

ISSN 1561-8331 (Print)

ISSN 2524-2342 (Online)

УДК 541.183, 544.576; 543.54

<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-3-352-358>

Поступила в редакцию 11.06.2019

Received 11.06.2019

О. Н. Опанасенко, Н. П. Крутько, О. В. Лукша, О. Л. Жигалова

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

РЕГУЛИРОВАНИЕ МЕЖФАЗНЫХ ПРОЦЕССОВ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ И ИХ КОМПОЗИЦИЯМИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ТЕХНОЛОГИЙ НЕФТЕОТДАЧИ

Аннотация. Рассмотрены физико-химические аспекты регулирования межфазных процессов, протекающих на границах раздела нефть–вода–порода в присутствии ионогенных ПАВ и их композиций, с целью разработки эффективных, научно обоснованных инновационных технологий, обеспечивающих повышение нефтеотдачи и нефтепереработки. Проведенный комплекс исследований поверхностных явлений в присутствии ионогенных ПАВ позволил выявить критерии оценки эффективности их действия на границах раздела нефть–вода–порода, что дает возможность прогнозировать поведение ПАВ в реальных условиях нефтедобычи и целенаправленно использовать их в различных технологиях повышения нефтеотдачи.

Ключевые слова: поверхностно-активные вещества, повышение нефтеотдачи, межфазные явления, гидрофобизация, адсорбция, межмолекулярные взаимодействия

Для цитирования. Регулирование межфазных процессов поверхностно-активными веществами и их композициями при разработке технологий нефтеотдачи / О. Н. Опанасенко [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. хим. наук. – 2019. – Т. 55, № 3. – С. 352–358. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-3-352-358>

O. N. Opanasenko, N. P. Krutko, O. V. Luksha, O. L. Zhigalova

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

REGULATION OF INTERPHASE PROCESSES BY SURFACTANTS AND THEIR COMPOSITIONS IN THE DEVELOPMENT OF OIL RECOVERY TECHNOLOGY

Abstract. Physicochemical aspects of the regulation of interfacial processes occurring at the oil-water-rock interface in the presence of ionic surfactants and their compositions are considered with the goal of developing efficient, scientifically grounded innovative technologies ensuring enhanced oil recovery and refining. A complex of studies of surface phenomena in the presence of ionic surfactants made it possible to identify criteria for evaluating the effectiveness of their action at the oil-water-rock interface, which makes it possible to predict the behavior of surfactants in real conditions of oil production and to use them purposefully in various enhanced oil recovery technologies.

Keywords: surfactants, enhanced oil recovery, interfacial phenomena, hydrofobisation, adsorption, intermolecular interactions

For citation. Opanasenko O. N., Krutko N. P., Luksha O. V., Zhigalova O. L. Regulation of interphase processes by surfactants and their compositions in the development of oil recovery technology. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2019, vol. 55, no. 3, pp. (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-3-352-358>

В лаборатории нефтяных и органо-минеральных дисперсий Института общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси (ИОНХ НАН Беларуси) проводятся научные исследования по регулированию межфазных взаимодействий в нефтяных дисперсных системах. Это связано с решением наиболее важных задач в современной нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности и направлено на разработку эффективных, научно обоснованных инновационных технологий, обеспечивающих повышение нефтеотдачи и нефтепереработки, увеличение выхода светлых нефтепродуктов, сокращение потерь ценного нефтяного сырья, а также снижение энергозатрат и улучшение экологической обстановки.

При разработке технологий повышения нефтеотдачи на современном этапе одним из перспективных направлений является использование физико-химических методов с применением поверхностно-активных веществ (ПАВ), поскольку проблемы извлечения высоковязких нефтей связаны прежде всего с протекающими поверхностными явлениями в нефтяном пласте, пред-

ставляющем собой огромное скопление капиллярных каналов и трещин с большой межфазной поверхностью. Физико-химические процессы на межфазных границах раздела нефть–вода–порода приводят к образованию агрегативно устойчивых водонефтяных эмульсий, адсорбции нефти на внутренних поверхностях пустот за счет присутствия нефтяных ПАВ – сернистых, смолисто-асфальтеновых веществ, нефтяных кислот и, как следствие, к потере способности нефти к свободной миграции в пустотном пространстве коллектора [1, 2]. Механизм действия ПАВ заключается в уменьшении капиллярного сопротивления движению водонефтяных эмульсий и переводе связанной с породой нефти в свободное состояние, что обусловлено их способностью смачивать поверхность поровых каналов, уменьшать межфазное натяжение на границе нефть–вода, вытеснять нефть с поверхности породы и диспергировать ее в потоке воды [3, 4]. Наиболее широкое применение в нефтедобыче нашли неионогенные ПАВ (НПАВ), что связано прежде всего с большим объемом их промышленного производства. Однако многолетний опыт использования НПАВ не дал однозначно положительных результатов, так как они обладают слабой поверхностной активностью на границах раздела нефть–вода–порода. В то же время применение ионогенных ПАВ, несмотря на их высокую поверхностную активность, сдерживается из-за отсутствия исследований поверхностных явлений в горных породах в их присутствии, а также влияния структуры ионогенных ПАВ на протекание этих процессов.

В работе [5] нами изучено влияние строения углеводородного радикала анионных ПАВ (АПАВ) на процессы, происходящие на межфазной границе нефть–раствор АПАВ, и структурообразование в их водных растворах. В качестве объектов исследования использованы стеарат, олеат, линолеат натрия ($C_{17}H_{35}COONa$, $C_{17}H_{33}COONa$, $C_{17}H_{31}COONa$ соответственно), вторичный алкилсульфонат натрия ($R_1R_2SO_2ONa$; $R_1 + R_2 = 15-17$) с разветвленным радикалом, алкилбензолсульфонат натрия ($R-C_6H_4SO_2ONa$; $R = 12-14$). Установлено, что линейное строение углеводородного радикала и насыщенность углеводородных связей в молекуле стеарата натрия, наличие ароматического кольца в неразветвленном углеводородном радикале алкилбензолсульфоната натрия (АБСКNa) способствуют увеличению их адсорбции на границе нефть–вода, приводящей к максимальному снижению межфазного натяжения до 3,4 мН/м (рис. 1). Присутствие двух двойных связей в молекуле линолеата натрия приводит к снижению адсорбции в 1,3 раза и поверхностной активности на границе раздела нефть–вода и, как следствие, межфазное натяжение снижается только до 8,1 мН/м. Низкая поверхностная активность алкилсульфоната натрия обусловлена стерическими затруднениями, вызванными разветвлением структуры и увеличением числа полярных групп в молекуле. Так, по эффективности снижения межфазного натяжения на границе нефть–вода АПАВ располагаются в ряду стеарат натрия < алкилбензолсульфонат натрия < олеат натрия < алкилсульфонат натрия < линолеат натрия.

Анализ структурно-реологических параметров показал, что максимальными значениями вязкости практически неразрушенной структуры η_0^* , граничного напряжения сдвига P_m и отношений пределов прочности P_m/P_{kl} характеризуются растворы стеарата натрия и АБСКNa, что позволяет обеспечить устойчивость нефтяных капель к коалесценции и невозможность обращения фаз, облегчая процесс вытеснения нефти. Таким образом, критерием оценки эффективности действия АПАВ на границе нефть–вода является линейность и насыщенность углеводородного радикала, а при уменьшении его длины – наличие ароматического кольца в структуре. Полученные закономерности изменения межфазного взаимодействия на границе свободная нефть–вода в присутствии АПАВ коррелируют с результатами исследования их нефтеотмывающей способности.

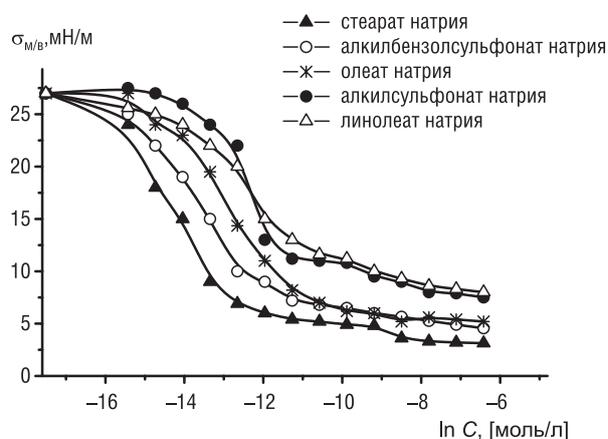


Рис. 1 Изотермы межфазного натяжения на границе нефть–раствор АПАВ при температуре 20 °С

Fig. 1. Isotherms of interfacial tension on the oil – anionic surfactant solution interface at the temperature of 20 °С

Т а б л и ц а 1. 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 1. The values of 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 non-ionic surfactants in the 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

ход Рубина и Розена [6, 7], 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. 1) 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.

Показано, что отрицательные отклонения от идеальности обнаружены в смеси, обогащенной АБСК, при формировании как смешанных мицелл, так и адсорбционных слоев. Величины параметров межмолекулярного взаимодействия β^m и β^σ свидетельствуют об избыточном притяжении молекул компонентов смеси в смешанных мицеллах и адсорбционных слоях. 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. Характер межмолекулярных взаимодействий в смесях АБСК/Твин-80 и АБСКNa/Твин-80 также оказывает влияние и на их адсорбцию с минераль-

Т а б л и ц а 2. Адсорбция смесей АПАВ/НПАВ на поверхности минеральных материалов

Table 2. The adsorption of the mixtures anionic/non-ionic surfactants on the surface of inorganic materials

Соотношение АПАВ/НПАВ в смеси	Количество адсорбированного ПАВ	
	$A_{\text{доломит}} \times 10^7$ моль/г	$A_{\text{кварц}} \times 10^7$ 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

Эффективность действия АПАВ на границе нефть–вода может быть значительно снижена вследствие их адсорбции на породе. Повысить избирательность действия АПАВ возможно при их использовании в смеси с НПАВ. Преимуществом смеси АПАВ/НПАВ также 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.

Для оценки совместного поведения смесей АБСК/Твин-80 и АБСКNa/Твин-80 на границе раздела раствор–воздух был использован под-

ными материалами как кислот, так и основной природы поверхности (табл. 2).

Установлено, 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. 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 (рис. 2). После установления адсорбционного равновесия величина избыточной

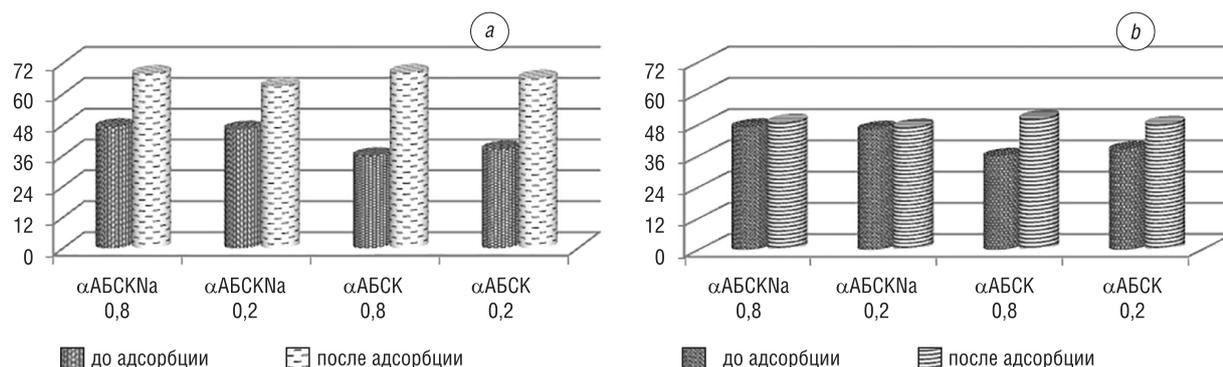


Рис. 2. Значения поверхностного натяжения растворов смесей ПАВ до и после адсорбции на поверхности доломита (а) и кварца (б)

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

адсорбции А на доломите для АБСКNa/Твин 80 превышает в 5–6,8, а для АБСК/Твин 80 – в 1,6–1,8 раза этот показатель на кварце.

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 образованием реакционноспособных ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} на поверхности доломита. На величину адсорбции АПАВ/НПАВ на поверхности доломита и кварца заметное влияние оказывают заряд и гидратированность противоиона АПАВ. Количество адсорбированного ПАВ из смеси АБСКNa/Твин 80 на поверхности минерального материала значительно ниже количества адсорбированного ПАВ из 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, на адсорбционное взаимодействие смесей АПАВ/НПАВ с поверхностью кварца и доломита оказывает влияние наличие потенциалопределяющих ионов, активирующих поверхность минеральных материалов, заряд и гидратированность противоионов АПАВ. Отсутствие межмолекулярных взаимодействий между ПАВ-компонентами в смесях АПАВ/НПАВ и низкая адсорбционная способность к минеральным материалам являются положительными факторами, предопределяющими избирательность их действия на границе раздела нефть–вода и, как следствие, высокую нефтевытесняющую способность [6].

Замедление скорости фильтрации нефти может быть обусловлено и адсорбционным взаимодействием нефтяных ПАВ с поверхностью минеральных материалов. Для снижения прочности сцепления пленочной нефти с породой перспективным является использование катионных ПАВ (КПАВ), которые вследствие их более высокой активности, чем нефтяные ПАВ, могут вызвать инверсию смачивания поверхности. В качестве КПАВ для исследований были выбраны оксиэтилированные производные N-алкилпропилендиамин (ОЭДА), соль четвертичного аммониевого основания (ЧАС) и композиция из аминокислотных производных жирных кислот рапсового масла, содержащая глицерин (АПЖК).

По результатам смачивания минеральных материалов тестовыми жидкостями установлено, что модифицирование поверхностей кварца и доломита КПАВ приводит к уменьшению значений констант капиллярности практически в 2 раза, свидетельствуя об адсорбции КПАВ в поровом пространстве и образовании сольватных оболочек, снижающих радиус капилляров

и изменяющих структуру эффективного пустотного пространства. Установлено, что по степени гидрофобизирующего действия исследуемые КПАВ располагаются в ряду АПЖК > ОЭДА > ЧАС. Краевые углы смачивания при использовании ОЭДА и ЧАС не превышают 60–70°, что свидетельствует о частичной гидрофобизации поверхности минеральных материалов, в то время как применение композиции из АПЖК позволяет достичь краевых углов смачивания близких к 90° (рис. 3). Эффективность гидрофобизирующего действия КПАВ обусловлена строением гидрофильной части их молекул – сбалансированностью двух (для ОЭДА) и шести (для композиции из АПЖК) аминогрупп в алкильных цепях и отсутствием стерических затруднений при адсорбционном взаимодействии с поверхностью минеральных материалов, присущих ЧАС, значения констант капиллярности при применении которого изменяются незначительно.

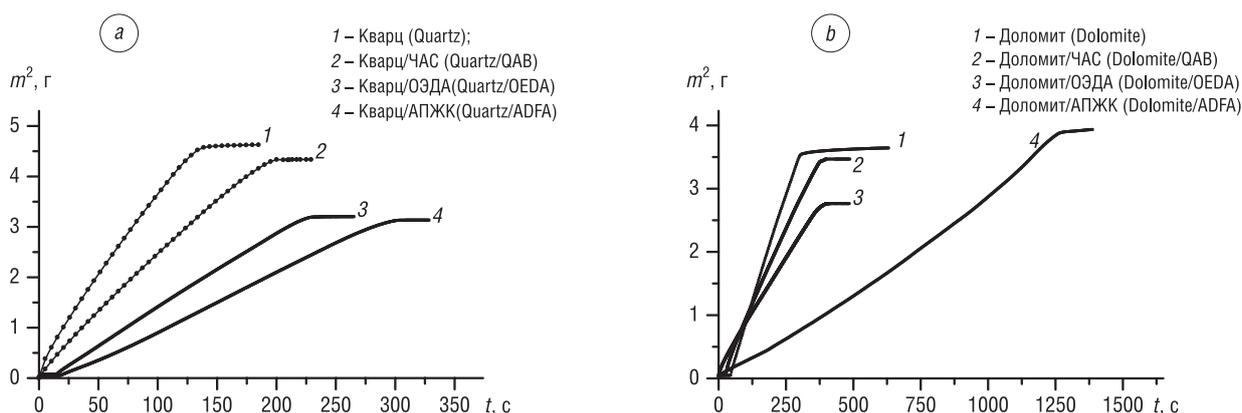


Рис. 3. Кинетические кривые смачивания водой поверхностей кварца (а) и доломита (б), модифицированных КПАВ
Fig. 3. Kinetic curves of water wetting of the surfaces of quartz (a) and dolomite (b) modified by cationic surfactants

Изменение природы межфазных взаимодействий наиболее ярко проявляется при модифицировании поверхности минеральных материалов композицией из АПЖК, на что указывает существенное снижение значений свободной поверхностной энергии ($\Delta\sigma_{\text{TB}} = 8,2\text{--}13,8$ мН/м) по сравнению с индивидуальными ОЭДА и ЧАС ($\Delta\sigma_{\text{TB}} = 1,2\text{--}6,4$ мН/м) (табл. 3).

Т а б л и ц а 3. Значения свободной поверхностной энергии минеральных материалов на границе раздела твердое–воздух при 20 °С

T a b l e 3. Free surface energy values of the inorganic materials at the solid–air interface at 20 °C

σ , мН/м	Доломит	Доломит/ЧАС	Доломит/ОЭДА	Доломит/АПЖК	Кварц	Кварц/ЧАС	Кварц/ОЭДА	Кварц/ АПЖК
σ_{TB}^d	30,1	26,8	26,3	23,1	26,5	25,8	24,1	21,4
$\Delta\sigma_{\text{B}}^d$		3,3	3,8	7,0		0,7	2,4	5,1
σ_{TB}^p	14,6	12,7	11,0	7,8	16,3	15,8	14,5	13,2
$\Delta\sigma_{\text{B}}^p$		1,9	3,6	6,8		0,5	1,8	3,1
σ_{TB}	44,7	39,5	38,3	30,9	42,8	41,6	38,6	34,6
$\Delta\sigma_{\text{TB}}$		5,2	6,4	13,8		1,2	4,2	8,2

П р и м е ч а н и е. $\Delta\sigma$ – изменение значений свободной поверхностной энергии после модифицирования поверхности минерального материала

Важно отметить, что гидрофобизация доломита происходит эффективнее по сравнению с кварцем, что находит отражение в более существенном изменении термодинамических характеристик поверхности σ_{TB} . Это связано с усилением хемосорбционного взаимодействия благодаря наличию ионов CO_3^{2-} , обеспечивающих увеличение плотности отрицательного заряда поверхности. Основной вклад в снижение σ_{TB} композицией из АПЖК вносит полярная составляющая σ_{TB}^p , свидетельствуя о ее более высокой адсорбционной способности на границе раздела фаз, что обусловлено как наличием большого количества аминогрупп, способных хемосорбционно за-

крепляются на активных центрах поверхностей кварца и доломита по сравнению с индивидуальными ОЭДА и ЧАС, так и специфической адсорбцией ионов OH^- глицерина (рис. 4). Кроме того, присутствие глицерина способствует повышению растворимости композиции из АПЖК, уменьшению диэлектрической проницаемости среды и увеличению электростатического отталкивания между полярными группами. Это приводит к ослаблению гидрофобных взаимодействий в растворе композиции из АПЖК и повышению ее поверхностной активности [9].

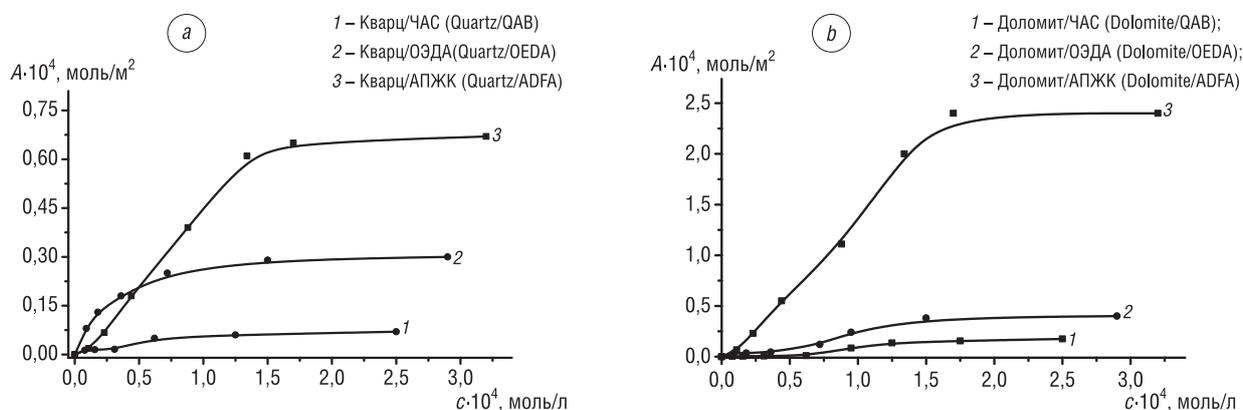


Рис. 4. Изотермы адсорбции КПАВ на поверхности кварца (а) и доломита (б)

Fig. 4. Adsorption isotherms of the cationic surfactants on the surface of quartz (a) and dolomite (b)

Анализируя изменения значений краевых углов смачивания доломита после адсорбции КПАВ из минерализованных растворов, установлено негативное влияние электролитов на гидрофобизирующую способность индивидуальных ПАВ, проявляющееся в снижении краевых углов смачивания. Сохранить гидрофобизирующий эффект даже в условиях сильной минерализации позволяет присутствие глицерина в композиции из АПЖК – краевые углы смачивания достигают 90° .

На основании проведенного комплекса исследований поверхностных явлений в присутствии ионогенных ПАВ выявлены критерии оценки эффективности их действия на межфазных границах раздела нефть–вода–порода, что позволяет прогнозировать поведение ПАВ в реальных условиях нефтедобычи и целенаправленно использовать их в различных технологиях повышения нефтеотдачи.

Список использованных источников

1. Башкирцева, Н. Ю. Коллоидно-химические свойства промышленных ПАВ для подготовки нефти / Н. Ю. Башкирцева, Л. А. Гараев, О. Ю. Сладовская // Вестн. Казан. технол. ун-та. – 2003. – №3. – С. 252–261.
2. Применение ПАВ и композиций на их основе для увеличения нефтеотдачи пластов. Механизм вытеснения нефти из пористой среды с применением ПАВ [Электронный ресурс] // Добыча нефти и газа. – Режим доступа: <http://oilloom.ru>. – Дата доступа: 6.12.2016.
3. Солодовников, А. О. Исследование межфазного натяжения на границе нефть–кислотный раствор в присутствии поверхностно-активных веществ / А. О. Солодовников, К. В. Киселев, О. В. Андреев // Вестн. Тюмен. гос. ун-та. – 2013. – №5. – С. 148–155.
4. 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.
5. Межфазные взаимодействия на границе раздела нефть–вода в присутствии анионных поверхностно-активных веществ / О. Н. Опанасенко [и др.] // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2017. – №2. – С. 34–38.
6. Mixed surfactant systems / ed. by P. M. Holland, D. N. Rubingh. – Washington DC: American Chemical Society, 1992. – 451 p. <https://doi.org/10.1021/bk-1992-0501>
7. Rosen, M. J. Surfactant-surfactant interactions in mixed monolayer and mixed micelle formation / M. J. Rosen, Q. Zhou // Langmuir. – 2001. – Vol. 17, No. 12. – P. 3532–3537. <https://doi.org/10.1021/la001197b>
8. Адсорбционное взаимодействие бинарных смесей ПАВ на межфазных границах раздела / О. Н. Опанасенко [и др.] // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2018. – Т. 54, №4. – С. 399–405. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2018-54-4-399-405>
9. Опанасенко, О. Н. Регулирование коллоидно-химических свойств растворов смесей катионных поверхностно-активных веществ низкомолекулярными спиртами / О. Н. Опанасенко, О. Л. Жигалова, О. В. Лукша // Свиридовские чтения: сб. ст. – Минск: БГУ, 2011. – Вып. 7. – С. 147–156.

References

1. Bashkirseva N. Yu., Garaev L. A., Sladovskaya O. Yu. Colloid-chemical properties of commercial surfactants for oil treatment. *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta = Bulletin of Kazan University of Technology*, 2003, no. 3, pp. 252–261 (in Russian).
2. The use of surfactants and compositions on their basis, to increase oil recovery. The mechanism of oil displacement from a porous medium with the use of surfactants. *Mining of oil and gas*. Available at: <http://oilloot.ru>. (accessed 6 December 2016) (in Russian).
3. Solodovnikov A. O., Kiselev K. V., Andreev O. V. The study of interfacial tension at the interface oil-acid solution in the presence of surfactants. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Tyumen State University*, 2013, no. 5, pp. 148–155 (in Russian).
4. Merkulov V. V., Mantler C. N., Merkulova E. V., Makaev T. S., Germashev V. G Theoretical basis of working out of composite surfactants for treatment bottom-hole zones. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy = International Journal of Applied and Basic Research*, 2015, no. 10, pp. 62–70 (in Russian).
5. 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 Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical Series*, 2017, no. 2, pp. 34–38 (in Russian).
6. Holland P. M., Rubingh D. N. *Mixed surfactant systems*. Washington DC, American Chemical Society, 1992. 451 p. <https://doi.org/10.1021/bk-1992-0501>
7. Rosen M. J., Zhou Q. Surfactant-surfactant interactions in mixed monolayer and mixed micelle formation. *Langmuir*, 2001, vol. 17, no. 2, pp. 3532–3537. <https://doi.org/10.1021/la001197b>
8. Opanasenko O. N., Krut'ko N. P., Zhigalova O. L., Luksha O. V., Kozinets T. A. Adsorption interaction of binary surfactant mixtures at phase interface. *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>
9. Opanasenko O. N., Zhigalova O. L., Luksha O. V. The regulation of colloidal chemical properties of cationic surfactants solutions with low molecular weight alcohols. *Sviridovskie chteniya: sb. st.* [Sviridov readings: Digest of articles]. Minsk, Belarusian State University, 2011, Is. 7, pp. 147–156 (in Russian).

Информация об авторах

Опанасенко Ольга Николаевна – д-р 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, профессор, 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

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

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

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, Surganov 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, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ionch@igic.bas-net.by

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

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