



УДК 544.77.051.62

ОБЪЕМНЫЕ И ПОВЕРХНОСТНЫЕ СВОЙСТВА БИНАРНЫХ И ТРОЙНЫХ СМЕСЕЙ АЛКИЛПОЛИГЛЮКОЗИДОВ С АНИОННЫМ И НЕИОНОГЕННЫМ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ
BULK AND SURFACE PROPERTIES OF THE BINARY AND TERNARY MIXTURES OF ALKYL POLYGLUCOSIDE WITH ANIONIC AND NON-IONIC SURFACTANTS

А.П. Дремук, К.И. Киенская, Г.В. Авраменко, Т.Ю. Колдаева
A.P. Dremuk, K.I. Kienskaya, G.V. Avramenko

Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Россия, 125047, г. Москва, Миусская пл., д. 9
D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, 9 Miusskaya Sq., Moscow, 125480, Russia

E-mail: dremuk-alena@mail.ru; sonoio@mail.ru; avrPXTY@yandex.ru; tkoldaeva@muctr.ru

Ключевые слова: поверхностно-активное вещество (ПАВ), алкилполиглюкозид (АПГ), двойные смеси ПАВ, тройные смеси ПАВ, синергизм.

Key words: surfactant, Alkyl Polyglucosides (APG), binary surfactant mixtures, ternary surfactant mixtures, synergism.

Аннотация. Изучены процессы адсорбции и мицеллообразования в водных растворах бинарных и тройных смесей поверхностно-активных веществ различной природы, установлены значения критической концентрации мицеллообразования для всех исследованных систем. С использованием термодинамических подходов Рубина и Розена рассчитаны параметры взаимодействия в смесях, определен состав смешанных мицелл и адсорбционных слоев. Для анализа поведения тройных смесей ПАВ применяли псевдобинарные подходы Рубина и Розена. Отрицательные значения параметров взаимодействия свидетельствуют о наличии синергизма при мицеллообразовании и адсорбции на границе раствор-воздух в изученных бинарных и тройных смесях поверхностно-активных веществ различной природы.

Resume. Usually surfactant mixtures against individual surfactants appear to be more effective in interface and surface tension decrease. The majority of scientists explain such behaviour as a result of specific interaction between the molecules and ions of different nature.

Nowadays cosmetic market is highly focused on ecological profiles of raw materials used in cosmetics. As a result the surfactants of new generation, so called "green image surfactants" have the leading position on the cosmetic market. Nonionic alkyl polyglucosides (APG) based on natural source could serve as an example of ingredients discussed above. The binary and ternary mixtures of commercial APGs with other surfactants are not widely investigated.

In this work, binary and ternary mixtures behavior at water/air interface have been studied using tensiometry.

The surface properties of the nonionic surfactants (Caprylyl/Capryl Glucoside; Laureth 2) and anionic surfactant (Sodium Lauryl Sulfate) in their binary and ternary mixed states have been studied. Adsorption and micellization in binary and ternary mixed solutions of surfactants have been investigated. The critical micelle concentration (CMC) have been analysed by surface tension. The interaction parameters in surfactant mixtures have been calculated using Rubingh and Rosen models, the compositions of mixed micelles and adsorption layers have been determined.

In all investigated cases the values of interaction parameters in mixed micelles and adsorption layers are negative and comparatively high absolute values what proves the synergistic effect. It appears that adding of nonionic surfactant promotes anionic surfactants inclusion to the micelles and adsorption layers since massive glucoside fragments diminish electrostatic repulsion of ionic groups. Moreover the hydrogen bound formation between hydroxyl groups of nonionic surfactants and sulfate-anions of anionic surfactants could also be the probable reason.

Введение

Смеси поверхностно-активных веществ (ПАВ) по сравнению с индивидуальными ПАВ часто оказываются эффективнее при снижении поверхностного и межфазного натяжения, что связывают с наличием специфических взаимодействий между молекулами или ионами различной природы [Zhou, Rosen, 2003]. В большинстве публикаций последних лет изучается поведение бинарных смесей традиционных и нетрадиционных ПАВ на различных границах раздела фаз [Соболева, Кривобокова, 2004; Wang, Li et al., 2005]. Практический интерес представляют системы, которые включают ПАВ, синтезируемые из воспроизводимого природного сырья. В частности, представителями популярной сейчас «зеленой химии» являются алкилполиглюкозиды (АПГ). Это неионогенные ПАВ, для которых характерны хорошее моющее действие и высокая пенообразующая способность. Такие ПАВ обладают дерматологической мягкостью, что обуславливает их применение при разработке косметических составов [Hill, Rybinski, 1997].



Большинство публикаций, в которых рассматривается поведение тройных смесей ПАВ, описывают и анализируют взаимодействие ПАВ сходной природы [Shiloach, Blankshtein, 1998; Das et al., 2010]. Несомненный интерес представляет исследование свойств растворов тройных смесей алкилполиглюкозидов с поверхностно-активными веществами различной природы.

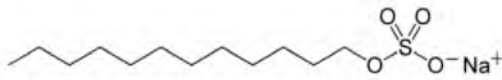
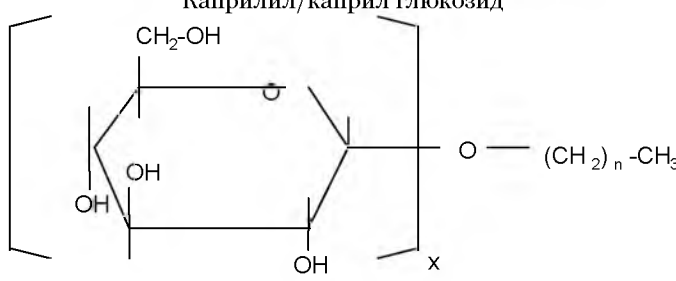
Цель настоящей работы заключалась в количественной оценке параметров взаимодействия в бинарных и тройных смесях ПАВ, исследование поведения многокомпонентных смесей ПАВ на границе раствор-воздух.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования являлись анионное ПАВ (АПАВ) Техарон К 12 G (BASF, Германия), неионогенное ПАВ (НПАВ₁) Plantacare 810 UP (Cognis, Германия), а также их смесь в соотношении 1/5, исследованная ранее [Дремук, Киенская и др., 2014]. В качестве третьего компонента тройной смеси было выбрано неионогенное ПАВ (НПАВ₂) – Arlypon F (BASF, Германия). Структурные формулы и краткая характеристика исходных компонентов приведены в таблице 1.

Таблица 1
Table 1

Краткая характеристика исходных компонентов
Short characteristics of used raw materials

Торговая марка, производитель	Наименование по INCI, структурная формула	Характеристики
<i>Техарон К 12 G</i> BASF, Германия	Лаурилсульфат натрия 	Анионное поверхностно-активное вещество (АПАВ) ККМ 10.0 ммоль/л
<i>Plantacare 810 UP</i> Cognis, Германия	Каприлил/каприл глюкозид  $x=1,3\div 2,0$	Неионогенное поверхностно-активное вещество (НПАВ ₁) ККМ 8.0 ммоль/л
<i>Arlypon F</i> BASF, Германия	Лаурет 2 $H_{25}C_{12}-O-(CH_2-CH_2-O)_2-H$	Неионогенное поверхностно-активное вещество (НПАВ ₂) ККМ 7.0 ммоль/л

Выбор именно этих реагентов обусловлен тем, что все они являются индивидуальными веществами, с высоким содержанием основного вещества, что необходимо для физико-химических расчетов.

Для исследования влияния состава смеси водорастворимых ПАВ на поверхностное натяжение использовались водные растворы тройных смесей различных концентраций, при этом варьировалось содержание третьего компонента. Поверхностное натяжение растворов ПАВ измеряли методом висящей капли на тензиометре DSA 20E KRUSS. Все эксперименты проводили при комнатной температуре $23\pm 0.5^\circ\text{C}$.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Для определения состава смешанных мицелл и параметра взаимодействия в бинарных смесях ПАВ чаще всего используется термодинамический подход Рубина [Holland, Rubingh, 1983]. Расчеты проводятся согласно уравнениям:

$$\frac{X_1^2 \ln(\alpha_1 C_{12} / X_1 C_1)}{(1 - X_1)^2 \ln[(1 - \alpha_1) C_{12} / (1 - X_1) C_2]} = 1 \quad ; \quad (1)$$

$$\beta = \frac{\ln(\alpha_1 C_{12} / X_1 C_1)}{(1 - X_1)^2} \quad (2)$$

где X_1 и $(1-X_1)$ – мольная доля 1-го и 2-го ПАВ в мицелле; α_1 и $(1-\alpha_1)$ – мольные доли 1-го и 2-го ПАВ в смеси; C_{12} – критическая концентрация мицеллообразования смеси; C_1, C_2 – критические концентрации мицеллообразования 1-го и 2-го ПАВ соответственно; β_m – параметр взаимодействия ПАВ в смешанных мицеллах.

Для описания поведения тройных смесей было решено использовать псевдобинарный подход Рубина, когда тройную смесь рассматривают как двойную [Szymczyk et al., 2014.]. Таким образом, за C_1 принимали поочередно ККМ каждого из индивидуальных ПАВ, за C_2 – ККМ оставшейся бинарной смеси ПАВ, а за C_{12} – ККМ тройной смеси.

Изотермы поверхностного натяжения рассмотренных тройных смесей ПАВ (рис. 1) имеют вид, типичный для коллоидных ПАВ: при малых концентрациях ПАВ в растворе поверхностное натяжение снижается резко, но с ростом концентрации степень его снижения уменьшается и при достижении критической концентрации мицеллообразования (ККМ) σ стремится к постоянному значению. Как видно из рисунка, сильнее всего поверхностное натяжение снижает тройная смесь Техарон К 12 G / Plantacare 810 UP / Arlypon F при соотношении 1/5/5.

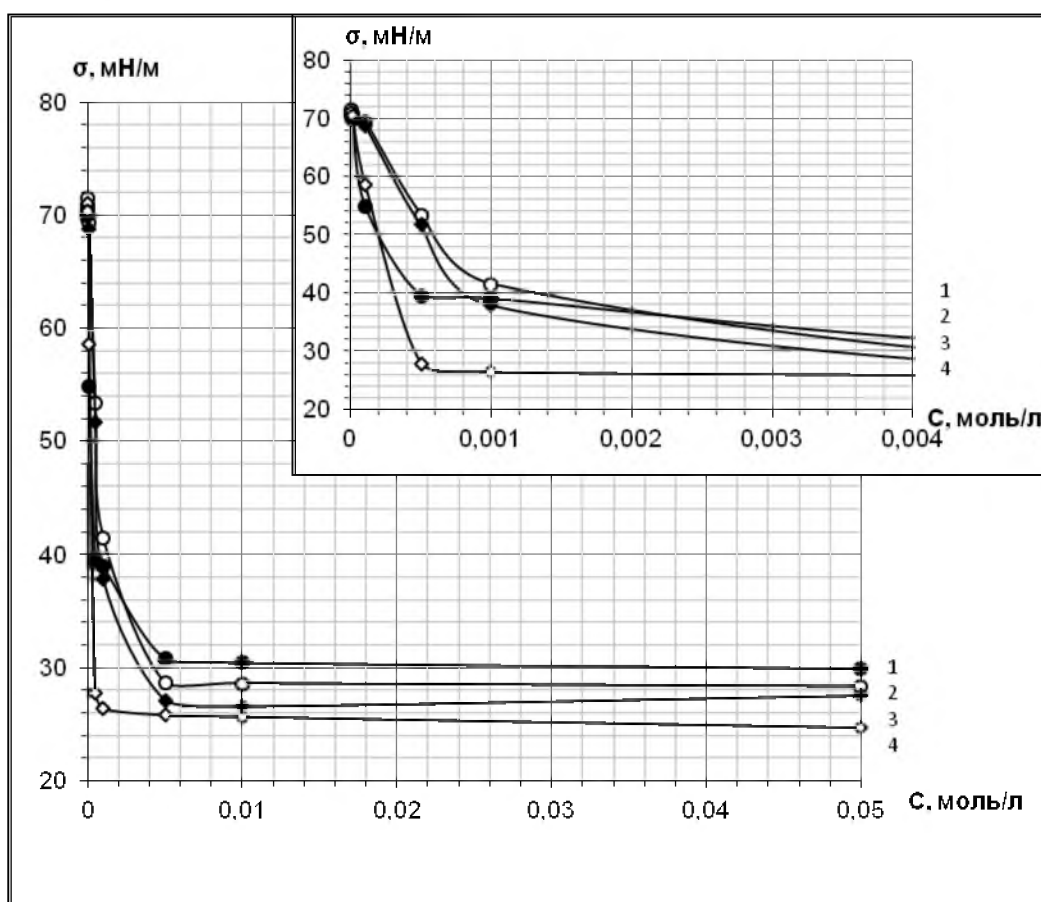


Рис. 1. Изотермы поверхностного натяжения тройных смесей Техарон К 12 G / Plantacare 810 UP / Arlypon F при различных соотношениях:
1 – 1/5/0.2; 2 – 1/5/1; 3 – 1/5/2; 4 – 1/5/5

Fig. 1. Isotherms of surface tension of ternary mixtures Техарон К 12 G / Plantacare 810 UP / Arlypon F at various ratios:
1 – 1/5/0.2; 2 – 1/5/1; 3 – 1/5/2; 4 – 1/5/5 ($t = 23 \pm 0.5^\circ\text{C}$)

Для расчета состава смешанных мицелл и параметра взаимодействия между поверхностно-активными веществами в тройных смесях необходимо было определить критические концентрации мицеллообразования. Значения ККМ индивидуальных ПАВ и их смесей определяли универсальным способом для всех ПАВ – как концентрацию, соответствующую излому на изотерме поверхностного натяжения, построенной в координатах $\sigma - \ln C$. Значения ККМ трой-

ных смесей сведены в таблицу 2. Для всех рассмотренных тройных смесей Техарон К 12 G / Plantacare 810 UP / Arlypon F за исключением соотношения 1/5/0.2 значения ККМ ниже, чем значения ККМ каждого из индивидуальных ПАВ (см. табл. 1). Из приведенных данных следует, что увеличение содержания третьего компонента в смеси значительно снижает значение ККМ. Среди всех рассмотренных нами систем смесь при соотношении 1/5/5 имеет минимальное значение ККМ, равное 0.5 ммоль/л. Такое низкое значение ККМ свидетельствует о явлении синергизма при образовании смешанных мицелл.

Таблица 2

Table 2

Значения критической концентрации мицеллообразования (ККМ) тройных смесей ПАВ
Critical micellar concentrationa (cmc)
of ternary mixtures of surfactants

Смесь Техарон PK 45 / Plantacare 810 UP / Arlypon F	ККМ, ммоль/л
1 / 5 / 0.2	10.0
1 / 5 / 1	5.3
1 / 5 / 2	5.0
1 / 5 / 5	0.5

что было сделано с использованием соответствующих изотерм поверхностного натяжения (рис. 2).

В работе проводили расчет для тройной смеси Техарон К 12 G / Plantacare 810 UP / Arlypon F при соотношении 1/5/5. Было рассмотрено 3 случая: в случае 1 за индивидуальное ПАВ принимали бинарную смесь Техарон К 12G / Arlypon F; в случае 2 – бинарную смесь Plantacare 810 UP / Arlypon F; в случае 3 – бинарную смесь Техарон К 12G / Plantacare 810 UP. Для применения подхода Рубина к тройным смесям определяли ККМ и параметры взаимодействия между ПАВ в бинарных смесях, входящих в тройную смесь,

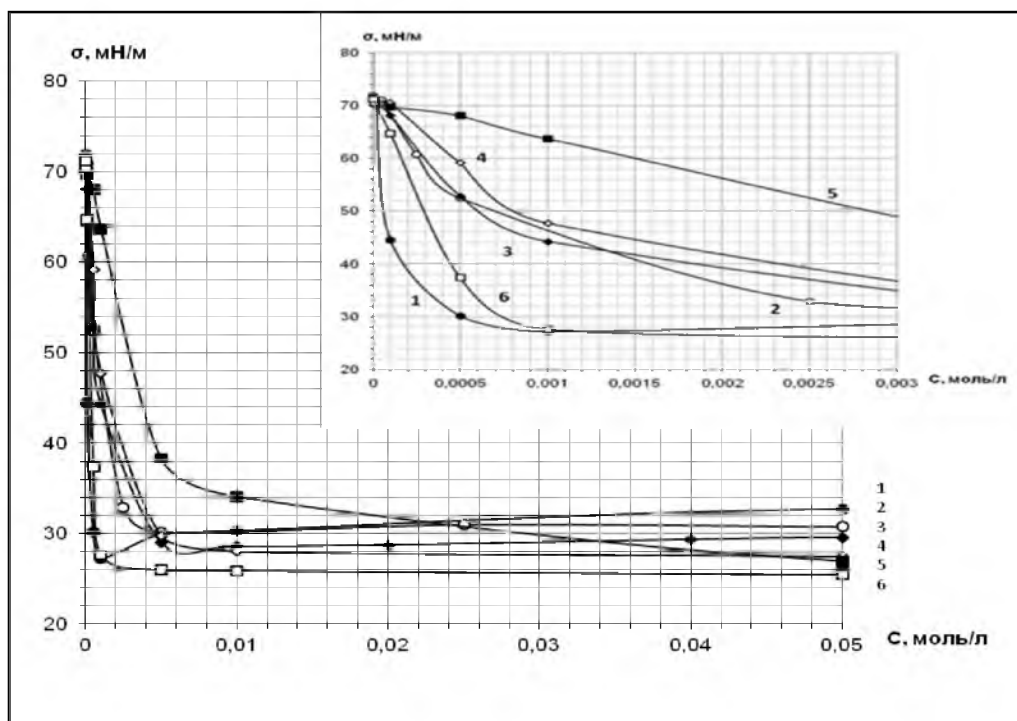


Рис. 2. Изотермы поверхностного натяжения индивидуальных ПАВ и их бинарных смесей ПАВ:

- 1 – Техарон К 12G; 2 – Техарон К 12G / Plantacare 810 UP (1/5); 3 – Plantacare 810 UP;
 4 – Plantacare 810 UP / Arlypon F (1/1); 5 – Arlypon F; 6 – Техарон К 12G / Arlypon F (1/5)

Fig. 2. Isotherms of surface tension of individual surfactants and their binary mixtures:

- 1 – Техарон К 12G; 2 – Техарон К 12G / Plantacare 810 UP (1/5); 3 – Plantacare 810 UP;
 4 – Plantacare 810 UP / Arlypon F (1/1); 5 – Arlypon F; 6 – Техарон К 12G / Arlypon F (1/5)

($t = 23 \pm 0.5^\circ\text{C}$).

Полученные отрицательные значения параметра взаимодействия β_m , свидетельствуют о взаимном притяжении ПАВ в мицеллах (таблица 3). Из литературных данных известно [Li et al., 2001], что о синергизме при мицеллообразовании в смесях ПАВ можно говорить при соблюдении двух условий: $\beta_m < 0$; $|\ln(C_1^m / C_2^m)| < |\beta_m|$. В данном случае им удовлетворяют все 3 рассмотренные системы. Наибольшее абсолютное значение параметра взаимодействия между



ПАВ в мицелле характерно для смеси Техарон К 12 G / Arlypon F в соотношении 1/5. По-видимому, добавление Arlypon F способствует вовлечению АПАВ в мицеллы, так как молекулы НПАВ уменьшают взаимное электростатическое отталкивание ионогенных групп. Вполне вероятно образование водородных связей между этоксиальными группами молекул НПАВ и сульфатными анионами АПАВ.

Результаты расчета параметров взаимодействия между ПАВ и состав мицелл в тройной смеси Техарон К 12 G / Plantacare 810 UP / Arlypon F при соотношении 1/5/5 приведены в таблице 3. Все три термодинамических параметра взаимодействия между ПАВ в мицелле являются отрицательными. Параметр β_m , рассчитанный при рассмотрении бинарной смеси Техарон К 12G / Arlypon F как индивидуального ПАВ (случай 1), несколько ниже случаев 2 и 3. Также можно отметить, что для всех случаев параметры взаимодействия в тройной смеси близки по значению к параметру взаимодействия в бинарной смеси Техарон К 12 G / Arlypon F в соотношении 1/5. Это означает, по-видимому, что явление синергизма в данной тройной смеси в большей степени обусловлено взаимодействием между Техарон К 12 G и Arlypon F.

Таблица 3
Table 3

Параметры межмолекулярного взаимодействия и состав мицелл для бинарных и тройных смесей по данным поверхностного натяжения
Molecular interaction parameters and the composition of the micelles for binary and ternary mixtures according to the surface tension

Смесь ПАВ ₁ / ПАВ ₂	α_i	ККМ _{см.} C ₁₂ , ммоль/л	X _i ^m	β_m
Plantacare 810 UP / Техарон К 12 G (5/1)	0.833	4.8	0.68	-2.99
Plantacare 810 UP / Arlypon F (1/1)	0.5	5.4	0.48	-1.30
Техарон К 12 G / Arlypon F (1/5)	0.167	1.5	0.43	-7.82
Смесь ПАВ ₁ / (ПАВ ₂ : ПАВ ₃)	β_i	ККМ _{см.} C ₁₂ , ммоль/л	X _i ^m	β_m
Случай 1. Plantacare 810 UP / (Техарон К 12G : Arlypon F)	0.455	0.5	0.31	-8.45
Случай 2. Техарон К 12G / (Plantacare 810 UP : Arlypon F)	0.091	0.5	0.47	-10.72
Случай 3. Arlypon F / (Техарон К 12G : Plantacare 810 UP)	0.455	0.5	0.48	-9.79

Розен с сотр. [Rosen, Ниа, 1982] распространили подход Рубина на описание взаимодействий ПАВ в адсорбционных слоях и предложили для расчета состава адсорбционного слоя и параметра взаимодействия в нем использовать уравнения, аналогичные (1) и (2):

$$\frac{X_1^{\sigma 2} \ln(\alpha_1 C_{12}^{\sigma} / X_1^{\sigma} C_1^{\sigma})}{(1 - X_1^{\sigma})^2 \ln[(1 - \alpha_1) C_{12}^{\sigma} / (1 - X_1^{\sigma}) C_2^{\sigma}]} = 1 \quad (3)$$

$$\beta_{\sigma} = \frac{\ln(\alpha_1 C_{12}^{\sigma} / X_1^{\sigma} C_1^{\sigma})}{(1 - X_1^{\sigma})^2} \quad (4)$$

где X_1^{σ} и $(1 - X_1^{\sigma})$ – мольная доля 1-го (НПАВ) и 2-го (АПАВ) ПАВ в адсорбционном слое; α_i и $(1 - \alpha_i)$ – мольные доли 1-го и 2-го ПАВ в смеси; C_{12}^{σ} – концентрация раствора смеси при заданном значении поверхностного натяжения; C_1^{σ} , C_2^{σ} – концентрации растворов 1-го и 2-го ПАВ соответственно при заданном значении поверхностного натяжения; β_{σ} – параметр взаимодействия ПАВ в смешанных адсорбционных слоях.

Для определения состава адсорбционных слоев и параметров взаимодействия в бинарных смесях на изотермах поверхностного натяжения проводили секущие при выбранном значении σ , определяли концентрации растворов индивидуальных ПАВ (C_1^{σ} и C_2^{σ}) и смесей (C_{12}^{σ}), при которых достигается выбранное значение поверхностного натяжения. По полученным значениям находили состав смешанного адсорбционного слоя и β_{σ} .



Таблица 4

Table 4

**Параметры межмолекулярного взаимодействия и состав адсорбционного слоя
для бинарных и тройных смесей по данным поверхностного натяжения
Molecular interaction parameters and the composition of the adsorption layer for binary
and ternary mixtures according to the surface tension**

Смесь ПАВ ₁ / ПАВ ₂							
σ , мН/м		50		40		30	
	α_i	X_1^σ	β_σ	X_1^σ	β_σ	X_1^σ	β_σ
Техарон К 12 G / Arlypon F (1/5)	0.167	0.73	-2.55	0.66	-3.61	0.63	-6.61
Plantacare 810 UP / Arlypon F (1/1)	0.5	0.67	-1.31	0.65	-1.36	0.65	-2.13
σ , мН/м		60		50		40	
Plantacare 810 UP / Техарон К 12 G (5/1)	0.833	0.85	0.14	0.66	7.06	~1	-
Смесь ПАВ ₁ / (ПАВ ₂ : ПАВ ₃)							
σ , мН/м		60		50		40	
	α_i	X_1^σ	β_σ	X_1^σ	β_σ	X_1^σ	β_σ
Случай 1. Plantacare 810 UP / (Техарон К 12G : Arlypon F)	0.455	0.42	-3.31	0.45	-4.35	0.39	-5.04
Случай 2. Техарон К 12G / (Plantacare 810 UP : Arlypon F)	0.091	0.44	-3.73	0.44	-4.05	0.51	-6.09
Случай 3. Arlypon F / (Техарон К 12G : Plantacare 810 UP)	0.455	0.48	-2.05	0.51	-3.78	0.54	-5.58

Для определения состава смешанных адсорбционных слоев и параметров взаимодействия в слоях для смеси Техарон К 12 G / Plantacare 810 UP (в соотношении 1/5) были выбраны сечения 60, 50 и 40 мН/м, а для смесей Plantacare 810 UP / Arlypon F (в соотношении 1/1) и Техарон К 12 G / Arlypon F (в соотношении 1/5) – сечения 50, 40 и 30 мН/м. При выбранных значениях поверхностного натяжения секущие проходят через все рассматриваемые изотермы. Результаты расчета приведены в таблице 4. Как видно из таблицы, для смесей ПАВ, содержащих Arlypon F, при адсорбции на границе водный раствор/воздух можно говорить о наличии синергизма. При этом можно отметить, что с ростом концентрации раствора (т.е. при снижении σ) содержание Arlypon F в поверхностном слое ($1 - X_1^\sigma$) остается практически постоянным для этих смесей, хотя параметр взаимодействия растет по абсолютной величине. Для бинарной смеси Техарон К 12 G / Plantacare 810 UP (в соотношении 1/5) поверхностный слой существенно обогащен алкилполиглюкозидом. Объемные структуры АПГ в адсорбционном слое встраиваются между ионогенными группами АПАВ, тем самым уменьшая отталкивание одноименно заряженных групп [Прохорова, Глухарева, 2011].

При расчете параметров межмолекулярного взаимодействия ПАВ в адсорбционном слое для тройных смесей систему также рассматривали как комбинацию индивидуального ПАВ и бинарной смеси. Полученные результаты представлены в таблице 4. Видно, что при снижении σ (с увеличением концентрации смеси) параметр взаимодействия β_σ для всех случаев растет по абсолютной величине. Все рассчитанные параметры взаимодействия между молекулами разных ПАВ в адсорбционном слое являются отрицательными, что позволяет говорить о наличии синергизма.

Заключение

Таким образом, при рассмотрении поведения тройных смесей ПАВ Техарон К 12 G / Plantacare 810 UP / Arlypon F на границе раствор-воздух было установлено образование смешанных адсорбционных слоев и мицелл. Для процессов адсорбции на границе раствор-воздух и мицеллообразования была произведена оценка параметров взаимодействия между ПАВ различной природы: неионогенных ПАВ типа алкилполиглюкозидов и этоксилированных спиртов и анионного ПАВ типа алкилсульфатов. Отрицательные значения β_m и β_σ свидетельствуют об аттракционных взаимодействиях между неионогенными и анионным ПАВ в поверхностных слоях и мицеллах. Введение неионогенных молекул способствует более плотной упаковке ад-



сорбционного слоя и увеличению числа ассоциации мицелл. При внедрении молекул НПAB между ионами АПАВ, по-видимому, имеют место силы притяжения углеводородных радикалов и образование водородных связей с атомами кислорода полярных заряженных групп, что уменьшает электростатическое отталкивание.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобразования и науки России в рамках выполнения базовой части госзадания.

Список литературы References

1. Дремук А.П., Киенская К.И., Жилина О.В., Махова Н.И., Ильюшенко Е.В., Авраменко Г.В. 2014. Разработка рецептуры модельной косметической эмульсии, стабилизированной смесью неионного и анионного ПАВ. *Химическая технология*, (8): 493–499.
2. Dremuk A.P., Kienskaya K.I., Zhilina O.V., Makhova N.I., Ilueshenko E.V., Avramenko G.V. 2014. Formulation of cosmetic emulsions stabilized with a mixture of nonionic and anionic surfactants. *Khimicheskaya Technologiya [Chemical Engineering]*, (8): 493–499. (in Russian)
3. Прохорова Г.В., Глухарева Н.А. 2011. Мицеллообразование в водных растворах смесей ПАВ, включающих алкилполиглюкозиды. *Коллоидный журнал*, 73 (6): 842–846.
4. Prokhorova G.V., Glukhareva N.A. 2011. Micellization in Aqueous Solutions of Mixed Surfactants Containing Alkylpolyglucosides. *Kolloidnyj zhurnal [Colloid Journal]*, 73 (6): 842–846. (in Russian)
5. Соболева О.А., Кривобоква М.В. 2004. Смешанные мицеллы и адсорбционные слои неионного поверхностно-активного вещества с катионным (мономерным и димерным). *Вестник Московского Университета. Серия 2: Химия*, 45 (5): 344–349.
6. Soboleva O.A., Krivobokova M.V. 2004. Mixed micelles and adsorption layers of nonionic surfactant with monomeric and dimeric cationic surfactants. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Serija 2: Himija [Moscow University Chemistry Bulletin]*, 45 (5): 344–349. (in Russian)
7. Das Ch., Chakraborty T., Ghosh S., Das B. 2010. Physicochemistry of Mixed Micellization. Binary and Ternary Mixtures of cationic Surfactants in Aqueous Medium. *Colloid Journal*, 72 (6): 788–798.
8. Hill K., Rybinski W., Stoll G. 1997. *Alkyl Polyglycosides. Technology, Properties and Applications*. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, 242.
9. Holland P.M., Rubingh D.N. 1983. Nonideal multicomponent mixed micelle model. *The Journal of Physical Chemistry*, 87 (11): 1984–1990.
10. Li F., Rosen M.J., Sulthana S.B. 2001. Surface properties of cationic gemini surfactants and their interaction with alkylglucoside or maltoside surfactants. *Langmuir*, 17 (4): 1037–1042.
11. Rosen M.J., Hua X.Y. 1982. Surface concentrations and molecular interactions in binary mixtures of surfactants. *Journal of Colloid and Interface Science*, 86 (1): 164–172.
12. Shiloach A., Blankschtein D. 1998. Prediction of Critical Micelle Concentrations of Nonideal Ternary Surfactant Mixtures. *Langmuir*, 14 (15): 4105–4114.
13. Szymczyk K., Zdziennicka A., Krawczyk J., Janczuk B. 2014. Behaviour of cetyltrimethylammonium bromide, Triton X-100 and Triton X-114 in mixed monolayer at the (water-air) interface. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 69: 85–92.
14. Wang Z.N., Li G.Z., Zhang G.Y., Diao Z.Y., Chen L.S., Wang Z.W. 2005. Molecular interaction in binary surfactant mixtures containing alkyl polyglycoside. *Journal of Colloid and Interface Science*, 290 (2): 598–602.
15. Zhou Q., Rosen M.J. 2003. Molecular Interactions of Surfactants in Mixed Monolayers at the Air/Aqueous Solution Interface and in Mixed Micelles in Aqueous Media: The Regular Solution Approach. *Langmuir*, 19 (11): 4555–4562.