

КАЛОИДНАЯ ХИМИЯ
COLLOIDAL CHEMISTRY

УДК 541.183,544.576;543.54
<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-2-142-148>

Поступила в редакцию 22.01.2019
Received 22.01.2019

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

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

**ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ КАТИОННЫХ ПАВ НА ПРОЦЕССЫ
СМАЧИВАНИЯ ПОРОДОБРАЗУЮЩИХ МИНЕРАЛОВ**

Аннотация. Изучены межфазные взаимодействия катионных ПАВ различного химического строения на границе раздела раствор/тонкодисперсный минеральный материал (кварц и доломит). Установлено, что модифицирование поверхностей кварца и доломита катионными ПАВ приводит к изменению структуры и радиуса капилляров вследствие образования адсорбционно-сольватных оболочек. Гидрофобизирующая способность катионных ПАВ определяется строением гидрофильной части их молекул – сбалансированностью аминогрупп в алкильных цепях и отсутствием стерических затруднений при адсорбционном взаимодействии с поверхностью минеральных материалов. Эффективной гидрофобизирующей способностью как из водных, так и высокоминерализованных растворов обладает композиция из аминокислотных жирных кислот рапсового масла, содержащая шесть аминогрупп и многоатомный спирт глицерин.

Ключевые слова: поверхностно-активные вещества, константа капиллярности, угол смачивания, минеральный материал, свободная поверхностная энергия

Для цитирования. Влияние химического строения катионных ПАВ на процессы смачивания породообразующих минералов / О. Н. Опанасенко [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. хим. наук. – 2019. – Т. 55, № 2. – С. 142–148. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-2-142-148>

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

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

**INFLUENCE OF THE CHEMICAL STRUCTURE OF CATION SURFACTANTS
ON THE WETTING PROCESS OF ROCK-FORMING MINERALS**

Abstract. Interfacial interactions of cationic surfactants of various chemical structures at the solution / finely dispersed mineral material (quartz and dolomite) interface were studied. It is established that the modification of the surfaces of quartz and dolomite with cationic surfactants leads to a change in the structure and radius of the capillaries due to the formation of adsorption-solvate shells. The hydrophobic ability of cationic surfactants is determined by the structure of the hydrophilic part of their molecules – the balance of amino groups in the alkyl chains and the absence of steric hindrances during adsorption interaction with the surface of mineral materials. The mixture of surfactants containing six amino groups and a polyhydric alcohol glycerin has an effective hydrophobic ability from both aqueous and highly mineralized solutions.

Keywords: surfactants, capillarity constant, contact angle, mineral material, free surface energy

For citation. Opanasenko O. N., Krutko N. P., Zhigalova O. L., Luksha O. V. Influence of the chemical structure of cation surfactants on the wetting process of rock-forming minerals. *Vestsi Natsyonal'nei akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2019, vol. 55, no. 2, pp. 142–148 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-2-142-148>

Введение. Одним из перспективных направлений в области восстановления и увеличения проницаемости призабойной зоны пласта нефтяных скважин является применение физико-химических технологий, позволяющих регулировать смачиваемость пород-коллекторов [1]. Породы пласта представляют собой сложные структуры, часто характеризующиеся разнообразным минеральным составом, как правило, это кварцы, карбонаты, доломиты, которые до миграции в них нефти являются гидрофильными. Для увеличения притока нефти из пласта целесообразно

использовать растворы катионных ПАВ (КПАВ), которые способны вызывать инверсию смачивания поверхности пористой среды, обладая гидрофобизирующими свойствами [2]. Несмотря на широкий круг промышленно выпускаемых КПАВ, их ассортимент в нефтяной промышленности по ряду причин весьма ограничен. Прежде всего это связано с недостаточной изученностью поверхностных явлений в горных породах, протекающих в присутствии КПАВ, таких как изменение смачиваемости породы водой или нефтью, вытеснение остаточной нефти из пласта и др., а также влияния структуры КПАВ на протекание этих процессов.

Цель работы – изучение межфазных взаимодействий КПАВ различного химического строения на границе раздела раствор/минеральный материал путем оценки их адсорбционной способности, процессов смачивания и изменения свободной поверхностной энергии тонкодисперсных минеральных материалов.

Экспериментальная часть. В качестве объектов исследования использованы КПАВ с одинаковой длиной углеводородного радикала (C₁₆–C₁₈), отличающиеся строением гидрофильной части молекулы, – окситилированные производные N-алкилпропилендиамин (ОЭДА), соль четвертичного аммониевого основания (ЧАС), композиция из аминокислотных жирных кислот рапсового масла, содержащая шесть аминокислотных групп и глицерин (АПЖК), тонкодисперсные фракции (<0,071 мкм) кварца и доломита (табл. 1).

Таблица 1. Структурно-сорбционные характеристики тонкодисперсных минеральных материалов

Table 1. Structural and sorption characteristics of fine mineral materials

Минеральный материал	Объем пор $V_p \times 10^3$, см ³ /г	Удельная поверхность A_s , м ² /г	Средний диаметр мезопор d_p , нм
Кварц	3,14	1,14	11,15
Доломит	28,09	10,75	16,66

Определение равновесной концентрации производных аминов в результате взаимодействия их водных растворов с минеральным материалом проводили фотометрическим методом на фотокolorиметре КФК-2МП с использованием светофильтра с длиной волны $\lambda = 430$ нм [3, 4]. Углы смачивания тонкодисперсных минеральных материалов оценивали методом сорбции Вошборна [5]. Согласно методу Вошборна, жидкость при соприкосновении с материалом поднимается за счет капиллярных сил, которые подчиняются уравнению

$$t = Am^2, \tag{1}$$

где t – время соприкосновения, с; m – масса жидкости, г; A – постоянная материала, зависящая от свойств жидкости и поверхности и определяемая по уравнению:

$$A = \frac{\eta}{c\rho^2\sigma\cos\theta}, \tag{2}$$

где m – масса жидкости, г; t – время, с; η – вязкость жидкости, мПа·с; ρ – плотность жидкости, г/см³; σ – поверхностное натяжение жидкости, мН/м; θ – краевой угол смачивания, °; c – константа капиллярности материала.

Константа капиллярности материала определяется с использованием тестовой жидкости гексан, обладающего минимальным поверхностным натяжением и максимальной смачивающей способностью ($\cos\theta = 1$), и зависит от характеристик тонкодисперсного материала и геометрии измерительной ячейки:

$$c = \frac{1}{2}\pi^2 r_k^5 n_k^2,$$

где r_k – радиус капилляров, см; n_k^2 – число капилляров.

Краевой угол смачивания рассчитывается по уравнению

$$\cos\theta = \frac{\eta}{Ac\rho^2\sigma}. \tag{3}$$

Модифицирование исследуемых минеральных материалов проводили мицеллярными растворами (0,2 М) КПАВ в течение суток. Измерения были проведены с использованием прибора «Процессор-тензиометр К100 МК2». Расчет краевых углов смачивания и константы капиллярности материала осуществлялся с использованием программы LabDesk™ («Krüss», Германия) [6].

Т а б л и ц а 2. Характеристики тестовых жидкостей при 20°C

Table 2. The characteristics of the test liquids at 20°C

Жидкость	$\sigma_{ж}$, мН/м	$\sigma_{ж}^d$, Н/м	$\sigma_{ж}^p$, мН/м	ρ , г/см ³	η , мПа·с
Гексан	18,4	18,4	0,0	0,661	0,326
α -Бромнафталин	44,6	44,6	0,0	1,483	5,107
Этиленгликоль	47,7	30,9	16,8	1,109	21,810
Вода	72,8	21,8	51,0	0,998	1,002

По результатам определения краевых углов смачивания тестовыми жидкостями с известными полярными и дисперсионными составляющими (табл. 2) по методу Оуэнса, Вендта, Рабеля и Каелбле [7] определена свободная поверхностная энергия тонкодисперсных минеральных материалов (4). Расчет свободной поверхностной энергии осуществлялся с использованием программы LabDesk™.

$$\frac{\sigma_{ж}(\cos\theta + 1)}{2\sqrt{\sigma_{ж}^d}} = \sqrt{\sigma_{ТВ}^p} \times \frac{\sqrt{\sigma_{ж}^p}}{\sqrt{\sigma_{ж}^d}} + \sqrt{\sigma_{ТВ}^d}, \quad (4)$$

где σ – поверхностное натяжение; σ_p – полярная составляющая поверхностного натяжения, которая определяется диполь-дипольным взаимодействием, водородными связями и кислотно-основным взаимодействием Льюиса; σ_d – дисперсная составляющая поверхностного натяжения, которая определяется Ван-дер-Ваальсовым взаимодействием; θ – краевой угол смачивания.

Результаты и их обсуждение. Сравнительный анализ результатов смачивания тонкодисперсных минеральных материалов гексаном до и после обработки мицеллярными растворами КПАВ показал, что модифицирование поверхностей кварца и доломита КПАВ приводит к уменьшению значений констант капиллярности материалов (табл. 3). Снижение их значений может свидетельствовать об адсорбции КПАВ в поровом пространстве и образовании сольватных оболочек, уменьшающих радиус капилляров и изменяющих структуру [8]. ОЭДА и композиция из АПЖК снижают значения констант капиллярности материалов на 35 и 50 %, независимо от природы поверхности минерального материала. Эффективность их действия может быть 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. Применение ЧАС снижает значения констант капиллярности материалов после модифицирования на 8 и 19 % для доломита и кварца соответственно.

Т а б л и ц а 3. Константы капиллярности тонкодисперсных минеральных материалов

Table 3. The capillarity constants of micronized mineral materials

	Кварц	Кварц/ЧАС	Кварц/ОЭДА	Кварц/АПЖК	Доломит	Доломит/ЧАС	Доломит/ОЭДА	Доломит/АПЖК
$c \times 10^6$, см ⁵	8,25	6,75	5,32	4,35	3,36	3,10	2,21	1,60

Различия в химическом строении КПАВ оказывают существенное влияние на изменения краевых углов смачивания (табл. 4) и свободной поверхностной энергии (табл. 5). Кинетические кривые смачивания водой поверхностей кварца и доломита, модифицированных КПАВ, представлены на рис. 1.

Т а б л и ц а 4. Краевые углы смачивания тонкодисперсных минеральных материалов

Table 4. The contact angles of micronized mineral materials

Образец	Краевые углы смачивания, °		
	α-бромнафталином	этиленгликолем	водой
Кварц	38,2	36,4	44,2
Кварц / АПЖК	51,6	69,7	85,1
Кварц / ОЭДА	41,6	31,3	63,6
Кварц / ЧАС	39,8	30,5	62,3
Доломит	37,4	33,5	48,8
Доломит / АПЖК	57,4	45,6	89,9
Доломит / ОЭДА	56,2	39,6	68,9
Доломит / ЧАС	51,5	30,4	71,2

Т а б л и ц а 5. Значения свободной поверхностной энергии тонкодисперсных минеральных материалов на границе раздела твердое / воздух при 20 °С

Table 5. The free surface energy of micronized mineral materials at the solid / air interface at 20 °С

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

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

Проведенные исследования показали, что по степени гидрофобизирующего действия исследуемые КПАВ располагаются в ряду: композиция из 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°.

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

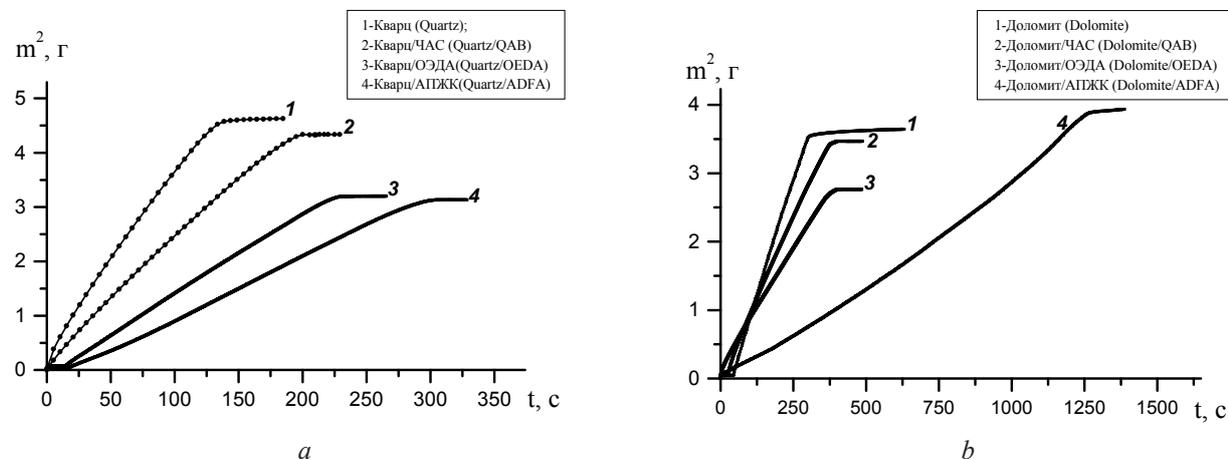


Рис. 1. Кинетические кривые смачивания водой кварца (а) и доломита (b)

Fig. 1. Kinetic curves of water wetting of quartz (a) and dolomite (b)

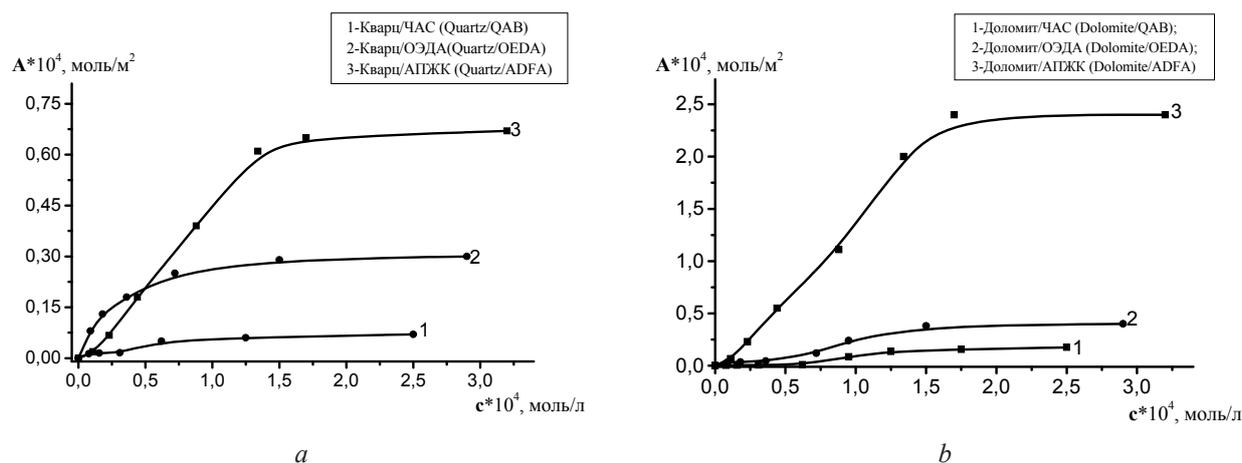


Рис. 2. Изотермы адсорбции КПАВ из водных растворов на поверхности кварца (а) и доломита (b)

Fig. 2. The adsorption isotherms of the cationic surfactants from aqueous solutions on the surface of quartz (a) and dolomite (b)

в снижение $\sigma_{ТВ}$ композицией из АПЖК вносит полярная составляющая $\sigma_{ТВ}^p$, свидетельствуя о ее более высокой адсорбционной способности на границе раздела фаз.

Следует отметить, что гидрофобизация доломита происходит эффективнее по сравнению с кварцем, что находит отражение и в более существенном изменении свободной поверхностной энергии $\Delta\sigma_{ТВ}$ (табл. 5). Это, вероятно, связано с усилением хемосорбционного взаимодействия благодаря наличию ионов CO_3^{2-} , обеспечивающих увеличение плотности отрицательного заряда поверхности. Полученные данные подтверждаются результатами исследования процессов адсорбции КПАВ из водных солянокислых растворов при рН 2 и Т 20 °С (рис. 2).

Зависимости адсорбции КПАВ из водных растворов на поверхности кварца и доломита от их равновесной концентрации в растворе, представленные на рис. 2, описываются изотермами Лэнгмюра, характерными для систем с сильным межмолекулярным взаимодействием. Сопоставительный анализ изотерм адсорбции показал, что величина предельной адсорбции A для композиции из АПЖК в 2 и 6 раз выше предельной адсорбции ОЭДА на поверхности кварца и доломита соответственно и на порядок превышает значения A для ЧАС. Высокая гидрофобизирующая способность композиции из АПЖК, вероятно, связана как с наличием большего количества функциональных групп по сравнению с индивидуальными ОЭДА и ЧАС, так и со специфической адсорбцией ионов OH^- глицерина, входящего в ее состав. Кроме того, как было нами показано ранее [9], присутствие в смешанных растворах КПАВ низкомолекулярных спиртов, в том числе и глицерина, способствует повышению их растворимости, уменьшению диэлектрической проницаемости среды и увеличению электростатического отталкивания между полярными группами. Это приводит к ослаблению гидрофобных взаимодействий в смешанных растворах КПАВ, что отражает снижение свободной энергии мицеллообразования $\Delta\Phi_m$. Абсолютное значение $\Delta\Phi_m$ в среднем изменяется с 26,2 до 20,1 мДж/моль, а значения поверхностной активности увеличиваются в среднем в 1,5 раза.

При модифицировании поверхности пористой среды (продуктивных пластов – коллекторов) с использованием гидрофобизирующих реагентов следует учитывать влияние электролитов на процессы смачивания, происходящие на границе раздела раствор КПАВ/минеральный материал, поскольку в реальных условиях смачиваемость пород пластов-коллекторов осуществляется нефтепромысловыми водами, представляющими собой раствор минеральных солей различного состава и концентрации, образующих с водой ионно-гидратные комплексы [10]. В связи с этим представляло интерес изучить влияние степени минерализации на стабильность растворов КПАВ и изменения краевых углов смачивания поверхности доломита водой. Для оценки стабильности были приготовлены 0,5 %-ные растворы КПАВ с содержанием хлорида натрия 160 и 250 г/л, которые выдерживали при температуре 25 °С в течение 3 сут. Состояние растворов оценивали через час, сутки и 3 сут после приготовления. Результаты исследования представлены в табл. 6 и на рис. 3.

Таблица 6. Влияние степени минерализации на стабильность растворов КПАВ
 Table 6. The influence of mineralization degree on the stability of cationic surfactants solutions

ПАВ	Степень минерализации, г/л								
	–			160			250		
	состояние раствора								
	через час	через сутки	через 3 сут	через час	через сутки	через 3 сут	через час	через сутки	через 3 сут
ОЭДА	Стабилен								
ЧАС	Стабилен								
АПЖК	Стабилен								

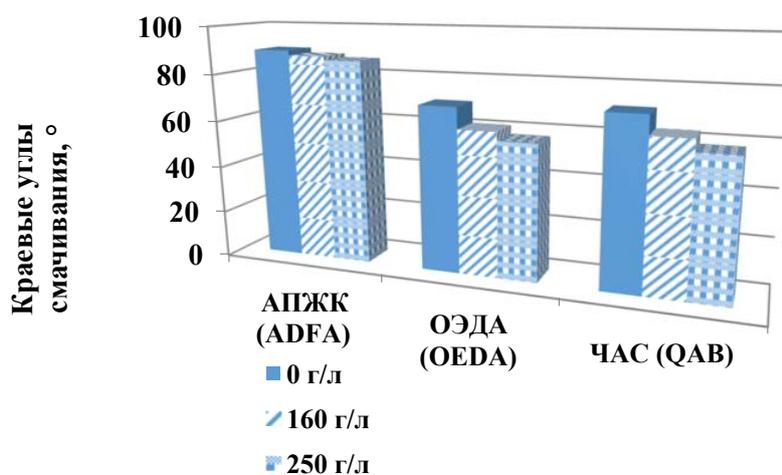


Рис. 3. Влияние степени минерализации на краевые углы смачивания поверхности доломита, модифицированного КПАВ

Fig. 3. The influence of mineralization degree on contact angles of the surface of dolomite modified by cationic surfactants

Результаты исследования показали, что КПАВ хорошо растворимы в минерализованной воде, растворы их стабильны во времени, не мутнеют и не происходит выпадения осадка в течение длительного времени. Анализируя изменения значений краевых углов смачивания доломита после адсорбции КПАВ из минерализованных растворов, показано, что минерализация может оказывать негативное воздействие на гидрофобизирующую способность индивидуальных ПАВ (рис. 3), проявляющееся в снижении краевых углов смачивания. Однако использование композиции из АПЖК, содержащей шесть аминогрупп и многоатомный спирт глицерин, позволяет сохранить гидрофобизирующий эффект даже в условиях сильной минерализации.

Заключение. На основании изучения межфазных взаимодействий КПАВ различного химического строения на границе раздела раствор/минеральный материал путем оценки их адсорбционной способности, процессов смачивания и изменения свободной поверхностной энергии тонкодисперсных минеральных материалов установлено, что модифицирование поверхностей кварца и доломита КПАВ приводит к изменению структуры и радиуса капилляров вследствие образования адсорбционно-сольватных оболочек. Показано, что независимо от природы поверхности минерального материала гидрофобизирующая способность КПАВ определяется строением гидрофильной части их молекул – сбалансированностью аминогрупп в алкильных цепях и отсутствием стерических затруднений при адсорбционном взаимодействии с поверхностью минеральных материалов. Композиция из АПЖК, содержащая шесть аминогрупп и многоатомный спирт глицерин, обладает эффективной гидрофобизирующей способностью как из водных, так и высокоминерализованных растворов.

Список использованных источников

1. Палий, А. О. Применение гидрофобизирующих веществ для обработок призабойных зон скважин / А. О. Палий, А. Т. Горбунов // Нефтяное хозяйство. – 1993. – № 10. – С. 64–65.
2. Горбунов А. Т. Применение катионактивных ПАВ для повышения продуктивности скважин / А. Т. Горбунов, В. А. Широков, Д. Ю. Крянгов // Нефтяное хозяйство. – 1992. № – 9. – С. 20–22.
3. Washburn, E. W. The dynamics of capillary flow / E. W. Washburn // *Physical review*. – 1921. – Vol. 17, No 3. – P. 273–282. <https://doi.org/10.1103/physrev.17.273>
4. Theory [Electronic resource] // KRÜSS GmbH. – 2008. – Mode of access: <http://www.kruss.info>. – Date of access: 14.11.2008.
5. Owens D. K. Estimation of the surface free energy of polymers / D. K. Owens, R. C. Wendt // *J. Applied Polymer Sci.* – 1969. – Vol. 13, No 8. – P. 1741–1747. <https://doi.org/10.1002/app.1969.070130815>
6. Capillary rise for thermodynamic characterization of solid particle surface / A. Siebold // *J. Colloid Interface Sci.* – 1997. – Vol. 186, No 1. – P. 60–70. <https://doi.org/10.1006/jcis.1996.4640>
7. 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. / редкол.: О. А. Ивашкевич (пред.) [и др.]. – Минск: БГУ, 2011. – Вып. 7. – С. 147–156.
8. Королев, М. И. Подбор химической композиции для вытеснения нефти из обводненных коллекторов / М. И. Королев, М. К. Рогачев // Инженер-нефтяник. – 2017. – № 2. – С. 48–53.

References

1. Paliy A. O., Gorbunov A. T. The use of waterproofing agents for processing of wellbottom bands. *Neftyanoe hozyajstvo = Oil industry*, 1993, no. 10, pp. 64–65 (in Russian).
2. Gorbunov A. T., Shirokov V. A., Kryanov D. Yu. The use of cationic surfactants for increase of borehole productivity. *Neftyanoe hozyajstvo = Oil industry*, 1992, no. 9, pp. 20–22 (in Russian).
3. Washburn E. W. The dynamics of capillary flow. *Physical review*, 1921, vol. 17, no. 3, pp. 273–282. <https://doi.org/10.1103/physrev.17.273>
4. Theory. *KRÜSS GmbH*. 2008. Available at: <http://www.kruss.info>. (accessed 14 November 2008).
5. Owens D. K., Wendt R. C. Estimation of the surface free energy of polymers. *Journal of Applied Polymer Science*, 1969, vol. 13, no 8, pp. 1741–1747. <https://doi.org/10.1002/app.1969.070130815>
6. Siebold A., Walliser A., Nardin M., Oppliger M., Schultz J. Capillary rise for thermodynamic characterization of solid particle surface. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1997, vol. 186, no 1, pp. 60–70. <https://doi.org/10.1006/jcis.1996.4640>
7. 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 cheniya: sb. st.* [Sviridov readings. Digest of articles]. Minsk, Belarusian State University, 2011, pp. 147–156 (in Russian).
8. Korolev M. I., Rogachev M. K. The selection of chemical composition for oil displacement from the water-flooded borehole. *Inzhener-neftyanik = Oil-engineer*, 2017, no 2. pp. 48–53 (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

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

Information about the authors

Olga N. Opanasenko – D. Sc. (Chemistry), Associate Professor, 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

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

Olga V. Luksha – 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: olga.l-75@mail.ru