

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 544-77: 544-72

**СООТНОШЕНИЕ ВЕЛИЧИН АДСОРБЦИИ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНОГО ВЕЩЕСТВА НА РАЗЛИЧНЫХ МЕЖФАЗНЫХ ГРАНИЦАХ ПРИ СМАЧИВАНИИ ГИДРОФОБНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВОДНЫМИ РАСТВОРАМИ ТРИТОН X-100**

**Валентина Дмитриевна Должикова, Юлия Геннадиевна Богданова**

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, химический факультет, Москва, Россия

**Автор, ответственный за переписку:** Юлия Геннадиевна Богданова, yulibogd@yandex.ru

**Аннотация.** На основании изотерм адгезионного натяжения  $\gamma_{LV} \cdot \cos\theta = f(\gamma_{LV})$  рассмотрено соотношение величин адсорбции поверхностно-активного вещества (ПАВ) на границах раздела раствор / твердая поверхность ( $\Gamma_{SL}$ ) и раствор / воздух ( $\Gamma_{LV}$ ) при смачивании тефлона и полистирола водными растворами неионогенного ПАВ Тритона X-100 (ТХ-100). Подход, представленный в работе, демонстрирует возможность прогнозирования смачиваемости гидрофобных поверхностей при решении практических задач, используя существующий банк данных по поверхностному натяжению водных растворов ПАВ и их адсорбции на поверхности твердых адсорбентов.

**Ключевые слова:** смачивание, краевые углы, поверхностно-активные вещества, адсорбция

DOI: 10.55959/MSU0579-9384-2-2026-67-3-197-205

**Финансирование.** Работа выполнена по госбюджетной тематике НИР (номер ЦИТИС: 121031300084-1).

**Для цитирования:** Должикова В.Д., Богданова Ю.Г. Соотношение величин адсорбции поверхностно-активного вещества на различных межфазных границах при смачивании гидрофобных поверхностей водными растворами Тритон X-100 // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. 2026. Т. 67. № 3. С. 197–205.

ORIGINAL ARTICLE

**RATIO OF SURFACTANT ADSORPTION VALUES AT VARIOUS INTERFACES WHEN WETTING HYDROPHOBIC SURFACES WITH AQUEOUS SOLUTIONS OF TRITON X-100**

**Valentina D. Dolzhikova, Yulia G. Bogdanova**

Lomonosov Moscow State University Lomonosov Moscow State University, Faculty of Chemistry, Moscow, Russia

**Corresponding author:** Yulia G. Bogdanova, yulibogd@yandex.ru

**Abstract.** Based on the adhesion tension isotherms  $\gamma_{LV} \cdot \cos\theta = f(\gamma_{LV})$ , the relationship between the adsorption values of surfactants at the solution/solid surface ( $\Gamma_{SL}$ ) and solution/air ( $\Gamma_{LV}$ ) interfaces is examined by wetting Teflon and polystyrene with aqueous solutions of the nonionic surfactant Triton X-100 (TX-100).

The approach presented in this paper demonstrates the feasibility of predicting the wettability of hydrophobic surfaces for practical applications, using an existing database on the surface tension of aqueous surfactant solutions and their adsorption on the surface of solid adsorbents.

**Keywords:** wetting, contact angles, surfactants, adsorption

**Financial Support.** The work was carried out on the state budget topic of research (CITIS number: 121031300084-1).

**For citation:** Dolzhikova V.D., Bogdanova Yu.G. Ratio of Surfactant Adsorption Values at Various Interfaces when Wetting Hydrophobic Surfaces with Aqueous Solutions of Triton X-100 // Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 2. Khimiya. 2026. T. 67. № 3. S. 197–205.

Поверхностно-активные вещества (ПАВ) широко используются для управления смачиванием, растеканием, адгезией и применяются во многих практических приложениях (очистка поверхностей, нанесение покрытий, нефтеотдача, флотация, очистка сточных вод и многое другое). Как правило, определяющим в этих практических приложениях является характер смачивания твердой поверхности жидкостью. Для регулирования смачивания весьма эффективно использовать ПАВ, действие которых определяется их адсорбцией на границах раздела контактирующих фаз.

Изотермы краевых углов при смачивании твердых поверхностей водными растворами ПАВ могут быть чрезвычайно информативными при анализе адсорбции ПАВ на границах раздела фаз, участвующих в смачивании.

Величина равновесного краевого угла  $\theta$  капли жидкости на твердой поверхности определяется уравнением Юнга (1):

$$\cos \theta = (\gamma_{SV} - \gamma_{SL}) / \gamma_{LV}, \quad (1)$$

где  $\gamma_{SV}$ ,  $\gamma_{SL}$  и  $\gamma_{LV}$  – значения удельной свободной поверхностной энергии границ раздела твердое тело / газ, твердое тело / жидкость и поверхностное натяжение жидкости соответственно. При анализе процессов смачивания, растекания и обеспечения оптимальных условий адгезии необходимо принимать во внимание адсорбцию ПАВ ( $\Gamma$ ) на границах раздела контактирующих фаз и рассматривать изменение удельных свободных поверхностных энергий в результате адсорбции. Удобной моделью такого рассмотрения является система низкоэнергетическая (гидрофобная) поверхность/раствор ПАВ. К таким поверхностям относится большинство полимеров ( $\gamma_{SV} < 60$  мДж/м<sup>2</sup>). В зависимости от природы функциональных групп на поверхности и плотности

их упаковки величина удельной свободной поверхностной энергии меняется в пределах от 20 до 45 мДж/м<sup>2</sup> [1, 2].

Известно, что при смачивании низкоэнергетических поверхностей чистыми жидкостями и растворами углеводородных ПАВ величина  $\gamma_{SV} \approx \text{const}$ , а величина адсорбции на границе твердое тело / газ  $\Gamma_{SV} = 0$  [3, 4]. Это связано с отсутствием адсорбционных слоев жидкости или ПАВ перед линией трехфазного контакта. Отсутствие адсорбционного слоя ПАВ перед фронтом капли показано, например, методом автордиографии при смачивании тефлона и парафина растворами бромиды цетилтриметиламмония, молекулы которого содержали тритиевую метку [5].

Исключением являются фторуглеродные ПАВ, для которых измерение краевых углов дает значения, превышающие равновесные величины и  $\gamma_{SV} \neq \text{const}$ , что обусловлено явлением автофобности в результате образования адсорбционного слоя ПАВ на твердой поверхности перед линией трехфазного контакта [6–8].

Влияние адсорбции ПАВ на разных межфазных границах на характер смачивания гидрофобной поверхности можно учесть, комбинируя уравнения Юнга и Гиббса, и в результате получить соотношение (2) [7]:

$$[d(\gamma_{LV} \cdot \cos \theta)] / d\gamma_{LV} = (\Gamma_{SV} - \Gamma_{SL}) / \Gamma_{LV}, \quad (2)$$

где  $\Gamma_{SV}$ ,  $\Gamma_{SL}$  и  $\Gamma_{LV}$  – адсорбция на соответствующих границах раздела при смачивании ( $S$  – твердое тело,  $L$  – жидкость,  $V$  – газ). Поскольку для растворов классических ПАВ  $\Gamma_{SV} = 0$ , угол наклона зависимости адгезионного натяжения от поверхностного натяжения раствора  $\gamma_{LV} \cdot \cos \theta = f(\gamma_{LV})$  дает возможность сопоставить адсорбцию ПАВ на границах жидкость / твердое тело и жидкость / газ ( $\Gamma_{SL} / \Gamma_{LV}$ ) на основании экспериментальных

значений краевых углов. Анализ соотношения ( $\Gamma_{SL}/\Gamma_{LV}$ ) позволяет прогнозировать изменение краевых углов при смачивании гидрофобной поверхности растворами ПАВ. Известно, например, что краевые углы растворов ПАВ на гидрофобных поверхностях могут быть больше краевых углов чистых жидкостей с таким же поверхностным натяжением. Эти результаты связывают с меньшей адсорбцией ПАВ на границе твердая поверхность / раствор по сравнению с границей раствор / воздух ( $\Gamma_{SL} < \Gamma_{LV}$ ) [7, 9].

Неионогенные ПАВ являются прекрасными смачивателями, характеризуются высоким моющим действием, стойкостью в жесткой воде, хорошей биоразлагаемостью, эффективно действуют с добавками других ПАВ.

Цель работы – провести анализ соотношения величин адсорбции неионогенного ПАВ на межфазных границах при смачивании полимеров растворами неионогенного ПАВ и сопоставить полученные результаты с изменением экспериментальных значений краевых углов.

### Экспериментальная часть

В работе использовали мицеллообразующее неионогенное ПАВ – Тритон X-100 (TX-100, Serva, Германия, чистота >99%,  $M = 646$ ), среднее число оксиэтильных групп в полиоксиэтиленовой цепи  $n = 9,9$  (табл. 1). Растворы готовили последовательным разбавлением исходного раствора концентрации  $C = 10^{-2}$  М, область исследованных концентраций  $C = (10^{-7} - 10^{-2})$  М, рН 6,5. Поверхностное натяжение растворов  $\gamma_{LV}$  определяли методом Вильгельми с использованием платиновой пластинки размером (1,0×1,0×0,1) см. Точность определения  $\Delta \gamma_{LV} = \pm 0,5$  мДж/м<sup>2</sup>.

Были использованы пластинки тефлона-4, (ТФ) размером (1,00×0,50×0,05) см. Полистирол

(ПС) был синтезирован в Институте проблем химической физики РАН, средневесовая молярная масса  $M_w = 4,3 \times 10^4$ , отношение значений средневесовой и среднечисловой молярной массы  $M_w/M_n = 2,1$ , остаточное количество мономера 0,2–0,3%. Пленки ПС наносили из 0,5%-го раствора полимера в толуоле на твердый носитель – алюминиевые пластинки размером (2,0×1,0×0,1) см и кварцевые резонаторы с площадью поверхности ~0,5 см<sup>2</sup>. После испарения растворителя определяли толщину пленок ( $h$ ) методом пьезокварцевого микровзвешивания (ПМ) [10, 11]. Она составила  $h \approx 200$  нм.

Поверхности полимеров аттестовали по краевым углам натекания ( $\theta_a$ ) и оттекания ( $\theta_r$ ) воды:  $\theta_a = 120$  град.,  $\theta_r = 118$  град. и  $\theta_a = 86$  град.,  $\theta_r = 83$  град. для ТФ и ПС соответственно. Небольшой гистерезис краевых углов  $\Delta\theta = \theta_a - \theta_r$  свидетельствует о достаточной однородности поверхности. Краевые углы измеряли с помощью горизонтального микроскопа с гониометром [11]. Точность измерений краевых углов составила  $\pm 1$  град..

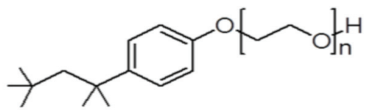
Адсорбцию TX-100 на полистироле определяли методом пьезокварцевого микровзвешивания (ПМ) [11]. Величину адсорбции  $\Gamma$  рассчитывали по уравнению:

$$\Gamma = -1,76 \Delta f \cdot 10^{-8} [\text{г/см}^2], \quad (3)$$

где  $\Delta f$  – разница частоты колебаний кварцевого резонатора (датчика микровесов) до и после адсорбции. Используются резонаторы с серебряными электродами и собственной частотой колебаний  $f_0 = 5$  МГц. Частоту колебаний  $f$  определяли с точностью  $\pm 0,1$  Гц, точность определения адсорбции  $\pm 1,76 \times 10^{-9}$  г/см<sup>2</sup> или с учетом молекулярной массы TX-100 составила  $\pm 0,03$  моль/м<sup>2</sup>. Все измерения были проведены при 20 °С.

Т а б л и ц а 1

Характеристики Тритона X-100

Структурная формула	Молекулярная масса, г/моль	Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	ККМ, М
 <p><math>n = 9-10</math></p>	646	1,07	$2,2 \times 10^{-4}$

### Результаты и обсуждение

Изотермы краевых углов смачивания поверхностей тефлона и полистирола (рис. 1) демонстрируют корреляцию с изотермой поверхностного натяжения растворов ТХ-100 (рис. 2). Излом на изотермах  $\theta = f(C)$  и  $\gamma_{LV} = f(C)$  соответствует критической концентрации мицеллообразования (ККМ) ТХ-100 ( $2,2 \times 10^{-4}$  М). Полученное значение ККМ согласуется литературными данными (табл. 1) [12, 13]. Значения  $\theta_a = \text{const}$  при  $C \geq \text{ККМ}$  обусловлены с одной стороны, постоянным значением поверхностного натяжения раствора в мицеллярной области концентраций ( $d\gamma_{LV}/dC = 0$ ), а с другой – достижением в этой

области предельно возможной степени гидрофилизации поверхности полимеров, т.е. величина  $(d\gamma_{SL}/dC) = 0$ . В результате при  $C \geq \text{ККМ}$  краевые углы имеют постоянное значение, а измерение краевых углов растворов мицеллообразующих ПАВ на низкоэнергетических поверхностях может быть использовано в качестве метода определения ККМ.

По изотерме  $\gamma_{LV} = f(\lg C)$  была определена предельная адсорбция ТХ-100 на границе раствор / воздух:  $\Gamma_{m(LV)} = 3,4 \times 10^{-6}$  моль/м<sup>2</sup>, площадь на молекулу ПАВ в адсорбционном слое составила  $S_m = 0,49$  нм<sup>2</sup>, что близко к результатам, полученным в работе [13].

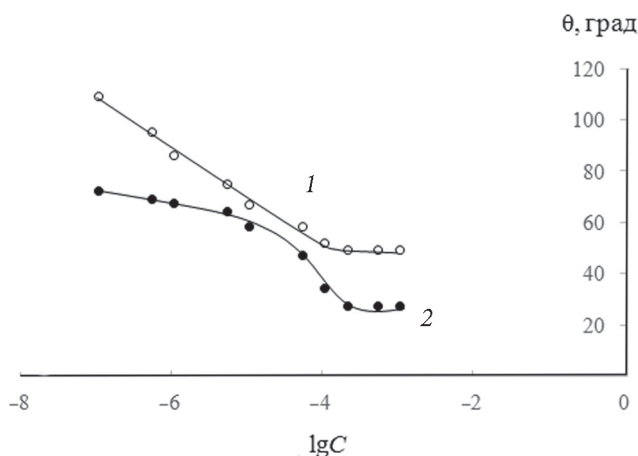


Рис. 1. Изотермы краевых углов водных растворов ТХ-100 на поверхностях тефлона (1) и полистирола (2)

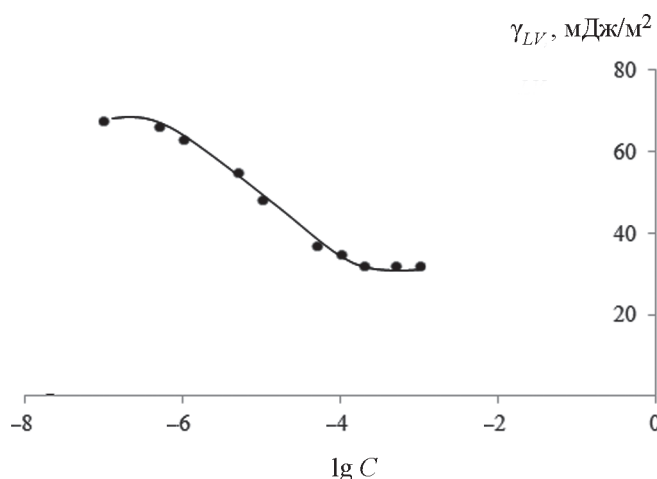


Рис. 2. Изотерма поверхностного натяжения водного раствора ТХ-100

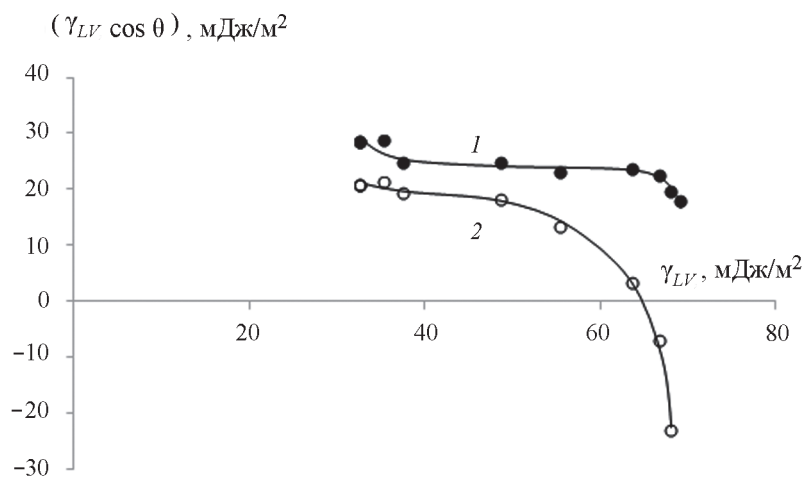


Рис. 3. Зависимости адгезионного натяжения водных растворов TX-100 на поверхностях тефлона (1) и полистирола (2) от поверхностного натяжения растворов

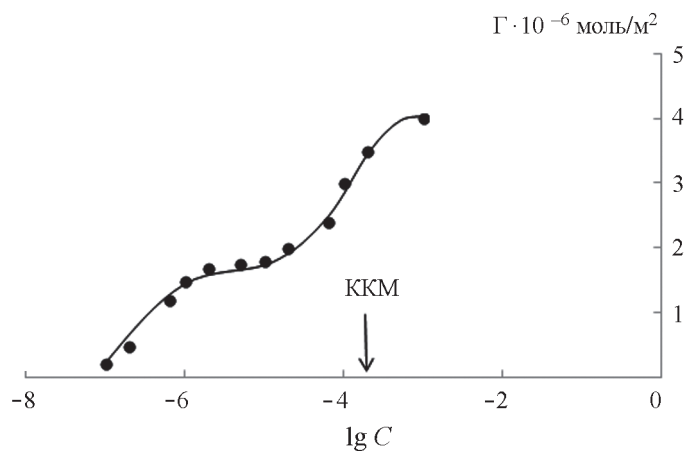


Рис. 4. Изотерма адсорбции TX-100 из водных растворов на поверхности полистирола (метод ПМ)

Анализ изотерм  $\gamma_{LV} \cdot \cos \theta = f(\gamma_{LV})$  показывает, что в узкой области малых концентраций ( $C = 10^{-7} - 10^{-6}$ ) М адсорбция TX-100 на границе полимер/раствор в 3 раза выше адсорбции на границе раствор / воздух (рис. 3), что может быть связано с формированием «островковой» структуры адсорбционного слоя ПАВ на твердой поверхности. Такие же результаты для области малых концентраций ПАВ были получены, например, в работе по смачиванию графена растворами додецилсульфата натрия [7]. «Островковая» структура адсорбционного слоя ПАВ в области низких концентраций рассматривается в ряде работ и подтверждена методом автордиографии, а также декорированием твердой поверхности, модифицированной

растворами ПАВ, с помощью нематических жидких кристаллов [14, 15].

При увеличении концентрации раствора в довольно широкой области средних значений концентрации  $\Gamma_{LV} \geq \Gamma_{SL}$ . Однако при концентрации ПАВ в растворе меньше ККМ адсорбция на твердой поверхности возрастает: изотерма  $\gamma_{LV} \cdot \cos \theta = f(\gamma_{LV})$  демонстрирует соотношение  $\Gamma_{SL} > \Gamma_{LV}$  во всей области концентраций до ККМ и выше, что связано с поверхностной агрегацией молекул TX-100 и образованием полумицелл на поверхности полимера [14]. Наиболее значительный эффект увеличения адсорбции наблюдается на полистироле, что, вероятно, обусловлено наличием  $\pi$ -сопряженных связей в молекулах TX-100 и структуре полистирола

[16]. Поверхностное агрегирование отмечалось в ряде работ при изучении адсорбции неионогенных мицеллообразующих ПАВ на поверхности гидрофобных адсорбентов [17, 18].

Начало поверхностного агрегирования молекул TX-100 на полистироле при концентрациях  $C < \text{ККМ}$  в объеме раствора подтверждают данные прямого метода (ПМ) измерения адсорбции TX-100 на пленках ПС (рис. 4): изотерма  $\Gamma(C)$  демонстрирует возрастание адсорбции TX-100 уже при  $C < \text{ККМ}$ . Плато на изотерме  $\Gamma(C)$  соответствует значению предельной адсорбции  $\Gamma_{m(SL)} = 1,82 \times 10^{-6}$  моль/м<sup>2</sup>. Резкое увеличение адсорбции при  $C > \text{ККМ}$  можно связать с адсорбцией мицелл из раствора [17].

Измерение краевых углов воды на поверхности ПС, модифицированной растворами TX-100, свидетельствует о структурной перестройке адсорбционного слоя ПАВ в области концентраций, соответствующих плато на изотерме  $\Gamma(C)$ : оксиэтильные фрагменты молекул TX-100 постепенно вытесняются углеводородными цепями с поверхности ПС и, ориентируясь в сторону раствора, гидрофилизуют подложку, о чем свидетельствует монотонное уменьшение краевых углов натекания воды на предварительно модифицированной поверхности полистирола во всей области исследованных концентраций модифицирующего раствора (рис. 5).

Таким образом, в области малых значений концентрации уменьшение краевых углов

определяется адсорбцией ПАВ на границе полимер / раствор, однако это снижение не столь значительное, так как «островки» не полностью экранируют поверхность подложки. В области средних концентраций ПАВ уменьшение краевых углов определяется в основном величиной  $\Gamma_{LV}$ . Для усиления эффекта снижения краевых углов можно использовать добавки катионных ПАВ. Показано, что, несмотря на небольшой синергетический эффект снижения поверхностного натяжения, присутствие катионного ПАВ значительно увеличивает адсорбцию TX-100 на границе ПС/раствор и уменьшает значения краевых углов [19]. Значительное снижение краевых углов происходит при концентрациях меньше ККМ в объеме раствора, когда  $\Gamma_{SL} > \Gamma_{LV}$  в результате поверхностного агрегирования молекул TX-100.

Максимальная адсорбция TX-100 на границе полимер / раствор ( $\Gamma_{m(SL)}$ ) была определена с использованием изотерм  $\gamma_{LV} \cos \theta = f(\lg C)$  по тангенсу угла наклона прямолинейного участка кривых (рис. 6) и рассчитана по уравнению:

$$\Gamma_{m(SL)} = \frac{d(\gamma_{LV} \cos \theta)}{2,3RTd(\lg C)}, \quad (4)$$

В табл. 2 представлены значения  $\Gamma_{m(SL)}$  и размер площадки  $S_{m(SL)}$ , приходящейся на молекулу ПАВ в адсорбционном слое. Эта величина согласуется с данными метода ПМ.

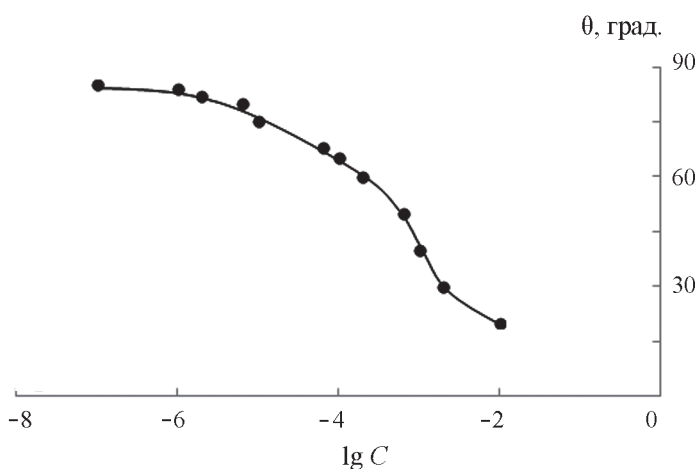


Рис. 5. Зависимости краевых углов натекания воды на поверхности полистирола, модифицированной растворами TX-100, от концентрации модифицирующего раствора от концентрации растворов

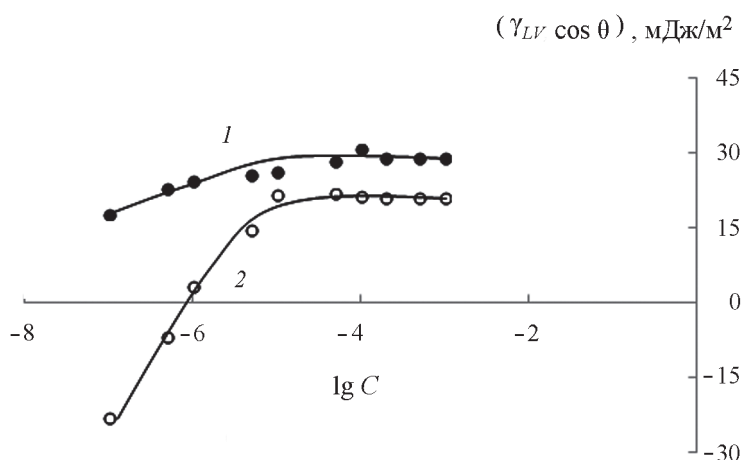


Рис. 6. Зависимости адгезионного натяжения водных растворов ТХ-100 на поверхностях тефлона (1) и полистирола (2) от концентрации растворов

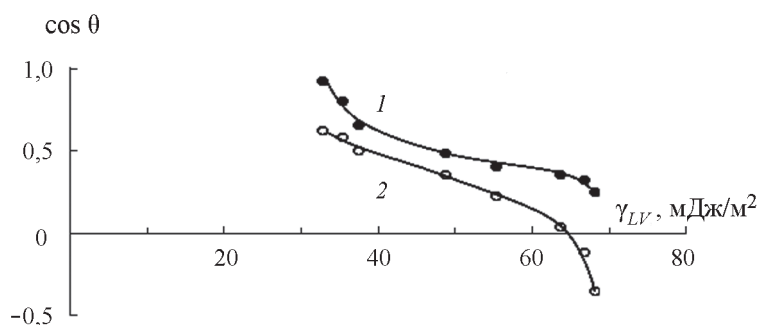


Рис. 7. Зависимости косинусов краевых углов водных растворов ТХ-100 на поверхностях тефлона (1) и полистирола (2) от поверхностного натяжения растворов

Полученные результаты показывают, что при смачивании тефлона растворами ТХ-100  $\Gamma_{(m)SL} \approx \Gamma_{(m)LV}$ , т.е. адсорбционные слои на границе ТФ/раствор и раствор/воздух имеют одинаковое строение. Такое же соотношение величин предельной адсорбции получено при смачивании гидрофобизованного стекла растворами ТХ-100 [13]. При смачивании полистирола  $\Gamma_{(m)SL} < \Gamma_{(m)LV}$ , что может быть связано с образованием адсорбционных слоев ТХ-100 с преимущественной ориентацией углеводородной части молекул параллельно поверхности полимера и отклонением оксиэтильных групп в сторону раствора. Рассчитанное значение  $\Gamma_{m(SL)}$  для границы ПС/раствор (табл. 2) согласуется с результатом, полученным методом ПМ (рис. 4).

Зависимость  $\cos \theta = f(\gamma_{LV})$  дает возможность определить критическое поверхностное натяжение  $\gamma_c$  подложек при смачивании поверх-

ностей растворами ТХ-100 (рис. 7). Экстраполяция конечного участка прямых до  $\cos \theta = 1$  дает величины  $\gamma_c$ , равные 19 и 36 мДж/м<sup>2</sup> для ТФ и ПС соответственно. По литературным данным, для ТФ  $\gamma_c = (18-20)$  мДж/м<sup>2</sup> [2], для ПС  $\gamma_c = (29-40)$  мДж/м<sup>2</sup> [20-22].

### Заключение

В работах по исследованию смачивания низкоэнергетических поверхностей растворами ПАВ анализ изотерм краевых углов ограничивается, как правило, рассмотрением изменения удельных свободных поверхностных энергий в результате адсорбции на границах раздела жидкость/газ и жидкость/твердое тело. Однако практически никогда не проводится сопоставление величин адсорбции ПАВ на этих границах раздела, хотя это может быть весьма информативным при выборе ПАВ для управления смачиванием.

Значения предельной адсорбции  $\Gamma_m$  и площади  $S_m$ , занимаемой одной молекулой TX-100 в адсорбционном слое на границе полимер/раствор

Полимер	$\Gamma_m \times 10^6$ , моль/м <sup>2</sup>	$S_m$ , нм <sup>2</sup>
Тефлон	3,2	0,52
Полистирол	1,7	0,98

На примере неионогенного ПАВ показано, что характер смачивания гидрофобных поверхностей растворами ПАВ определяется соотношением величин адсорбции ПАВ ( $\Gamma_{SL}/\Gamma_{LV}$ ) на границах раздела фаз, участвующих в смачивании (твердое тело/раствор и раствор/воздух), которое может различаться в разных областях концентрации растворов ПАВ. Наиболее эффективное снижение краевых углов происходит в предмицеллярной области концентраций, когда  $\Gamma_{SL} > \Gamma_{LV}$ . В области средних концентраций ( $\Gamma_{SL}/\Gamma_{LV} < 1$ ) обеспечение условия  $\Gamma_{SL} > \Gamma_{LV}$  возмож-

но за счет использования композиций ПАВ для увеличения снижения межфазного натяжения  $\gamma_{SL}$  и улучшения смачивания. В настоящее время существует огромный банк данных по поверхностному натяжению растворов ПАВ и их адсорбции на различных гидрофобных материалах. Использование этих справочных данных и подхода, описанного в работе, дает возможность контролировать характер смачивания низкоэнергетических поверхностей растворами, содержащими ПАВ, и прогнозировать эффективность ПАВ при решении практических задач.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Сумм Б.Д., Горюнов Ю.В. Физико-химические основы смачивания и растекания, М., 1979.
- Адамсон А. Физическая химия поверхностей. М., 1979.
- Kloubek J. // Adv. Coll. Int. Sci. 1992. Vol. 38. P. 99 (DOI: 10.1016/0001-8686(92)80044-X).
- Vojtechovska J., Kvitek L. // Acta Univ. Palacky. Olomouc. Chemica 44. 2005. P. 25.
- Соболева О.А., Сумм Б.Д. // Коллоид. журн. 2003. Т. 65. № 1. С. 99 [Soboleva O.A., Summ B.D. // Colloid J. 2003. Vol. 65. № 1. P. 89 (DOI: 1061-933X/03/6501)].
- Bernett M.K., Zisman W.A. // J. Phys. Chem. 1959. Vol. 63. P. 1241. (DOI: 10.1021/j150578a006).
- Pyter R.A., Zograf G., Mukerjee P. // J. Coll. Int. Sci. 1982. Vol. 89. № 1. P. 144 (DOI: 10.1016/0021-9797(82)90128-X).
- Yan F., Ma Che., Gong Q., Jin Zh., Ma W., Xu Z., Zhang L., Zhang L. // Chemistry. 2024. Vol. 6. № 5. P. 1063 (DOI: org/10.3390/chemistry 6050061).
- Liu D-D., Xu Zh-Ch., Zhang L., Liu D.D., Xu Z.C., Zhang L., Luo L., Zhang L., Wei T.X., Zhao S. // Langmuir. 2012. Vol. 28. P. 16845 (DOI: org/10.1021/la 3040492).
- Sauerbrey G. // Z. Physik. 1959. Vol. 155. P. 206 (DOI: 10.1007/BF01337937).
- Должикова В.Д., Богданова Ю.Г. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. 2023. Т. 64. №6. с. 549 (DOI: 10.55959/MSU0579-9384-2-2023-64-4-549-558) [Dolzhikova V.D., Bogdanova Yu.G. // Moscow Univ. Chem. Bul. 2023. Vol. 78. № 6. P. 331 (DOI: 10.3103/S0027131423060044)].
- Поверхностно-активные вещества. Справочник. / под ред. А.А. Абрамзона и Г.М. Гаевого. Л., 1979.
- Xing X., Lorenc S.D.N. // Colloids and Surf. A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2024. Vol. 684. P. 1 (DOI: org/10.1016/j.colsurfa. 2023.133109).
- Холмберг К., Йенссон Б., Кронберг Б., Линдман Б., Поверхностно-активные вещества и полимеры в водных растворах. М., 2007.
- Должикова В.Д., Богданова Ю.Г., Сумм Б.Д., Коробков В.И. // Коллоид. журн. 2005. Т. 67. № 2. С. 26 [Dolzhikova V.D., Bogdanova Yu. G., Summ B.D., Korobkov V.I. // Colloid J. 2005. Vol. 67. № 1. P. 21 (DOI: 1061-933X/05/6701)].
- Clayden J., Greeves N., Warren S., Wothers P. Organic Chemistry. NY:Oxford Univ. Press, 2012.
- Клименко Н.А., Трясорукова А.К., Пермиловская А.А. // Коллоид. журн. 1974. Т. 36. № 4. С. 678.
- Адсорбция из растворов на поверхностях твердых тел / под. ред. Г. Парфита и К. Рочестера. М., 1986.
- Богданова Ю.Г., Должикова В.Д., Бадун Г.А., Сумм Б.Д. // Изв. АН. Сер.хим. 2003. Т. 52. № 11. С. 2226 [Bogdanova Y. G., Dolzhikova V. D., Badun G. A., Summ B. D. // Rus. Chem. Bul. 2003. Vol. 52. № 11. P. 2352 (DOI: 10.1023/B:RUCB.0000012355.12717.86)].
- Hamilton W.C. // J. Coll. Int. Sci. 1972. Vol. 40. № 2. P. 219 (DOI: 10.1016/0021-9797(72)90011-2).
- Lee L-H. // Langmuir. 1996. Vol. 12. P. 1681 (DOI: 10.1021/la950725u).
- Ямпольская Г.П., Должикова В.Д. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. 2007. Vol. 48. № 1. С. 33 [Yampolskaya G. P., Dolzhikova V.D. // Moscow Univ. Chem. Bul. 2007. Vol. 62. № 1. P. 27 (DOI: 10.3103/S0027131407010075)].

### **Информация об авторах**

Валентина Дмитриевна Должикова – вед. науч. сотр. кафедры коллоидной химии химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (valentinadolzh@mail.ru);

Юлия Геннадиевна Богданова – ст. науч. сотр. химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (yulibogd@yandex.ru).

### **Вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### **Соблюдение этических стандартов**

В данной работе отсутствуют исследования человека и животных.

Статья поступила в редакцию 29.09.2025;  
одобрена после рецензирования 13.11.2025;  
принята к публикации 25.12.2025.