

МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 620.197:661.185.232

АГРЕГАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ, АНТИКОРРОЗИОННОЕ ДЕЙСТВИЕ
И ПРОТИВОМИКРОБНАЯ АКТИВНОСТЬ БРОМИДОВ
АЛКИЛМЕТИЛМОРФОЛИНИЯ

© 2014 г. А. Б. Миргородская¹, С. С. Лукашенко¹, Е. И. Яцкевич¹, Н. В. Кулик¹,
А. Д. Волошина¹, Д. Б. Кудрявцев², А. Р. Пантелеева², В. В. Зобов^{1,3},
Л. Я. Захарова¹, А. И. Коновалов¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт органической и физической химии им. А.Е. Арбузова Казанского научного центра РАН,
420088 г. Казань, ул. Арбузова 8

²Открытое акционерное общество НАПОР, 420045, г. Казань, ул. Ершова 29

³Казанский (приволжский) федеральный университет, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская 18
e-mail: mirgorod@iopc.ru, mirgoralla@mail.ru

Поступила в редакцию 16.07.2013 г.

Синтезированы и охарактеризованы четвертичные аммонийные соединения, содержащие морфолиновый фрагмент в головной группе, обладающие мицеллообразующей способностью. Исследуемые соединения проявляют полифункциональные свойства: эффективно ингибируют сероводородную и смешанную (H₂S и CO₂) коррозию стали, характеризуются высоким бактерицидным действием в отношении сульфатвосстанавливающих бактерий, обладают выраженным бактериостатическим и фунгистатическим эффектом.

DOI: 10.7868/S0044185614040111

ВВЕДЕНИЕ

Метод поддержания пластового давления, широко применяемый в процессах добычи нефти, предполагает использование высокоминерализованных пластовых вод, которые содержат в своем составе большое количество хлорид-ионов, кислорода, углекислого газа и сероводорода. Наличие этих составляющих является причиной возникновения и развития локальных электрохимических процессов [1–3], являющихся наиболее опасным видом коррозионного воздействия и разрушения металла. По степени воздействия на коррозионный процесс и по разнообразию форм проявления наиболее сильным из известных стимуляторов коррозии считается сероводород [4–7], приводящий к охрупчиванию и растрескиванию металла. Кроме того, негативный вклад в процесс разрушения оборудования вносит биохимическая коррозия, которая также вызывает его значительную порчу. Наиболее интенсивно коррозия металлов протекает в анаэробных условиях при наличии в среде сульфатвосстанавливающих бактерий (СВВ). Эти бактерии способны осуществлять восстановление сульфатов до сероводорода. Наличие биогенного сероводорода резко увеличивает коррозионную агрессивность среды, особенно скорость локальной коррозии. Это связано с тем, что выделение сероводорода происходит вокруг

бактериальных колоний. В результате поверхность металла непосредственно под такими колониями находится под действием более концентрированного сероводорода и других “агрессивных” метаболитов СВВ, чем поверхность металла свободная от бактерий, что усугубляет процесс формирования раковины коррозии. Процессы разрушения металлоконструкций могут быть усилены и другими группами микроорганизмов и продуктами их метаболизма. Так, например, известно, что *Bacillus cereus* ACE4 и *Serratia marcescens* вызывали разрушение высокоуглеродистых сталей [8], а продукты обмена веществ *Aspergillus niger* ускоряли коррозию алюминия, меди, железа [9].

Проблема защиты металлоконструкций от коррозии является одной из важнейших при обеспечении надежной работы и сохранности нефтепромыслового оборудования, систем транспорта и хранения нефти. К наиболее эффективным способам борьбы с коррозией относится ингибиторная защита. Отличительной чертой этого метода является возможность при небольших капитальных затратах значительно тормозить процесс коррозионного разрушения и изменения механических свойств металлов и сплавов, тем самым замедлять разрушение оборудования.

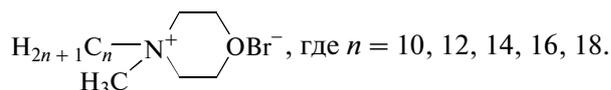
Учитывая многообразие факторов, вызывающих коррозию, в том числе негативные биохими-

Таблица 1. Характеристики синтезированных образцов МПАВ-*n*

<i>n</i>	Брутто-формула	<i>T</i> _{пл.} , °С	С, %		Н, %		N, %		Br, %	
			найд.	выч.	найд.	выч.	найд.	выч.	найд.	выч.
10	C ₁₅ H ₃₂ ONBr	186–187	55.95	55.89	10.32	10.00	4.43	4.34	24.72	24.79
12	C ₁₇ H ₃₆ ONBr	208–209	58.21	58.28	10.47	10.36	3.65	3.99	22.76	22.80
14	C ₁₉ H ₄₀ ONBr	215–216	60.21	60.30	10.57	10.65	3.65	3.70	21.15	21.11
16	C ₂₁ H ₄₄ ONBr	217–218	62.17	62.05	10.66	10.91	3.43	3.45	19.41	19.65
18	C ₂₃ H ₄₈ ONBr	219–220	63.63	63.57	11.24	11.13	3.19	3.22	18.36	18.39

ческие процессы, при разработке и применении ингибиторов преимущество отдается реагентам, сочетающим в себе свойства ингибитора коррозии и бактерицида. Таким комплексным действием характеризуются некоторые четвертичные аммониевые соединения, обладающие поверхностно-активными свойствами [2–4, 10–14]. Защитное действие реагентов этого класса объясняют их адсорбцией на поверхности оборудования, причем ингибирующий эффект как правило усиливается, если ингибитор находится в растворе в мицеллярном состоянии [15]. На основании данных электронной микроскопии сделано предположение, что сначала на поверхности металла с участием мицеллообразующих ингибиторов образуется сплошная молекулярная пленка, а затем мицеллярный слой [7]. Способность ПАВ к образованию адсорбционных слоев на твердой подложке проявляется на любой поверхности независимо от ее состояния. Поэтому ингибирующий эффект этих мицеллообразующих реагентов не должен существенно меняться при изменении поверхности металла, например, при наличии на ней продуктов коррозии [15].

Несмотря на имеющийся в настоящее время широкий ассортимент ингибиторов коррозии, идет постоянный поиск новых, более эффективных веществ на основе отечественного сырья, способных выступать в роли реагентов универсального действия. С целью создания новых ингибиторов коррозии-бактерицидов, проявляющих активность в сероводородсодержащих средах, нами был синтезирован ряд катионных амфифильных соединений с морфолиниевым фрагментом в головной группе (МПАВ-*n*):



Исследовано их агрегационное поведение в водных растворах, оценено защитное и антимикробное действие.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

МПАВ-*n* были получены при взаимодействии метилморфолина с алкилбромидами в среде этанола с последующей перекристаллизацией реакционной смеси. Реакция при температуре 78–80°С протекает за 2.5–3 часа с конверсией аминов 90–95% по данным потенциометрического титрования. Структура соединений подтверждена элементным анализом (табл. 1), ИК и ЯМР ¹H спектроскопией.

Поверхностные свойства ПАВ изучали методом отрыва кольца Du Noüy на тензиометре фирмы “Kruss” при 25°С. Электрокинетический потенциал определяли методом электрофоретического рассеяния света с помощью спектрометра Malvern Instruments’ Zetasizer Nano (He-Ne лазер, 633 нм). Исследуемые растворы перед измерениями фильтровали с помощью фильтров Millipore с диаметром пор 0.4 мкм.

Оценку защитных антикоррозионных свойств МПАВ проводили гравиметрическим и электрохимическим методами с использованием в качестве агрессивной среды модели пластовой воды с плотностью 1.12 г/дм³. Защитный эффект определяли на образцах углеродистой стали Ст. 3 в ингибированной (с добавлением реагента) и неингибированной (контроль) средах по ГОСТ 9.506-87.

Исследование гравиметрическим методом проводили в циркуляционных ячейках. Концентрация сероводорода в агрессивной среде составляла 100 мг/л. Продолжительность испытаний 6 часов. Степень защиты ингибиторами (*Z*, %) рассчитывали по уравнению (1):

$$Z = 100\% [j_{\text{cor}}(0) - j_{\text{ing}}(t)] / j_{\text{cor}}(0), \quad (1)$$

где $j_{\text{cor}}(0)$ – скорость коррозии в растворе без ингибитора, а $j_{\text{ing}}(t)$ – скорость коррозии через время *t* после его ввода. За результат измерений принимали среднее арифметическое двух параллельных определений.

При исследовании действия образцов электрохимическим способом использовали метод измерения линейного поляризационного сопротивления. Испытания ингибирующего действия проводили в модели пластовой воды при концен-

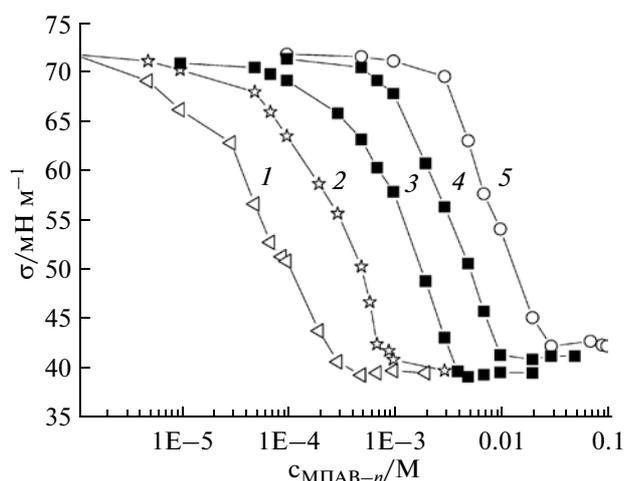


Рис.1. Изотермы поверхностного натяжения МПАВ- n (25°C) $n = 18$ (1), 16 (2), 14 (3), 12 (4), 10 (5).

трации сероводорода 50 мг/л и растворенной углекислоты 1000 мг/л. Замеры скорости коррозии проводили в течение 5–6 часов до получения установившегося значения. Степень защиты вычисляли по формуле (1) и оценивали ее на основании как минимум двух параллельных определений.

При исследовании противомикробной активности в качестве тест-объектов были использованы следующие микроорганизмы: *Staphylococcus aureus* ATCC 209p, *Escherichia coli* CDC F-50, *Bacillus cereus* ATCC 8035, *Trichophyton mentagrophytes* var. *gypseum* 1773, *Candida albicans* ВКПГу-401/NCTC 885-653.

Бактериостатические свойства изучены методом серийных разведений по методике [16]. Бактериальная нагрузка в опыте составляла 300000 микробных клеток в 1 мл (кл/мл). Фунгистатическая активность соединений изучена методом серийных разведений на жидкой среде Сабуро по методике [17]. Бактерицидную активность реагентов в отношении СВБ определяли по стандартной методике [18] в питательной среде Постгейта на накопительной культуре с содержанием бактерий 10^6 кл/мл. Индекс активности культуры – 100 единиц.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Методом тензиометрии показано, что соединения серии МПАВ- n обладают выраженной поверхностной активностью. Так, например, гексадецилметилморфолиний бромид (МПАВ-16) в концентрации 0.04% способен снижать поверхностное натяжение на границе раздела вода/воздух до 38 дин/см. Это свойство должно облегчать адсорбцию ингибитора на поверхность защищаемого изделия, что, как правило, приводит к образованию пленки, предотвращающей процессы коррозии [1, 7]. Изотермы поверхностного натяжения исследованных соединений, представленные на рис. 1, имеют изломы в узкой области концентрации. Точка пересечения линейных участков изотермы отвечает критической концентрации мицеллообразования (ККМ). Этот параметр является важнейшей характеристикой амфифильных соединений, позволяющий сравнивать агрегационное поведение в растворах различных классов веществ. Так, близким по своей структуре к исследуемым морфолиниевым соединениям является гомологический ряд амфифилов с триметиламмониевой головной группой. Значения ККМ (табл. 2) для этих двух рядов ПАВ не сильно отличаются. Вероятно, присутствие в структуре ПАВ циклического фрагмента, содержащего кислород, не вносит специфики в электростатические взаимодействия с диполями воды по сравнению с триметиламмониевыми аналогами. Отметим, что в наших ранних исследованиях было показано, что присутствие в головной группе катионных ПАВ гидроксиэтильного радикала, способного принимать участие в образовании водородных связей, облегчает процессы мицеллообразования в водных растворах и приводит к уменьшению ККМ. Однако, гораздо в большей степени, чем структура головной группы, на значение ККМ рассматриваемых ПАВ влияет гидрофобность алкильного радикала, определяемая его длиной (табл. 2).

Синтезированные МПАВ- n были испытаны в качестве ингибиторов сероводородной коррозии. Прогнозировать антикоррозионный эффект этих соединений позволял известный факт, что сероводород, взаимодействуя с металлом, образует отри-

Таблица 2. Значения ККМ катионных ПАВ, определенные тензиометрическим методом, 25°C

n	ККМ, мМ		
	МПАВ- n	$(\text{C}_n\text{H}_{2n+1})(\text{CH}_3)_3\text{N}^+\text{Br}^-$	$(\text{C}_n\text{H}_{2n+1})(\text{CH}_3)_2\text{N}^+(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH})\text{Br}^-$
10	30	61	
12	9.6	14.5 [19]	7.1 [19]
14	4.0	3.6 [19]	4.9 [19]
16	1.0	0.92 [19]	0.70 [19]
18	0.33	0.32 [18]	0.12 [19]

цательно заряженные поверхностные слои, благоприятствующие адсорбции молекул ПАВ катионного типа. На примере МПАВ-16 методом электрофотетического рассеяния света нами оценен электрокинетический потенциал (дзета-потенциал) частиц в растворе (рис. 2), который предопределяет их сродство к отрицательно заряженной поверхности металла. Высокое значение этого параметра (85 мВ) позволяет ожидать, что МПАВ будут эффективно адсорбироваться на поверхности металла, гидрофобизировать ее и обеспечивать защитное действие.

Предварительно было показано, что в модели пластовой воды с добавками H₂S и CO₂ в отсутствие МПАВ-п в течение 5–6 часов поверхность углеродистой стали покрывается черно-серым налетом, наблюдается неравномерная коррозия. Образование адсорбционного слоя ПАВ в этих условиях тормозит развитие коррозионных процессов. Результаты испытаний приведены в табл. 3.

Анализ полученных данных позволяет выявить, что как при сероводородной коррозии, так и при коррозии в смешанной среде (H₂S и CO₂), МПАВ-п обладают выраженным защитным действием, которое достигает наибольшей величины при *n* = 14 и при дальнейшем росте длины гидрофобного радикала не увеличивается. Защитный эффект для МПАВ-14 при концентрации 25 мг/л составляет 96% для сероводородной коррозии и 92% – для коррозии в смешанной среде. При этом нужно отметить, что необходимая эффективность ингибиторной защиты (более 90%) для образцов МПАВ-14 и МПАВ-16 достигается уже при их содержании в растворе 10 мг/л. Эта концентрация существенно ниже ККМ этих соединений в воде. Однако, нельзя исключить, что процесс адсорбции катионного ПАВ на металле приводит к возникновению градиента распределения реагента в системе, что может создать условия для его агрегирования в приповерхностном слое [22].

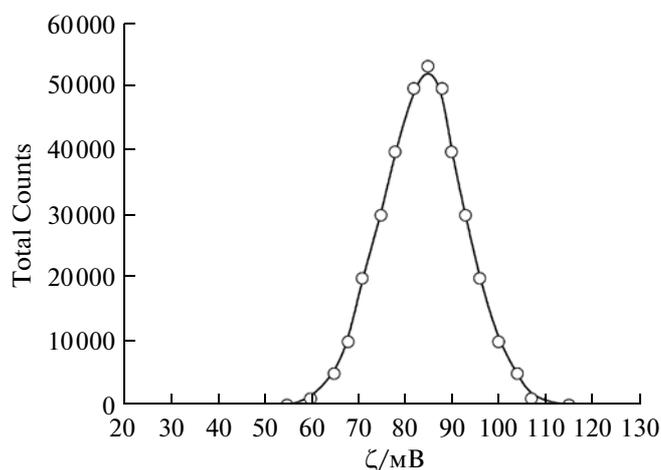


Рис. 2. Электрокинетический потенциал МПАВ-16 в водном растворе (0.001 М, 25°С).

Как правило, при решении вопроса защиты от сероводородной коррозии, возникает проблема борьбы с СВБ. Эти бактерии, адаптируясь в нефтяном пласте, вызывают интенсивные процессы образования сероводорода, тем самым, усиливая коррозию нефтяного оборудования, ухудшая товарное качество добываемых нефти и газа, создавая дополнительные трудности при очистке и переработке этих продуктов. Кроме того, микроорганизмы адсорбируются на поверхности каналов пласта-коллектора и образуют колонии бактерий. Продукты их метаболизма (слизь, биопленка, микробные тела, нерастворимые осадки) приводят к сужению каналов породы и снижают проницаемость коллектора, что резко уменьшает объем добычи нефти. Исследование бактерицидных свойств МПАВ-п показало, что все испытанные соединения эффективно подавляют рост числа СВБ в питательной среде Постгейта, т.е. в наиболее комфортных условиях для их развития и жизнедеятельности. Действие в отношении СВБ про-

Таблица 3. Защитный антикоррозионный эффект (Z%) МПАВ-п и их бактерицидное действие относительно сульфатвосстанавливающих бактерий

<i>n</i>	Защитный эффект, % Сероводородная коррозия (H ₂ S – 100 мг/л), Гравиметрия			Защитный эффект, % Коррозия в смешанной среде (H ₂ S – 50 мг/л, CO ₂ – до 1000 мг/л), Электрохимия			100% подавления СВБ при концентрации МПАВ-п, мг/л
	концентрация МПАВ-п, мг/л			концентрация МПАВ-п, мг/л			
	5	10	25	5	10	25	
10	–	88	90	–	86	88	Более 50
12	85	90	93	85	89	91	50
14	85–88	92	96	86	91	92	25
16	87	91	95	86	91	92	7.5
18	–	91–92	93	–	–	–	Более 50

Таблица 4. Бактериостатическая и фунгистатическая активность катионных ПАВ

Образец	Минимальная ингибирующая концентрация, мкг/мл				
	<i>St. aureus</i> 209p +	<i>E. coli</i> F50 –	<i>B. cereus</i> 8035	<i>Tr. gipseum</i>	<i>Candida albicans</i>
МПАВ-10	>500	>500	>500	>500	>500
МПАВ-12	62.5	>500	>500	>500	125
МПАВ-14	7.8	>500	250	500	62.5
МПАВ-16	1.5	250	1.5	15.6	1.5
МПАВ-18	0.19	250	0.39	7.8	1.5
ЦТАБ	0.5	6.3	3.1	31.3	3.1

является в концентрационном диапазоне реагентов от 0.02 мМ/л до 0.05 мМ/л. Наиболее выраженным эффектом обладает МПАВ-16, который способен подавлять биоценоз СВБ уже при концентрации 7.5 мг/л. Следует отметить, что широко используемые в нефтяной отрасли ингибиторы-бактерициды предусматривают для подавления СВБ существенно более высокую дозировку реагента. Например, для СНПХ-1004 рекомендуемая концентрация составляет 50–100 мг/л, для НАПОР-1007 – 100–150 мг/л, для Касатол 28-5 – 150–200 мг/л [23–25]. Сравнивая свойства МПАВ-*n* с результатами, полученными нами ранее для ПАВ, содержащих гидроксильный фрагмент в головной группе [19], следует отметить сопоставимый антикоррозионный эффект этих ПАВ и более высокое действие морфолиниевых соединений в отношении СВБ.

Таким образом, обобщая результаты, приведенные в табл. 3 можно сделать вывод, что практическое применение могут найти продукты на основе образцов МПАВ-14 и МПАВ-16. Первый предпочтителен в случае, когда нужен надежный ингибитор коррозии и микробиологический фактор имеет не столь существенное значение, второй, если необходим реагент с ярко выраженным бактерицидным действием.

Высокая антимикробная активность в ряду МПАВ-*n* наблюдается и в отношении других штаммов микроорганизмов (табл. 4). Анализ данных по бактериостатической и фунгистатической активности исследуемых соединений, приведенных в табл. 4, свидетельствует о существенном влиянии длины алкильного радикала на их антимикробные свойства.

Как следует из результатов, представленных в табл. 4, синтезированный ряд морфолиниевых производных проявляет одновременно и антибактериальную, и противогрибковую активность. При этом степень противомикробной активности существенно зависит от длины углеводородного радикала молекулы МПАВ-*n* и достигает максимального значения при $n = 18$. Такая зависимость согласуется с известными, сформированными на

сегодняшний день, представлениями о механизме антимикробного действия катионных ПАВ, заключающегося в дестабилизирующем и в конечном итоге разрушающем воздействии их на клеточные мембраны, что вызывает серьезные системные повреждения, несовместимые с жизнедеятельностью микробной клетки [26–28]. Сравнение антимикробных свойств МПАВ-16 и его нефункционализированного аналога ЦТАБ позволяет говорить о том, что введение циклического фрагмента в молекулу может приводить к различным результатам в зависимости от вида микроорганизма: в отношении *E. coli* действующая концентрация ЦТАБ в 50 раз ниже, чем для МПАВ-16, тогда как в отношении прочих использованных в экспериментах бактерий и грибов МПАВ-16 оказывается вдвое эффективнее.

Бактериостатическое и фунгистатическое действие более ярко выражено в отношении штаммов бактерий *St. aureus*, *B. cereus* и против дрожжеподобного гриба *Candida albicans*. Следует отметить, что в отношении этих видов микробов соединения МПАВ-16 и МПАВ-18 при концентрации 5 мкг/мл проявляют также бактерицидное и фунгицидное действие. Сравнение в параллельных опытах активности этих соединений с активностью применяемых на практике антибактериального препарата Ципрофлоксацина (действующая концентрация 0.39 мкг/мл) и противогрибкового препарата Клотримазола (действующая концентрация 3.13 мкг/мл), показывает, что эффект МПАВ несколько ниже, чем у эталонных образцов. Однако, несомненным достоинством морфолиниевых производных является возможность проявления одновременно как бактерицидных, так и фунгицидных свойств, что не свойственно препаратам сравнения.

Таким образом, синтезированные морфолиниевые ПАВ способны обеспечивать высокую степень защиты против сероводородной и смешанной (H_2S и CO_2) коррозии стали при малой дозировке реагента в агрессивную среду. Особенно следует выделить соединения МПАВ-14 и МПАВ-16, которые обладают защитным эффек-

том при концентрации 10 мкг/мл, характеризуются широким спектром антимикробного действия в отношении ряда грибов и бактерий, в том числе сульфатовосстанавливающих бактерий.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 12-03-97066-р_поволжье_а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розенфельд И.Л. Ингибиторы коррозии. М.: Химия, 1977. 350 с.
2. Медведева М.Л. Коррозия и защита оборудования при переработке нефти и газа. М.: Нефть и газ, 2005. 312 с.
3. Козлов В.А., Месник М.О. Основы коррозии и защиты металлов. Иваново: Иван. гос. химико-технол. ун-т, 2011. 177 с.
4. Каменщиков Ф.А., Черных Н.Л. Борьба с сульфатовосстанавливающими бактериями на нефтяных месторождениях. Москва–Ижевск: Институт компьютерных исследований, НИЦ Регулярная и хаотическая динамика, 2007. 412 с.
5. Гафаров Н.А., Гончаров А.А., Кушнарченко В.М. Коррозия и защита оборудования серосодержащих нефтегазовых месторождений. М.: Наука, 1998. 437 с.
6. Литвиненко С.И. Защита нефтепродуктов от воздействия микроорганизмов. М.: Химия, 1977. 144 с.
7. Гуфуров Р.Р., Тимофеева И.В., Кудрявцева Л.А. и др. // Практика противокоррозионной защиты. 2002. Т. 26. № 4. С. 22.
8. Rajasekar A., Balasubramania R., Kuma J.V.M. // Ind. Eng. Chem. Res. 2011. V. 50. № 17. P. 10041.
9. Ломакин С.М., Заикова Г.Е. Горение, деструкция и стабилизация полимеров / Под ред. Заиковой Г.Е. С.-Пб.: Научные основы и технологии, 2008. 422 с.
10. Рахманкулов Д.Л., Злотский С.С., Мархасин В.И. и др. Химические реагенты в добыче и в транспорте нефти: справочник. М.: Химия, 1987. 144 с.
11. Кузнецов Ю.И., Фролова Л.В., Томина Е.В. // Защита металлов. 2006. Т. 42. № 3. С. 233.
12. Нафикова Е.В., Левашова В.И., Дехтярь Т.Ф. // Нефтехимия. 2011. Т. 51. № 5. С. 397.
13. Угрюмов О.В., Варнавская О.А., Хлебников В.Н. и др. // Защита металлов. 2007. Т. 43. № 1. С. 94.
14. Левашова В.И., Никонорова Н.И. // Нефтехимия. 2009. Т. 49. № 3. С. 268.
15. Семихина Л.П., Перекупка А.Г., Семихин Д.В. // Нефтяное хозяйство. 2003. № 1. С. 61.
16. Ведьмина Е.А., Фурер Н.М. Руководство по микробиологии, клинике и эпидемиологии инфекционных болезней. М.: Медицина, 1964. Т. 1. 670 с.
17. Милованова С.Е. Методы экспериментальной химиотерапии. М.: Медицина, 1971. 100 с.
18. Мурзагильдин З.Г., Низамов К.Р., Калимуллин А.А. и др. РД 03-00147275-067-20021. Оценка заряженности нефтепромысловых сред и бактерицидного действия реагентов относительно сульфатовосстанавливающих бактерий. Лабораторные, стендовые и опытно-промышленные испытания. Уфа: БашНИПИнефть, 2001.
19. Кудрявцев Д.Б., Пантелеева А.Р., Юрина А.В. и др. // Нефтехимия. 2011. Т. 51. № 4. С. 303.
20. Zakharova L., Mirgorodskaya A., Yackevich E. et al. // J. Chem. Eng. Data. 2012. V. 57. № 11. P. 3153.
21. Вигдорович В.И., Закурнаев С.А. // Коррозия: материалы, защита. 2010. № 2. С. 17.
22. Холмберг К., Йенссон Б., Кронберг Б., Линдман Б. Поверхностно-активные вещества и полимеры в водных растворах. М.: Бином, 2007. 528 с.
23. Миловзоров Г.В., Маклецов В.Г., Трефилова Т.В. // Вестник Удмуртского ун-та. 2012. № 3. С. 44.
24. Чирков Н.А., Гладких М.А., Егорова В.Л. // Нефтяное хозяйство. 2010. № 5. С. 112.
25. Галимов Р.М. // Нефтепромысловое дело. 2007. № 5. С. 58.
26. Palermo E.F., Lee D.-K., Ramamoorthy A., Kuroda K. // J. Phys. Chem. B. 2011. V. 115. P. 366.
27. Dymond M.K., Attard G.S. // Langmuir. 2008. V. 24. P. 11743.
28. Ding L., Chi E.Y., Chemburu S. et al. // Langmuir. 2009. V. 25. № 24. P. 13742.