ПАВ. Низкоэнергетический парафин, сорбирующий адсорбаты только поверхностью, во многих случаях является полезным для вскрытия физико-химических закономерностей адсорбции ПАВ в соответствующих средах. Изотермы адсорбции ПАВ определяли по убыли их концентрации в растворе в результате адсорбции. Методика проведения опытов по адсорбции заключалась в следующем. В стеклянную колбу емкостью 50 мл, содержащую 25 мл водного раствора ПАВ вводили парафин. Колбу закрывали хорошо притертой пробкой и встряхивали в течение времени, необходимого для установления адсорбционного равновесия. Затем отделяли раствор от осадка и анализировали на содержание ПАВ. Концентрацию ДДСН, ХДДА и Твинов определяли фотоколориметрически по методикам [7-9] соответственно.

## Обсуждение результатов

Проведенные исследования показали, что время установления равновесия между водным раствором ДДСН, ХДДА, Твинов и парафином составляет соответственно 60, 20 мин и 40 мин и не зависит от длины углеводородного радикала.

Кинетика адсорбции исследуемых ПАВ достаточно хорошо описывается уравнением, аналогичным уравнению реакции первого порядка:

$$\ln C = -k \cdot \frac{S}{V} \cdot t, \quad (1)$$

где  $C$  – концентрация ПАВ в момент времени  $t$ ;  $k$  – коэффициент внешнего массопереноса;  $S$  – поверхность обмена адсорбента;  $V$  – объем раствора, которые связаны между собой соотношением:

$$\frac{S}{V} = \frac{S_{уд} \cdot m}{V}, \quad (2)$$

где  $m$  – навеска адсорбента;  $S_{уд}$  – удельная поверхность адсорбента.

Значения констант скорости адсорбции составляют в случае ДДСН –  $0,58 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ , ХДДА –  $1,05 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ , Твина-40 –  $0,98 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ , Твина-60 –  $0,92 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$  и Твина-80 –  $0,82 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ . Для Твинов константа скорости уменьшается с увеличением длины углеводородного радикала, что связано со стерическими затруднениями молекул, имеющих большую молекулярную массу и разветвленную структуру.

В условиях проведения опытов скорость адсорбции исследуемых ПАВ определяется процессами массопереноса на границе раздела фаз и взаимодействием частиц адсорбата с внешней поверхностью адсорбента. Лимитирующей стадией процесса является диффузия адсорбируемых молекул (ионов) ПАВ из внешнего раствора. Рассчитанные коэффициенты внешней диффузии составляют для ДДСН –  $0,2 \cdot 10^{-6} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ , ХДДА –  $0,3 \cdot 10^{-6} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ , Твина-40 –  $0,3 \cdot 10^{-6} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ , Твина-60 –  $0,3 \cdot 10^{-6} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  и Твина-80 –  $0,3 \cdot 10^{-6} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ , что хорошо согласуется с данными, приведенными в [10].

Полученные изотермы адсорбции ДДСН, ХДДА и Твинов на поверхности парафина (рис. 1 и 2) имеют форму близкую к форме изотерм L-типа по классификации Джайлса [11] и характерны для случая адсорбции ПАВ с относительно небольшой длиной углеводородного радикала на поверхностях с малым числом адсорбционных центров [12].

Для описания процесса адсорбции и взаимодействия ДДСН, ХДДА и Твинов на поверхности парафина была проведена оценка применимости различных уравнений адсорбции (уравнения Темкина [13], Фрейндлиха [1], Лэнгмюра [13], Хилла–де Бура [14], а также уравнения Гильдебранда, полученного в рамках решеточной модели [15]).

Проверку соответствия экспериментальных изотерм адсорбции осуществляли методом линеаризации.

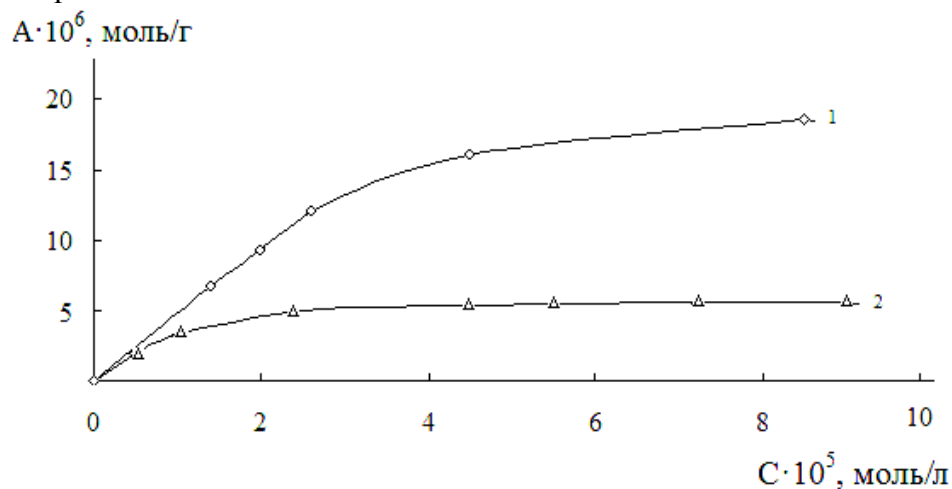


Рис. 1. Изотермы адсорбции ХДДА (1) и ДДСН (2) на парафине  $T=293 \text{ К}$ ,  $\text{pH}$  раствора 5,6

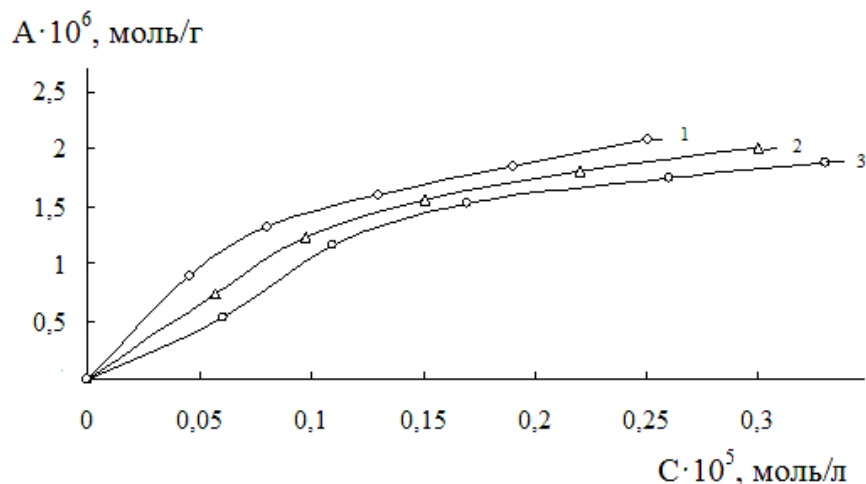


Рис. 2. Изотермы адсорбции Твина-40 (1), Твина-60 (2) и Твина-80 (3) на парафине.  $T=293$  К, pH раствора 5,6

Уравнение Темкина:

$$\theta = \frac{1}{\alpha} \ln K + \frac{1}{\alpha} \ln C_p, \quad (3)$$

где  $\alpha$  - константа, характеризующая линейное распределение адсорбционных центров по энергии;  $\theta$  - степень заполнения поверхности;  $K$  - константа адсорбционного равновесия, отвечающая максимальной теплоте адсорбции (константа Лэнгмюра);  $C_p$  - равновесная концентрация, учитывающее линейное распределение адсорбционных центров по энергиям выполняется при небольших заполнениях поверхности парафина: для адсорбции ДДСН  $\theta=0,3-0,45$ , ХДДА  $\theta=0,25-0,4$  и для Твинов  $\theta=0,1-0,5$ . Значение постоянной  $\alpha$  составляет 2,2 и не зависит от природы ПАВ.

Решение уравнения Фрейндлиха:

$$\ln A = \ln \beta_\phi + \frac{1}{n} \ln C_p, \quad (4)$$

где  $A$  - адсорбция ПАВ, соответствующая равновесной концентрации  $C_p$ ;  $\beta_\phi$  и  $n$  - константы адсорбции, с помощью линии тренда в программе Excel с высокой точностью ( $R^2 = 0,99$ ) показало, что в области концентраций  $(2,4 - 7,2) \cdot 10^{-5}$ ,  $(2,0 - 4,5) \cdot 10^{-5}$  и  $(0,08 - 0,22) \cdot 10^{-5}$  моль/л для адсорбции ДДСН, ХДДА и Твинов соответственно на поверхности парафина оно выполняется (табл.1).

Особенности изотерм адсорбции исследуемых ПАВ отражаются на величине параметра  $n$ , значения которого согласуются с коэффициентом упорядоченности  $\alpha$  (уравнение Гильдебранда). В случае адсорбции ДДСН и ХДДА парафином  $n > 1$ , что свидетельствует об идеальном характере адсорбции, доля адсорбированных ионов (молекул) ДДСН и ХДДА в этой области мала, чтобы они могли взаимодействовать между собой. По-видимому, образуется разреженный адсорбционный слой, в котором углеводородные радикалы располагаются под некоторым углом к поверхности, а полярные группы обращены вглубь раствора. При адсорбции Твинов значения  $n < 1$ . Согласно работам Джайлса [11] и расчетам, выполненным авторами [16,17], это свидетельствует об агрегации адсорбата на поверхности адсорбента. Весьма вероятно, что молекулы Твинов благодаря латеральным взаимодействиям их углеводородных радикалов образуют на поверхности парафина ассоциаты, т.е.

происходит определенная упаковка больших частиц Твинов в адсорбционном слое. На поверхности парафина одна молекула или агрегат могут занимать два или несколько адсорбционных центров. Для исследуемых Твинов значения  $\beta_\phi$ , имеющего физический смысл при единичной концентрации ПАВ, изменяются обратно пропорционально значениям  $n$ .

Таблица 1. Основные параметры адсорбции ДДСН, ХДДА и Твинов на парафине, полученные с использованием уравнений Фрейндлиха (1) и Гильдебранда (2)

$C \cdot 10^5$ , моль/л	$\beta_\phi$	$n$	$\alpha$	$k$	$-B$
ДДСН					
1 – (2.4–7.2)	8.6	2.8			
2 – (3.0–5.0)			0.4	16	107
ХДДА					
1 – (2.0–4.5)	5.7	1.8			
2 – (2.0–3.5)			0.6	18	110
Твин-40					
(0.07–0.2)	5.5	0.8	1.2	-	-
Твин-60					
(0.07–0.2)	4.6	0.9	1.1	-	-
Твин-80					
(0.08–0.2)	3.8	0.9	1.1	-	-

Использование уравнения Гильдебранда [15, 18]:

$$A = \frac{k \cdot C^\alpha}{RT - BC}, \quad (5)$$

где  $k = \alpha \cdot a$  ( $a$  – постоянная величина);  $B$  – удельная потенциальная энергия парных взаимодействий адсорбат-адсорбат, адсорбат-растворитель (вода), растворитель-растворитель в адсорбционной системе, позволяет рассчитать параметры  $k$ ,  $B$  и коэффициент упорядоченности  $\alpha$ , который должен удовлетворять условию неравенства  $0 < \alpha < 1$ .

Уравнение

$$\ln A = \ln k + \alpha \ln C - \ln RT, \quad (6)$$

использовали для определения  $k$  и  $\alpha$  при  $BC \ll RT$ , а уравнение (7)

$$BC = RT - \frac{A}{kC^\alpha}, \quad (7)$$

для определения параметра  $B$  по линейному участку изотермы при больших концентрациях при известных  $k$  и  $\alpha$ .

Значения величин  $k$ ,  $\alpha$  и  $B$  для адсорбции ДДСН, ХДДА и Твинов на парафине приведены в табл.1, из которой следует, что для адсорбции ионогенных ПАВ (ДДСН, ХДДА) выполняется неравенство  $0 < \alpha < 1$ . В то время как для адсорбции Твинов  $\alpha > 1$  и поэтому использование уравнения Гильдебранда для описания адсорбции последних на поверхности парафина является некорректным.

Значения  $\alpha$  совпадают с величиной  $\frac{1}{n}$  (уравнение Фрейндлиха), значения  $k$  и  $B$  зависят от природы исследуемых ионогенных ПАВ.

Уравнение Гильдебранда описывает небольшой участок изотерм адсорбции  $(3,0 - 5,0) \cdot 10^{-5}$  и  $(2,0 - 3,5) \cdot 10^{-5}$  моль/л для ДДСН, ХДДА соответственно, и учитывает взаимодействия ПАВ – растворитель и ПАВ – ПАВ.

Уравнение Лэнгмюра:

$$\frac{C_p}{A} = \frac{1}{A_\infty \cdot \beta_l} + \frac{C_p}{A_\infty}, \quad (8)$$

где  $A$  – адсорбция ХАА, соответствующая равновесной концентрации  $C_p$ ;  $A_\infty$  – максимальная (предельная) адсорбция;  $\beta_l$  – константа, которая связана с константой адсорбционного равновесия  $K_l$  выражением [19]:

$$K_l = \gamma \beta_l \frac{S_p}{S_a}, \quad (9)$$

где  $\gamma$  – число молей растворителя в 1 кг его массы;  $S_a$  и  $S_p$  – площади, занимаемые на поверхности адсорбента соответственно молекулами вещества, адсорбированного из раствора и молекулами воды, практически полностью описывает экспериментальные изотермы адсорбции ДДСН  $(0-9,0) \cdot 10^{-5}$ , ХДДА  $(0-8,5) \cdot 10^{-5}$  и Твинов  $(0-0,3) \cdot 10^{-5}$  моль/л (табл. 2).

Величины предельной адсорбции ПАВ ( $A_\infty$ ), найденные по тангенсу угла наклона прямой зависимости  $\frac{C_p}{A} = f(C_p)$  согласуются со значениями величин предельной адсорбции ПАВ, полученных с помощью математической обработки изотерм адсорбции в программе Table Curve Windows v1.10. Установлено, что с увеличением длины углеводородного радикала в молекуле Твинов, величина их предельной адсорбции несколько уменьшается. Это связано, на наш взгляд, с затруднением адсорбции молекул Твинов на поверхности парафина вследствие стерических эффектов.

В области плато площади, приходящие на молекулу ДДСН, ХДДА, Твина-40, Твина-60 и Твина-80 составляют  $18 \cdot 10^{-20}$  м,  $18 \cdot 10^{-20}$  м,  $12 \cdot 10^{-20}$  м,  $15 \cdot 10^{-20}$  м и  $17 \cdot 10^{-20}$  м соответственно. Эти значения существенно меньше площадей в насыщенном адсорбционном слое на границе раствор ПАВ – воздух приходящихся на молекулу ДДСН ( $S_{min} = 23 \cdot 10^{-20}$  м), ХДДА ( $S_{min} = 20 \cdot 10^{-20}$  м), Твина-40 ( $S_{min} = 34 \cdot 10^{-20}$  м) и Твина-60 ( $S_{min} = 39 \cdot 10^{-20}$  м), определенные по изотермам поверхностного натяжения [20-22].

Несовпадение площадей, приходящихся на одну молекулу ПАВ на разных границах фаз, позволяет предположить, что на поверхности парафина образуются агрегаты. На это косвенным образом указывают как отрицательные значения параметра  $B$ , так и значения  $n$ .

Адсорбционная активность ПАВ на поверхности парафина изменяется в ряду Твины > ХДДА > ДДСН, значения  $K_l$  велики  $((9-44) \cdot 10^6)$ , что характерно для систем с повышенной избирательностью адсорбции.

Уравнение Хилла де Бура, учитывающее Ван-дер-ваальсовское взаимодействие между адсорбируемыми молекулами [14]:

$$\frac{\theta}{1-\theta} + \ln \frac{\theta}{1-\theta} - \ln C_p = \ln K_1 - K_2 \theta, \quad (10)$$

где  $\theta = \frac{A}{A_\infty}$  – степень заполнения поверхности адсорбента адсорбатом;  $K_1$  и  $K_2$  – константы, характеризующие взаимодействие адсорбированных молекул (ионов) ПАВ с поверхностью адсорбента и между собой соответственно, описывает участок

экспериментальных изотерм адсорбции соответствующий большому заполнению поверхности адсорбента адсорбатом (для ДДСН  $\theta=0,3-0,7$ ; ХДДА -  $\theta=0,3-0,7$ ; Твинов -  $\theta=0,2-0,6$ ). Величина  $K_1$  имеет смысл, аналогичный константе адсорбционного равновесия  $K_d$ , так как в стандартных условиях при бесконечно малой величине  $\theta$  взаимодействие адсорбированных молекул между собой пренебрежительно мало. Как видно из табл. 2 величины  $\ln K_1$ , характеризующие способность Твинов концентрироваться на поверхности парафина, уменьшаются с ростом алкильной части молекулы Твинов. Можно предположить, что в области небольших равновесных концентраций адсорбция Твинов осуществляется за счет неспецифического дисперсионного взаимодействия парафина с индивидуальными молекулами, углеводородные радикалы которых ориентированы под некоторым углом к его поверхности [19]. Величины  $\ln K_1$  в ряду Твинов несколько выше, чем для ДДСН и ХДДА, что можно объяснить большой степенью гидратации последних. С возрастанием  $\theta$  существенную роль начинают играть гидрофобные взаимодействия между углеводородными радикалами молекул Твинов, адсорбированных на твердой поверхности, которое учитывается величиной  $K_2$ . Значения константы  $K_2$  высоки, что свидетельствует о значительном межмолекулярном взаимодействии между молекулами адсорбата и образовании ассоциатов на поверхности парафина в области больших концентраций. Кроме того, значения  $K_2$  несколько увеличиваются с увеличением длины углеводородного радикала Твинов.

Таблица 2. Основные параметры адсорбции ДДСН, ХДДА и Твинов на парафине, полученные с использованием уравнений Лэнгмюра и Хилла-де Бура

$C \cdot 10^5$ , моль/л	$A_{\infty} \cdot 10^6$ , моль/г	$K_L \cdot 10^{-6}$	$-\Delta G_{adc}^0$ , кДж/моль	$\ln K_1$	$K_2$
ДДСН					
(0–9.0)	6.2	9	33.5	6.7	13.7
ХДДА					
(0–8.5)	21.3	12	34.1	9.2	4.5
Твин-40					
(0–0.25)	2.9	44	37.1	11.4	8.6
Твин-60					
(0–0.3)	2.2	36	36.8	11.0	9.6
Твин-80					
(0–0.3)	2.0	26	36.0	9.0	10.7

Энергию адсорбционного взаимодействия ДДСН, ХДДА и Твинов с поверхностью парафина оценивали по величине стандартной свободной энергии Гиббса адсорбции ( $\Delta G_{adc}^0$ ), рассчитанной по уравнению:

$$\Delta G_{adc}^0 = \lim_{c \rightarrow 0} \Delta G_{adc}, \quad (11)$$

где 
$$\Delta G_{adc} = -RT \ln K_d, \quad (12)$$

За стандартное состояние принимали такое состояние системы, когда при бесконечно малой концентрации раствора ПАВ происходит бесконечно малое заполнение адсорбционного слоя.

Рассчитанные значения величины  $\Delta G_{ads}^0$  достаточно велики, что подтверждает физический характер адсорбции ( $\Delta G_{ads}^0 < 45$  кДж/моль), когда слабо адсорбирующиеся молекулы воды вытесняются из адсорбционного слоя сильно адсорбируемыми молекулами и ионами ПАВ, а неполярные части молекул ПАВ взаимодействуют с поверхностью парафина.

### Заключение

Таким образом, использованные уравнения изотерм адсорбции позволяют определить области концентраций, которые являются наиболее информативными для получения основных параметров процесса адсорбции исследуемых ПАВ на поверхности парафина, установить его механизм сорбции и высказать предположение о возможном строении адсорбционных слоев. Уравнение Лэнгмюра практически полностью описывает экспериментально полученные изотермы адсорбции ДДСН, ХДДА и Твинов на поверхности парафина. В области небольших концентраций как ионогенные (ДДСН, ХДДА), так и неионогенные (Твины) адсорбируются на поверхности парафина в виде индивидуальных ионов и молекул, углеводородные радикалы которых ориентированы под некоторым углом к поверхности. Адсорбция ДДСН, ХДДА и Твинов на низкоэнергетической твердой поверхности парафина обусловлена действием дисперсионных сил, о чем свидетельствуют значения параметров уравнения Темкина ( $\alpha = 2,2$  и не зависит от природы ПАВ), Фрейндлиха (для ДДСН и ХДДА  $n > 1$ ). По мере заполнения адсорбционного слоя (когда  $\theta \rightarrow 1$ ) существенную роль начинают играть гидрофобные взаимодействия между углеводородными радикалами молекул ПАВ, адсорбированных на твердой поверхности и находящихся в объеме раствора. Эти взаимодействия приводят к образованию ассоциатов ПАВ на твердой поверхности (уравнение Лэнгмюра  $A_{\infty} = (2,0 - 21,3) \cdot 10^{-6}$  моль/г, уравнение Хилла - де Бура ( $K_2 = 4,5 - 13,7$ )). Отметим, что агрегация молекул Твинов характерна даже для малых заполнений поверхности ( $\theta = 0,3$ ) (уравнение Фрейндлиха  $n < 1$ ). Термодинамическая оценка адсорбции исследуемых ПАВ на поверхности парафина позволяет его рекомендовать для использования в качестве адсорбента и флотационного носителя при адсорбционном и флотационном выделении из водных растворов анионных, катионных и неионогенных ПАВ.

### Список литературы

1. Парфит Г., Рочестер К. Адсорбция из растворов на поверхности твердых тел. М.: Мир, 1986. 488 с.
2. Шевурдяев О.Н., Белов П.С., Шнитов А.М. ПАВ. Свойства, технология, применение, экологические проблемы / Под ред. П.С. Белова. М.: Изд-во ВЗПИ, 1992. – 171 с.
3. Стрельцова О.О. Фізико-хімічні основи процесу виділення іоногенних поверхнево-активних речовин із водних розчинів та стічних вод / Одес. держ. ун-т. Одеса: Астропринт, 1997. 140 с.
4. Шварц А., Перри Дж. Поверхностно-активные вещества (их химия и техническое применение). М.: Инлитиздат, 1953. 544 с.
5. Практикум по коллоидной химии и электронной микроскопии / Под ред. С.С. Воюцкого, Р.М. Панича. М.: Химия, 1974. 224 с.



- 6.Руководство к практ. работам по коллоидной химии / О.Н.Григоров, И.Ф. Карнова, З.П. Козьмина и др. М.; Л.:Химия, 1964. 330с.
- 7.Лурье Ю.Ю. Унифицированные методы анализа вод. Изд. 2-е. М.: Химия, 1973. 376 с.
- 8.Абрамзон А.А., Зайченко Л.П., Файнгольд С.И. Поверхностно-активные вещества. Л.: Химия, 1988. 200 с.
- 9.Штыков С.Н., Сумина Е.Г., Чернова Р.К., Лемешкина Н.В. Новый экспрессный метод отдельного определения неионных и анионных поверхностно-активных веществ в сточных водах // Журн. аналит. химии. 1985. Т.11. Вып 5. С. 907-910.
10. Никифоров А.Ф., Локай О.В., Верхановский В.Г. Кинетика сорбции синтетических красителей гидролизным лигнином // Химия и технология воды. 1984. Т. 6. Вып 4. С. 304-307.
11. Giles C.H., Smith D., Huitson A.A. General treatment and adsorption isotherm. I. Theoretical // J. Colloid. and Interface Sci. 1974. Vol. 476. № 3. P. 755–756.
12. Харитоновна Т.В., Иванова Н.И., Сумм Б.Д. Адсорбция катионного и неионогенного ПАВ на поверхности SiO<sub>2</sub> из водных растворов. 1. Адсорбция бромидо додецилпиридиния и Тритона X-100 из индивидуальных растворов // Коллоид. журн. 2005. Т. 67. Вып 2. С. 274-280.
13. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии (Поверхностные явления и дисперсные системы): учебник для вузов. М.: Химия, 1982. 400 с.
14. Де Бур Я. Динамический характер адсорбции. М.: Инлитиздат, 1962. 290 с.
15. Hildebrand J.H., Scott R. Solubility of Non Electrolytes. New York: 1949. 325 p.
16. Пушкарев В.В., Трофимов Д.И. Физико-химические особенности очистки сточных вод от поверхностно-активных веществ. М.: Химия, 1975. 144 с.
17. Голуб Т.П., Коopal L.K., Сидорова М.П. Адсорбция катионных ПАВ на поверхности оксида кремния. 1. Изотермы адсорбции и поверхностный заряд // Коллоид. журн. 2004. Т. 66. Вып 1. С. 43-48.
18. Kutarov V.V., Kats V.M. Using of the lattice model for description of isotherms of organic substances adsorption from water solutions // Adsorption Science & Technology. 2001. Vol. 19. N 4. P. 273-278.
19. Когановский А.М., Левченко Т.М., Кириченко В.А. Адсорбция органических веществ из воды. К.: Наук. думка, 1977. 223 с.
20. Стрельцова О.О., Волювач О.В. Аналіз міжчастинкової взаємодії хлориду додецилпіридинію і Твіну в змішаних водних розчинах // Укр. хим. журн. 2010. Т.76. Вып 11-12. С. 73-76.
21. Ямпольская Г.П., Задымова Н.М., Тарасевич Б.Н., Еленский А.А. Исследование взаимодействия неионного поверхностно-активного вещества (Твин-80) с сывороточным альбумином оптическими методами // Вестн.Моск.ун-та. Сер. 2, Химия. 2004. Т. 45, N 6. С. 375 – 382.
22. Ding Hui-Jui, Wu Xian-Liang Мицеллообразование и адсорбция в смешанных водных растворах додецилсульфата натрия и октилтриметиламмоний бромида // Acta Chim. Sin. 1985. Vol. 43, № 7. P. 603-610.

---

**Стрельцова Елена Алексеевна** – д.х.н., проф. кафедры физической и коллоидной химии, Одесский национальный университет имени И.И. Мечникова, Одесса, тел. (0482)-68-50-33

**Гросул Алина Александровна** – аспирант кафедры физической и коллоидной химии, Одесский национальный университет имени И.И. Мечникова, Одесса

**Streltsova Elena A.** – doctor of chemistry science, professor of department physical and colloid chemistry, Odessa National University named after I.I. Mechnikov, tel. (0482)-68-50-33, Odessa

**Grosul Alina A.** – postgraduate of department physical and colloid chemistry, Odessa National University named after I.I. Mechnikov, Odessa, [A-Grosul-11@yandex.ua](mailto:A-Grosul-11@yandex.ua)