

ISSN 1561-8331 (Print)
ISSN 2524-2342 (Online)

ФІЗИЧНАЯ ХІМІЯ
PHYSICAL CHEMISTRY

УДК 541.183, 544.576; 543.54
<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2018-54-4-399-405>

Поступила в редакцию 24.04.2018
Received 24.04.2018

О. Н. Опанасенко, Н. П. Крутько, О. Л. Жигалова, О. В. Лукша, Т. А. Козинец

Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

**АДСОРБЦИОННАЯ СПОСОБНОСТЬ БИНАРНЫХ СМЕСЕЙ ПАВ
НА МЕЖФАЗНЫХ ГРАНИЦАХ РАЗДЕЛА**

Аннотация. Изучена адсорбционная способность на межфазных поверхностях раствор/воздух и раствор/минеральный материал бинарных смесей анионного (алкилбензолсульфокислота и ее натриевой соли (АБСКNa)) и неионогенного ПАВ (Твин-80). Установлено, что на адсорбционное взаимодействие бинарных смесей АПАВ/НПАВ с поверхностью кварца и доломита оказывает влияние наличие потенциалопределяющих ионов, активирующих поверхность минеральных материалов, заряд и гидратированность противоионов АПАВ, характер межмолекулярных взаимодействий между ПАВ-компонентами смеси. Показано, что смесь АБСКNa/Твин-80, характеризующаяся низкой адсорбционной способностью к исследуемым минеральным материалам и отсутствием взаимодействия между ПАВ-компонентами смеси, обладает максимальной нефтевытесняющей способностью с поверхности доломита и кварца.

Ключевые слова: поверхностно-активные вещества, адсорбция, межфазные взаимодействия, минеральный материал, поверхностное натяжение

Для цитирования. Адсорбционная способность бинарных смесей ПАВ на межфазных границах раздела / О. Н. Опанасенко [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2018. – Т. 54, № 4. – С. 399–405. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2018-54-4-399-405>

O. N. Opanasenko, N. P. Krutko, O. L. Zhigalova, O. V. Luksha, T. A. Kozinets

Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

**ADSORPTION CAPACITY OF BINARY SURFACTANT MIXTURES AT SOLUTION/AIR
AND SOLUTION/MINERAL MATERIAL INTERFACES**

Abstract. The adsorption capacity on the interphase surfaces of solution / air and solution / mineral material of binary mixtures of anionic (alkylbenzenesulfonic acid and its sodium salt (ABSCNa)) and nonionic surfactants (Tween-80) was studied. It has been established that the adsorption interaction of binary mixtures of surfactants with the surface of quartz and dolomite is affected by the presence of potential-determining ions that activate the surface of mineral materials, the charge and hydration of the anionic antagonists, the nature of the intermolecular interactions between the surfactant-components of the mixture. It was shown that the ABSCNa / Tween-80 mixture, characterized by low adsorption capacity to the mineral materials under study and absence of interaction between the surfactant components of the mixture, has a maximum oil displacement capacity from the surface of dolomite and quartz.

Keywords: surfactants, adsorption, interfacial interactions, mineral material, interfacial tension

For citation. Opanasenko O. N., Krutko N. P., Zhigalova O. L., Luksha O. V., Kozinets T. A. Adsorption capacity of binary surfactant mixtures at solution/air and solution/mineral material interfaces. *Vestsi Natsyyanal' nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2018, vol. 54, no. 4, pp. 399–405 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2018-54-4-399-405>

Введение. Согласно современным представлениям, механизм вытеснения нефти поверхностно-активными веществами (ПАВ) заключается в уменьшении капиллярного сопротивления движению водонефтяных смесей и переводе связанной с породой нефти в свободное состояние, что

обусловлено способностью ПАВ смачивать поверхность поровых каналов, уменьшать межфазное натяжение на границе нефть/вода, вытеснять нефть с поверхности породы и диспергировать ее в потоке воды [1, 2]. В нефтяном пласте присутствуют как гидрофобные, так и гидрофильные адсорбенты. Адсорбция ПАВ на гидрофобных участках поверхности минералов, образованных в результате хемосорбции некоторых компонентов нефти, способствует отделению нефти от поверхности. В то же время адсорбция ПАВ на гидрофильных участках приводит к их гидрофобизации, способствуя адгезии капель нефти. Для повышения эффективности нефтевытеснения с поверхности породообразующих минералов ПАВ должны проявлять прежде всего высокую поверхностную активность на границе раздела нефть/вода и ограниченную адсорбцию на гидрофильных участках поверхности пор. В работе [3] показана способность анионных ПАВ (АПАВ) снижать межфазное натяжение на границе нефть/вода и обеспечивать устойчивость нефтяных капель к коалесценции. В то же время вследствие адсорбции АПАВ на границе раздела раствор/минеральный материал эффективность их действия на границе нефть/вода может быть значительно снижена. Повышение нефтеотдачи пластов возможно при использовании смеси АПАВ и неионогенного ПАВ (НПАВ). Преимуществом смеси АПАВ/НПАВ перед использованием АПАВ является ее устойчивость к высаливанию в среде минерализованной пластовой воды и снижение влияния температуры на фазовое поведение, так как с ростом температуры в нефтяном пласте растворимость АПАВ повышается, а НПАВ снижается.

Цель работы – изучение влияния состава бинарных смесей АПАВ/НПАВ на их адсорбционную способность на границах раздела с воздухом и минеральными материалами различной природы поверхности.

Экспериментальная часть. В качестве объектов исследования использованы АПАВ – алкилбензолсульфокислота $R-C_6H_4SO_2OH$; $R = 12-14$ (АБСК) и ее натриевая соль $R-C_6H_4SO_2ONa$; $R = 12-14$ (АБСКNa); НПАВ – сорбитан *бис*(полиоксиэтилен) моноолеат ($C_{64}H_{26}O_{124}$; Твин-80), число оксиэтильных групп – 20; высоковязкая нефть Ашальчинского месторождения ПАО «Татнефть»; тонкодисперсные фракции ($< 0,071$ мм) кварца и доломита. Растворы смесей ПАВ были приготовлены на дистиллированной воде (электропроводность $2 \cdot 10^{-3}$ Ом/см) смешением растворов индивидуальных ПАВ равных концентраций в соответствующих соотношениях. Мольная доля АПАВ в растворах смесей (α) составляла 0,2 и 0,8. Измерения проводили при температуре 20 °С.

Поверхностное натяжение растворов ПАВ и их смесей на границе раствор/воздух определяли методом отрыва кольца с использованием прибора «Процессор-тензиометр К100 МК2» фирмы «Krüss» (Германия). По изотермам поверхностного натяжения $\sigma = f(\ln C)$ определены основные коллоидно-химические характеристики ПАВ: адсорбция (Γ_m), критическая концентрация мицеллообразования (ККМ) (C_k), поверхностное натяжение в области ККМ (σ_k); рассчитаны изотермы адсорбции ПАВ методом графического дифференцирования и значения свободной энергии адсорбции Гиббса (G) [4].

Адсорбцию ПАВ на поверхности минерального материала определяли разностно-концентрационным методом. Суспензии тонкодисперсного минерального материала в растворах ПАВ интенсивно перемешивали с использованием перемешивающего устройства ЛАБ-ПУ-02 в течение 10 мин. После установления адсорбционного равновесия декантацией отделяли осадок и измеряли поверхностное натяжение. С использованием экспериментальной кривой $\sigma = f(\ln C)$ определяли концентрацию раствора. Величину избыточной (гиббсовской) адсорбции A (моль/г) ПАВ рассчитывали по формуле:

$$A = \frac{(C_0 - C)}{m} V, \quad (1)$$

где C_0 – концентрация ПАВ в исходном растворе; m – масса тонкодисперсного минерального материала, г; V – объем раствора ПАВ.

Энергию активации нефтевытеснения ($E_{\text{акт}}$) рассчитывали из уравнения зависимости нефтевытесняющей способности (НС) от температуры в координатах $\ln \text{НС} - 1/T$ [5]:

$$\text{НС} = A e^{-E_{\text{акт}}/RT}. \quad (2)$$

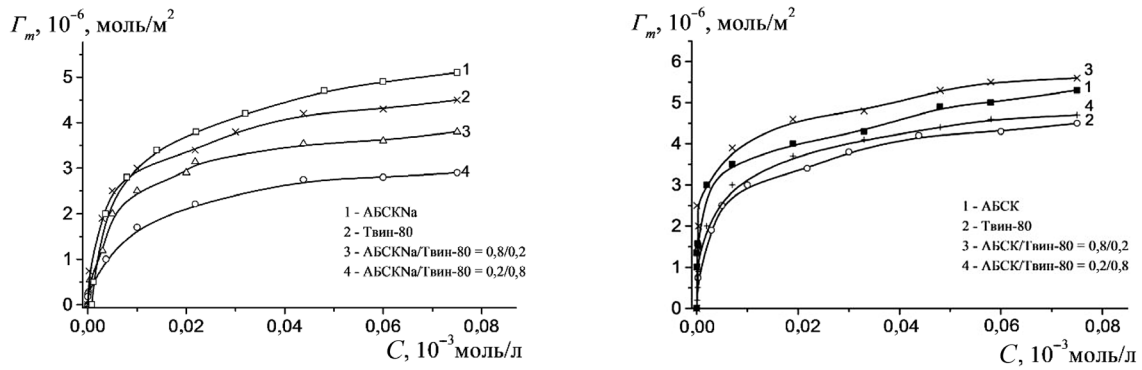


Рис. 1. Изотермы адсорбции ПАВ и их бинарных смесей на границе раздела раствор/воздух
 Fig. 1. Isotherms of adsorption of surfactants and their binary mixtures at the solution / air interface

Нефтевытесняющую способность растворов АПАВ/НПАВ с поверхности минерального материала определяли при $T = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ гравиметрическим методом по формуле:

$$HC = \frac{(m_{исх} - m_0)}{m_{исх}}, \tag{3}$$

где $m_{исх}$ – масса нефти, нанесенной на поверхность минерального материала, г; m_0 – масса нефти на поверхности минерального материала после отмывки, г.

Методика определения HC. Насыщенный нефтью минеральный материал заливали раствором ПАВ, помещали в центрифугу (ЦЛМН-Р10-01, 2700 об/мин) и по истечении заданного времени (5, 10 и 15 мин) удаляли раствор с отмывой нефтью, высушивали минеральный материал и определяли массу оставшейся нефти [6].

Результаты и их обсуждение. Рассчитанные изотермы адсорбции ПАВ и их смесей представлены на рис. 1. Коллоидно-химические характеристики растворов ПАВ и их бинарных смесей приведены в табл. 1.

Таблица 1. Коллоидно-химические характеристики растворов ПАВ и их бинарных смесей
 Table 1. Colloid-chemical characteristics of surfactant solutions and their binary mixtures

ПАВ	$\Gamma_m \cdot 10^6$, моль/м ²	$-G \cdot 10^3$, Дж/моль	$C_{к^*}$, моль/л	$\sigma_{к^*}$, мН/м
АБСКNa	5,0	22,5	$5,3 \cdot 10^{-3}$	46,3
АБСК	5,3	35,4	$2,7 \cdot 10^{-5}$	32,3
Твин-80	4,5	23,3	$3,8 \cdot 10^{-3}$	34,8
АБСКNa/Твин-80				
0,8/0,2	3,8	22,8	$4,7 \cdot 10^{-3}$	45,1
0,2/0,8	2,9	23,5	$3,6 \cdot 10^{-3}$	43,1
АБСК/Твин-80				
0,8/0,2	5,6	39,8	$4,5 \cdot 10^{-6}$	28,6
0,2/0,8	4,7	34,9	$3,2 \cdot 10^{-5}$	31,5

Анализируя способность смесей АПАВ/НПАВ адсорбироваться на границе раздела раствор/воздух, установлено, что для раствора АБСК/Твин-80 формирование адсорбционного слоя на межфазной границе является энергетически более выгодным по сравнению с АБСКNa/Твин-80, о чем свидетельствуют увеличение абсолютных значений свободной энергии адсорбции Гиббса (G) и уменьшение значений ККМ. Важно отметить, что значения максимальной адсорбции Γ_m из раствора АБСК/Твин-80 при мольной доле АБСК ($\alpha_{АБСК}$) 0,8 превышают значения адсорбции индивидуальных ПАВ (АБСК, Твин-80 и АБСКNa) и смеси АБСКNa/Твин-80 на $0,3 \cdot 10^{-6}$ – $2,7 \cdot 10^{-6}$ моль/м². Показано, что для растворов АБСК/Твин-80 независимо от мольного соотношения компонентов наблюдается синергизм снижения поверхностного натяжения, причем

в большей степени (на 2,9 мН/м) для смеси, обогащенной АБСК. Кроме того, особенность данной смеси – это существенное различие в значениях ККМ (на 2 порядка) индивидуальных ПАВ, что является важным фактором, обуславливающим образование смешанных мицелл в растворе. Следует отметить, что при смешении АБСКNa и Твин-80 коллоидно-химические свойства смесей превосходят свойства раствора АБСКNa, но не достигают свойств раствора Твин-80.

Для анализа совместного поведения АПАВ и НПАВ на границе раздела раствор/воздух был использован подход Рубина и Розена [7, 8]. В соответствии с этим подходом были рассчитаны составы смешанных мицелл (X^m) и адсорбционных слоев (X^σ) на границе раздела раствор/воздух, а также параметры межмолекулярного взаимодействия, которые являются количественной характеристикой взаимодействия компонентов в смешанной мицелле (β^m) и адсорбционном слое (β^σ) (табл. 2), и служат мерой отклонения системы от идеального поведения. Для определения состава смешанных адсорбционных слоев и параметров взаимодействия в них было выбрано сечение 45 мН/м.

Таблица 2. Значения параметров взаимодействия β^m и β^σ , мольных долей X_1^m и X_1^σ АПАВ, X_2^m и X_2^σ НПАВ в смешанных мицеллах и адсорбционных слоях на границе раствор/воздух

Table 2. The values of the interaction parameters β^m and β^σ , mole fractions X_1^m and X_1^σ of anionic surfactants, X_2^m and X_2^σ of nonionic surfactants in mixed micelles and adsorption layers at the solution / air interface

АПАВ/НПАВ	X_1^m	X_2^m	β^m	X_1^σ	X_2^σ	β^σ
				при 45 мН/м		
$\alpha_{\text{АБСКNa}} = 0,8$	–	–	5,28	–	–	6,13
$\alpha_{\text{АБСКNa}} = 0,2$	–	–	3,41	–	–	4,28
$\alpha_{\text{АБСК}} = 0,8$	0,71	0,29	–9,42	0,72	0,28	–13,14
$\alpha_{\text{АБСК}} = 0,2$	–	–	6,33	–	–	–8,73

Результаты расчетов, представленные в табл. 2, показали, что отрицательные отклонения от идеальности обнаружены в смеси, обогащенной АБСК, при формировании как смешанных мицелл, так и адсорбционных слоев. Величины параметров взаимодействия β^m и β^σ свидетельствуют об избыточном притяжении молекул компонентов смеси в смешанных мицеллах и адсорбционных слоях. В то же время с уменьшением содержания более поверхностно-активного компонента в смеси ($\alpha_{\text{АБСК}} = 0,2$) притяжение между ПАВ становится значительно слабее и наблюдается только в смешанных адсорбционных слоях. Взаимодействия в смеси АБСК/Твин-80 определяются, очевидно, двумя составляющими: взаимодействием углеводородных радикалов и действием электростатического фактора, при этом именно последний вносит наибольший вклад в неидеальное поведение системы. В то же время между молекулами АБСКNa и Твин-80 преобладают силы отталкивания, о чем свидетельствуют положительные значения параметров $\beta^m > 0$ и $\beta^\sigma > 0$. Принимая во внимание идентичность гидрофильной части АБСК и АБСКNa, различие их поведения в смеси с Твин-80 обусловлено размером противоиона ($r_{\text{Na}^+} \gg r_{\text{H}^+}$) и, как следствие, увеличением степени гидратации ионов Na^+ по сравнению с ионами H^+ . В случае совмещения АБСКNa и Твин-80 энергия электростатического отталкивания между противоионами Na^+ превышает энергию ассоциирования углеводородных радикалов $\text{R}-\text{C}_6\text{H}_4\text{SO}_2\text{O}^-$ и Твин-80.

Изменение коллоидно-химических характеристик растворов индивидуальных АПАВ и НПАВ при их смешении оказывает влияние и на их адсорбционное взаимодействие с минеральными материалами. На рис. 2 представлены результаты измерения значений поверхностного натяжения растворов АПАВ/НПАВ до и после их адсорбции из водных растворов на поверхности кварца и доломита. Значения адсорбции смесей АПАВ/НПАВ из водных растворов на поверхности минерального материала приведены в табл. 3.

Сопоставительный анализ данных (рис. 2 и табл. 3) показал, что для всех исследуемых смесей АПАВ/НПАВ, особенно обогащенных АПАВ ($\alpha_{\text{АПАВ}} = 0,8$), адсорбция на поверхности доломита значительно выше, чем на поверхности кварца. Так, после установления адсорбционного равновесия в системе (АПАВ/НПАВ)/минеральный материал величина избыточной адсорбции A на доломите превышает в 1,6–1,8 раза (для АБСК/Твин-80) и 5–6,8 раза (для АБСКNa/Твин-80) этот показатель на кварце.

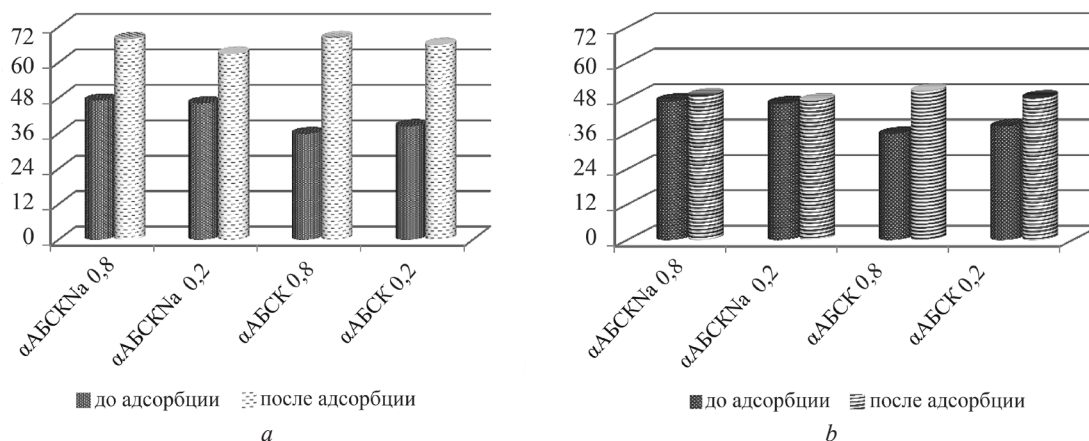


Рис. 2. Значения поверхностного натяжения растворов бинарных смесей ПАВ до и после адсорбции на поверхности доломита (а) и кварца (b)

Fig. 2. Surface tension values of solutions of binary surfactant mixtures before and after adsorption on the surface of dolomite (a) and quartz (b)

Таблица 3. Адсорбция бинарных смесей ПАВ из водных растворов на поверхности минеральных материалов

Table 3 Adsorption of binary surfactant mixtures from aqueous solutions on the surface of mineral materials

Соотношение АПАВ/НПАВ в смеси	$A_{\text{доломит}} \cdot 10^7$, моль/г	$A_{\text{кварц}} \cdot 10^7$, моль/г
АБСКNa/Твин-80		
0,8/0,2	2,7	0,8
0,2/0,8	1,5	0,5
АБСК/Твин-80		
0,8/0,2	8,5	4,3
0,2/0,8	6,7	3,2

Следует отметить, что поверхностное натяжение растворов АПАВ/НПАВ после взаимодействия с доломитом достигает 65–68 мН/м, практически приближаясь к значению поверхностного натяжения воды (72 мН/м), в то время как после контакта с кварцем не превышает 50 мН/м. Активное взаимодействие смесей АПАВ/НПАВ с поверхностью доломита обусловлено как электростатическим взаимодействием диполей полиоксиэтиленовой цепи Твин-80 и алкилбензолсульфонат ионов $R-C_6H_4SO_2O^-$, так и специфическим взаимодействием ионов $R-C_6H_4SO_2O^-$ с заряженной поверхностью. Взаимодействие смесей АПАВ/НПАВ с поверхностью кварца определяется только электростатическим притяжением ионов АПАВ, поскольку НПАВ адсорбируется с образованием водородных связей между полиоксиэтиленовой цепью и силанольной группой поверхности кварца.

Высокая адсорбция смеси АБСК/Твин-80 как на поверхности кварца, так и доломита по сравнению со смесью АБСКNa/Твин-80 обусловлена наличием ионов H^+ в растворе АБСК, которые определяют поверхностный заряд кварца, согласно $SiOH + H^+ \leftrightarrow SiOH_2^+$, и реакционноспособных ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} на поверхности доломита. Следует отметить, что на величину адсорбции АПАВ/НПАВ на поверхности доломита и кварца оказывает заметное влияние заряд и гидратированность противоиона АПАВ. Так, величина A смеси АБСКNa/Твин-80 на поверхности минерального материала значительно ниже величины A смеси АБСК/Твин-80, что обусловлено увеличением электростатического отталкивания между ионами Na^+ и, как следствие, формированием менее плотного адсорбционного слоя на границе раздела раствор/минеральный материал.

Таким образом, исследования адсорбции бинарных смесей ПАВ из водных растворов на минеральных материалах различной природы показали, что ограниченной адсорбционной способностью на границе раздела раствор/минеральный материал обладает смесь АБСКNa/Твин-80, в которой АБСКNa и Твин-80 в растворе ведут себя как свободные молекулы мицеллообразующих ПАВ, а не как один псевдокомпонент.

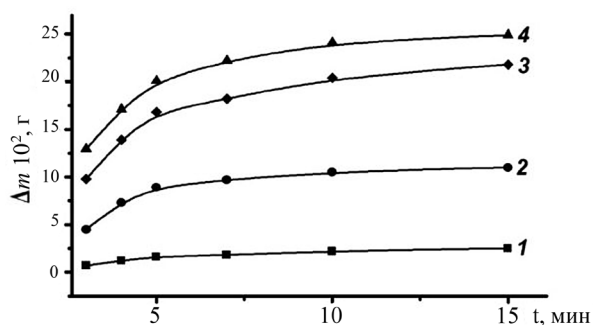


Рис. 3. Изменение массы отмытой нефти во времени растворами АБСК/Твин-80 с поверхности доломита (1), кварца (2) и АБСКNa/Твин-80 с поверхности доломита (3), кварца (4)

Fig. 3. Change in the mass of washed oil in time with ABSC / Tween-80 solutions from the surface of dolomite (1) and quartz (2) and ABSCNa / Tween-80 from the surface of dolomite (3) and quartz (4)

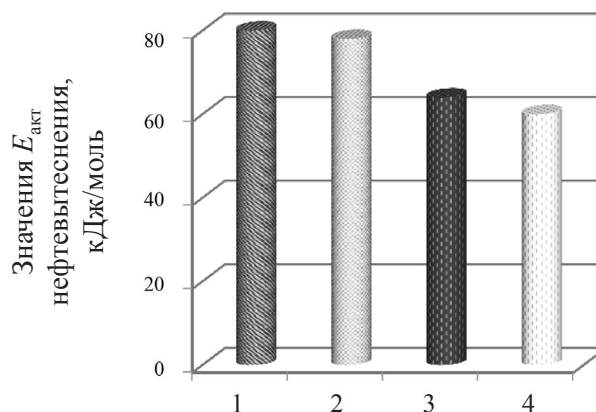


Рис. 4. Значения $E_{\text{акт}}$ нефтевытеснения растворами АБСК/Твин-80 с поверхности доломита (1), кварца (2) и АБСКNa/Твин-80 с поверхности доломита (3), кварца (4)

Fig. 4. Values for $E_{\text{акт}}$ of oil displacement by ABSC / Tween-80 solutions from the surface of dolomite (1) and quartz (2) and ABSCNa / Tween-80 from the surface of dolomite (3) and quartz (4)

Величина адсорбции является одним из важнейших показателей, характеризующих нефтевытесняющую способность ПАВ с поверхности порообразующих минералов. Процесс нефтевытеснения протекает во времени и не является равновесным. Результаты исследования кинетики нефтевытеснения с поверхности доломита и кварца растворами АПАВ/НПАВ ($\alpha_{\text{АПАВ}} 0,8$) представлены на рис. 3.

Как видно из представленных на рис. 3 данных, нефтевытесняющая способность растворов АПАВ/НПАВ ($\alpha_{\text{АПАВ}} 0,8$) находится в антибатной зависимости с адсорбционным взаимодействием смесей АПАВ/НПАВ с поверхностью доломита и кварца. Максимальной нефтевытесняющей способностью как с поверхности доломита, так и кварца обладает смесь, обогащенная АБСКNa, которая в свою очередь характеризуется низкой адсорбционной способностью к исследуемым минеральным материалам ($A_{\text{доломит}} - 2,7 \cdot 10^{-7}$ моль/г, $A_{\text{кварц}} - 0,5 \cdot 10^{-7}$ моль/г). Результаты исследования нефтевытесняющей способности растворов АПАВ/НПАВ подтверждаются рассчитанными значениями энергии активации нефтевытеснения (рис. 4). Полученные данные коррелируют с результатами исследования межфазного натяжения на границе нефть/раствор АБСКNa ($\sigma_{\text{мин}} = 3,8$ мН/м) [3] и свидетельствуют о том, что смесь АБСКNa/Твин-80, в которой отсутствует взаимодействие между молекулами (табл. 2), преимущественно адсорбируется на поверхности раздела нефть/раствор, а не на поверхности порообразующих минералов. Таким образом, отсутствие межмолекулярных взаимодействий в бинарных смесях АПАВ/НПАВ является положительным фактором, предопределяющим эффективность их нефтевытесняющей способности с минеральных материалов как кислой, так и основной природы поверхности.

Заключение. Для бинарной смеси АБСК/Твин-80 с $\alpha_{\text{АБСК}} 0,8$ выявлен синергизм при мицеллообразовании и снижении поверхностного натяжения на границе раздела раствор/воздух, обусловленный гидрофобными и электростатическими взаимодействиями между ПАВ-компонентами смеси. Установлено, что на адсорбционное взаимодействие бинарных смесей АПАВ/НПАВ с поверхностью кварца и доломита оказывают влияние наличие потенциалопределяющих ионов, активирующих поверхность минеральных материалов, заряд и гидратированность противоионов АПАВ, характер межмолекулярных взаимодействий между ПАВ-компонентами смеси.

Максимальной нефтевытесняющей способностью с поверхности доломита и кварца обладает смесь АБСКNa/Твин-80 с $\alpha_{\text{АБСКNa}} 0,8$, характеризующаяся низкой адсорбционной способностью к исследуемым минеральным материалам, в которой отсутствует взаимодействие между ПАВ-компонентами смеси.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шерстнев, Н. М. Применение композиций ПАВ при эксплуатации скважин / Н. М. Шерстнев, Л. М. Гурвич, И. Г. Булина. – М.: Недра, 1988. – 184 с.
2. Теоретические основы разработки композиционных поверхностно-активных веществ для обработки призабойных зон / В. В. Меркулов [и др.] // Междунар. журн. прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 10. – С. 62–70.
3. Межфазные взаимодействия на границе раздела нефть–вода в присутствии анионных поверхностно-активных веществ / О. Н. Опанасенко [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2017. – № 2. – С. 34–38.
4. Шукин, Е. Д. Коллоидная химия / Е. Д. Шукин, А. В. Перцев, Е. А. Амелина. – М.: Высш. шк., 2006. – 444 с.
5. Краснов, К. С. Физическая химия / К. С. Краснов, Н. К. Воробьев, И. Н. Годнев. – М.: Высш. шк., 2001. – Т. 2. – 319 с.
6. Нефтьвытесняющий реагент для неоднородных обводненных пластов: патент РФ № 2159325; МПК: E21B43/22 / В. И. Грайфер, А. И. Владимиров, В. А. Винокуров, В. И. Фролов, В. А. Галустянц, Е. А. Крылова; дата публ.: 20.11.2000.
7. Mixed surfactant systems / P. M. Holland, D. N. Rubingh. – Washington DC: American Chemical Society, 1992. – P. 491–499. <https://doi.org/10.1021/bk-1992-0501.ch001>
8. Rosen, M. J. Surfactant–surfactant interactions in mixed monolayer and mixed micelle formation / M. J. Rosen, Q. Zhou // *Langmuir*. – 2001. – Vol. 17, N. 12. – P. 3532–3537. <https://doi.org/10.1021/la001197b>

References

1. Sherstnev N. M., Gurvich L. M., Bulina I. G. *The use of surfactant compositions in the operation of wells*. Moscow, Nedra Publ., 1988. 184 p. (in Russian).
2. Merkulov V. V., Mantler C. N., Merkulova E. V., Makaev T. S., Germashev V. G. Theoretical basis of the development of composite surfactants for bottom-hole zone treatment. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy = International journal of applied and fundamental research*, 2015, no. 10, pp. 62–70.
3. Opanasenko O. N., Krut'ko N. P., Zhigalova O. L., Luksha O. V., Kozinets T. A. Interphase interactions at the oil-water interface in the presence of anionic surfactants. *Vestsi Natsyyanai' nai akademii navuk Belarusi. Seryya himichnyh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical Series*, 2017, no. 2, pp. 34–38 (in Russian).
4. Schukin E. D., Pertsev A. V., Amelina E. A. *Colloid chemistry*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2006. 444 p. (in Russian).
5. Krasnov K. S., Vorob'ev K. S., Godnev I. N. *Physical chemistry. Vol. 2*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2001. 319 p. (in Russian).
6. Graifer V. I., Vladimirov A. I., Vinokurov V. A., Frolov V. I., Galustyants V. A., Krylova E. A. *Oil-displacing reagent for the heterogeneous watered layers*. Patent RF no.2159325. 2000 (in Russian).
7. Holland P. M., Rubingh D. N. *Mixed surfactant systems*. Washington DC, American Chemical Society, 1992, pp. 491–499. <https://doi.org/10.1021/bk-1992-0501.ch001>
8. Rosen M. J., Zhou Q. Surfactant–surfactant interactions in mixed monolayer and mixed micelle formation. *Langmuir*, 2001, vol. 17, no. 12, pp. 3532–3537. <https://doi.org/10.1021/la001197b>

Информация об авторах

Опанасенко Ольга Николаевна – канд. хим. наук, доцент, зав. лаб., Институт общей и неорганической химии, Национальная академия наук Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ionch@igic.bas-net.by

Крутько Николай Павлович – академик, д-р хим. наук, проф., зав. отделом, Институт общей и неорганической химии, Национальная академия наук Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ionch@igic.bas-net.by

Жигалова Оксана Леонидовна – канд. хим. наук, ст. науч. сотрудник, Институт общей и неорганической химии, Национальная академия наук Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: zhigalova.o@mail.ru

Лукша Ольга Валерьевна – канд. хим. наук, ст. науч. сотрудник, Институт общей и неорганической химии, Национальная академия наук Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: olga.l-75@mail.ru

Козинец Татьяна Анатольевна – науч. сотрудник, Институт общей и неорганической химии, Национальная академия наук Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: tta-85@mail.ru

Information about the authors

Olga N. Opanasenko – Ph. D. (Chemistry), Head of the Laboratory, Institute of General and Inorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ionch@igic.bas-net.by

Nikolay P. Krutko – Academician, D. Sc. (Chemistry), Professor, Head of the Department, Institute of General and Inorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ionch@igic.bas-net.by

Oksana L. Zhigalova – Ph. D. (Chemistry), Senior Researcher, Institute of General and Inorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: zhigalova.o@mail.ru

Olga V. Luksha – Ph. D. (Chemistry), Senior Researcher, Institute of General and Inorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: olga.l-75@mail.ru

Tatyana A. Kozinets – Researcher, Institute of General and Inorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tta-85@mail.ru