

ПРОБЛЕМЫ, ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ И АКТУАЛЬНЫЕ  
ЗАДАЧИ ФИЗИЧЕСКОЙ ХИМИИ

УДК 620.197.3 + 544.653

ОРГАНИЧЕСКИЕ ИНГИБИТОРЫ КОРРОЗИИ МЕТАЛЛОВ В РАСТВОРАХ  
КИСЛОТ. II. ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЗАЩИТНОГО ДЕЙСТВИЯ.  
ОСНОВНЫЕ ГРУППЫ СОЕДИНЕНИЙ

© 2023 г. Я. Г. Авдеев<sup>а,\*</sup>, Ю. И. Кузнецов<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Москва, 119071, Россия

\*e-mail: avdeevavdeev@mail.ru

Поступила в редакцию 15.07.2022 г.

После доработки 21.07.2022 г.

Принята к публикации 25.07.2022 г.

Рассмотрены современные подходы к созданию смесевых ингибиторов коррозии металлов в растворах кислот и возможные пути их воздействия на процесс коррозии. Проанализированы количественные подходы к оценке взаимовлияния компонентов смесевых ингибиторов, обсуждены критерии синергизма их действия. Отмечена высокая эффективность трехкомпонентных смесевых ингибиторов на основе производных триазолов при защите различных сталей в высокотемпературных растворах кислот ( $t = 100\text{--}180^\circ\text{C}$ ) и растворах смесей кислот, содержащих соли Fe(III). Рассмотрены практически значимые преимущества и недостатки различных групп ингибиторов коррозии металлов в кислых средах. Обобщены сведения по защите металлов в кислых средах так называемыми “зелеными” ингибиторами, рассмотрены перспективы и противоречия, связанные с их практическим применением. Отмечена необходимость поиска технологий применения ингибированных растворов кислот, соответствующих экологическим требованиям современного производства, учитывающих также высокую опасность растворов самих кислот.

**Ключевые слова:** кислотная коррозия, металл, сталь, растворы кислот, ингибиторы коррозии, механизм действия ингибиторов коррозии, смесевые и “зеленые” ингибиторы коррозии

**DOI:** 10.31857/S0044453723040052, **EDN:** TEANXP

## ВВЕДЕНИЕ

В первой части нашего обзора [1] рассмотрены теоретические аспекты защиты металлов от разрушения в растворах кислот органическими соединениями, включающие обзор представлений о механизме коррозии металлов, анализ экспериментальных и теоретических методов изучения этого процесса и путей воздействия на него ингибиторов коррозии (ИК), а также современные взгляды на механизм их действия. Практика промышленного применения ИК показывает технологическую и экономическую перспективность их использования в форме смесей, а не индивидуальных веществ. В связи с этим, важно проанализировать подходы к созданию смесевых ИК металлов в кислых средах и современные представления о путях их воздействия на коррозию. Кроме этого, целесообразно выделить и проанализировать группы органических соединений, рассматриваемые в научной литературе в качестве ИК металлов в растворах кислот. Отдельного обсуждения требует вопрос перспектив применения экологичных или, как их называют, “зеленых”

ИК, являющихся трендом в исследованиях последнего десятилетия.

## I. СМЕСЕВЫЕ ИНГИБИТОРЫ КОРРОЗИИ НА ОСНОВЕ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Улучшить защиту металлов в растворах кислот можно, проводя синтез новых органических соединений, потенциально обладающих более высокой ингибиторной эффективностью. К сожалению, этот путь мало реален, поскольку цена таких соединений увеличивается не сопоставимо с приростом защитного эффекта. Единственно приемлемое решение этой задачи видится нам в создании на базе доступных органических соединений смесевых ИК, защитное действие которых выше. Этот прием успешно применяется при создании промышленных кислотных ИК [2–4].

Для количественной оценки влияния компонентов смесевых ИК сопоставляют произведение коэффициентов торможения коррозии индивидуальными компонентами смеси ( $P_{\gamma_i}$ ) с аналогичной величиной, измеренной в присутствии

соответствующей смеси ( $\gamma_{\text{mix}}$ ). В случае, если коэффициент взаимовлияния  $m$  компонентов

$$K_m = \gamma_{\text{mix}}(\prod \gamma_i)^{-1} \quad (\text{I.1})$$

больше 1, то говорят об усилении защитного действия компонентов, если меньше 1 – об ослаблении [5]. Величины  $\gamma$  далеко не всегда применяются, как характеристики эффективности ИК. Часто вместо них используют степени защиты ( $Z$ ), выраженные в абсолютных величинах или процентах. В таком случае используют синергетический параметр, который для двухкомпонентной смеси имеет вид [6]:

$$S = (1 - Z_{1+2})(1 - Z_{\text{mix}})^{-1}, \quad (\text{I.2})$$

где  $Z_{1+2} = Z_1 + Z_2 - Z_1 Z_2$ ,  $Z_1$  и  $Z_2$  – степени защиты металла индивидуальными компонентами смеси,  $Z_{\text{mix}}$  – степени защиты металла бинарной смесью. В случае, если  $S > 1$ , делают заключение о синергизме действия компонентов смеси. Теоретические основы использования уравнения (I.2) и обоснование его вывода приводятся в работах [7–9].

Аналогичный критерий предложен в работе [10] для анализа концентрационных зависимостей  $\gamma$  индивидуальных и смесевых ИК. Так, при  $n$  последовательно вводимых одинаковых добавках индивидуального ИК  $\Delta C_i$  (при его исходном содержании, равном нулю) суммарный коэффициент влияния концентрации имеет вид:

$$K_C = \gamma_{\Sigma C}(\gamma_{\Delta C_i})^{-n}, \quad (\text{I.3})$$

где нижние индексы показывают, что измеренные величины отражают действие суммарной добавки ИК ( $\Sigma C$ ) либо только ее некоторой дозы ( $\Delta C_i$ ). При часто встречающейся для адсорбционных ИК степенной зависимости:

$$\gamma = \gamma_0 C^\beta, \quad (\text{I.4})$$

где  $\gamma_0$  и  $\beta$  – константы, уравнение (I.3) примет вид

$$K_{\Sigma C} = \gamma_0^{1-n} n^\beta (\Delta C_i)^{\beta(1-n)}. \quad (\text{I.5})$$

Для  $m$  ИК в смеси при переменной концентрации ( $C_i$ ) одного из ингибиторов, обозначив  $\gamma_{\Delta C_i}$  для смесевого ингибитора  $\gamma_{\Delta C_\Sigma}$ , можно записать

$$K_m = K_{\Sigma C}(\gamma_{\Delta C_\Sigma})^n (\prod \gamma_i)^{-1}. \quad (\text{I.6})$$

Общим подходом к увеличению защитного действия органических соединений при защите металлов в кислых средах служит создание на их основе бинарных смесей с галогенид-анионами ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Br}^-$  и  $\text{I}^-$ ) [4] или катионами металлов [6]. Однако наиболее перспективны бинарные смеси органических соединений с серосодержащими соединениями, как органической (производные тиомочевина, каптакс, диэтилдитиокарбамат натрия), так и неорганической (роданид калия, тио-

мочевина) природы. Бинарные смеси неопредельных органических соединений [11, 12] и производных N-содержащих гетероциклов [13–16] с серосодержащими соединениями эффективны в защите сталей в растворах  $\text{H}_2\text{SO}_4$  и  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , где добавки индивидуальных органических соединений не обеспечивают требуемой защиты.

Вопрос о природе усиления защитного действия органических ИК добавками различной природы сложен и, чаще всего, оставляется исследователями без внимания при изучении смесевых ИК. Выполненное нами исследование влияния композиции производного 1,2,4-триазола – ИФХАН-92 + KNCS (мольное отношение компонентов 9 : 1) на коррозию низкоуглеродистой стали в растворе  $\text{H}_3\text{PO}_4$  показало, что присутствие в коррозионной среде добавки KNCS ускоряет адсорбцию на металле органического соединения [17]. Такой эффект крайне важен для формирования защитного слоя ИК на поверхности стали, быстро деградирующей в агрессивной среде. Кроме этого, роданид анионы, наряду с молекулами замещенного триазола и катионами Fe(II), образующимися при коррозии металла, формируют на поверхности стали защитный слой, состоящий из полимерного комплекса [18]. Он имеет толщину в несколько условных мономолекулярных слоев ингибитора и проявляет эффект защитного последования. Защитный слой, формируемый композицией ИФХАН-92 + KNCS на низкоуглеродистых сталях в растворах  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , обладает во многом уникальными свойствами. Он обеспечивает существенное замедление коррозии стали в растворах  $\text{H}_3\text{PO}_4$  с температурой  $t$  до  $100^\circ\text{C}$  включительно, что позволяет рассматривать этот композиционный ИК как высокотемпературный [13]. Важная особенность такой бинарной смеси – способность в растворах  $\text{H}_3\text{PO}_4$  на сталях, наряду с восстановлением  $\text{H}^+$ , существенно тормозить восстановление солей Fe(III) [19]. Результат этого – эффективная защита сталей в растворах  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , содержащих FePO<sub>4</sub>. Наблюдаемый эффект – следствие связывания катионов Fe(III) в фосфатные комплексы, окислительная способность которых и подвижность, характеризующая коэффициентом диффузии, ниже, чем в соляно- и сернокислых средах. Этого оказывается достаточно для того, чтобы композиционный ИК в указанной среде был устойчив к накоплению солей Fe(III). Аналогичная картина наблюдается в смесях  $\text{H}_2\text{SO}_4$  и  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , что открывает возможности создания важных для современной промышленности относительно дешевых ингибированных кислотных растворов, устойчивых к накоплению солей Fe(III) [19].

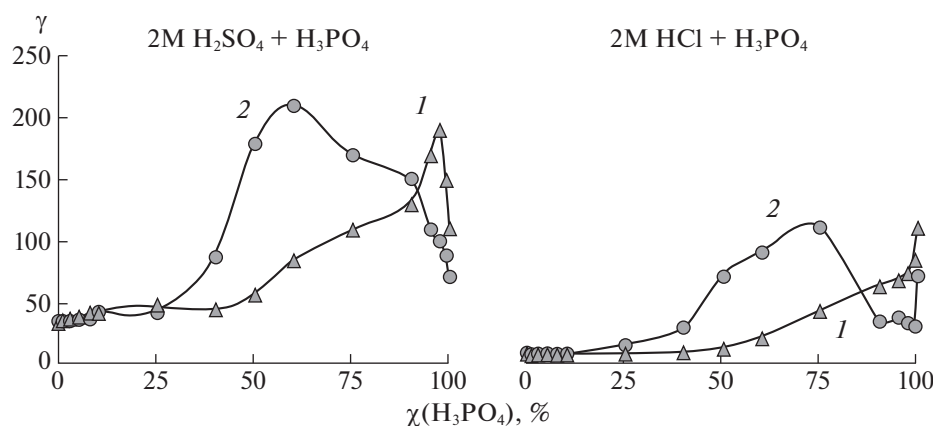
Интересной добавкой, улучшающей защитное действие производных триазолов при коррозии сталей в растворах кислот, является уротропин. Сам уротропин – низкоэффективный ИК. Хорошей защиты сталей в его присутствии можно добиться только в сильно разбавленных растворах кислот при высоком его содержании в растворе (более 100 мМ) [20]. Уротропин широко применяется и применяется в качестве сырья для производства путем химической модификации промышленных ИК серии ПКУ и ПБ-5 [21, 22]. Добавка уротропина к ИК ИФХАН-92 позволяет существенно улучшить его защитное действие при коррозии хромоникелевой стали 12Х18Н10Т в растворе HCl (табл. 1). При этом защитное действие смеси 1 мМ ИФХАН-92 + 4 мМ уротропина выше индивидуальных добавок 5 мМ ИФХАН-92 или 5 мМ уротропина. Наблюдаемый эффект определяется тем, что уротропин наряду с ИФХАН-92 входит в состав хемосорбированного слоя органического ИК, образующегося на поверхности стали. Его количество в хемосорбированном слое, согласно данным РФЭС, находится в пределах 20–30%. Интересно, что толщина защитного слоя, формирующегося в присутствии смеси двух ИК, меньше, чем в случае индивидуального ИФХАН-92. Этот слой прочно связан с поверхностью металла и не удаляется с нее после УЗ-очистки. Высокие защитные свойства слоя при меньшей толщине свидетельствуют о его более плотной структуре. Вероятная причина прочного сцепления молекул ИФХАН-92 и уротропина в слое органического ИК – их химическая сшивка, которая инициируется продуктом гидролиза уротропина – формальдегидом [23].

Более важные результаты получены при защите низкоуглеродистой стали 20 и хромоникелевой стали 08Х18Н10Т в растворах HCl и H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> в усло-

**Таблица 1.** Толщина защитных слоев на образцах хромоникелевой стали 12Х18Н10Т после их выдержки в 2 М HCl с добавкой ингибитора (продолжительность опытов 2 ч,  $t = 25^\circ\text{C}$ )

Ингибитор	Степень защиты, %	Толщина слоя ингибитора, нм	Толщина гидроксидно-оксидного слоя, нм
5 мМ уротропина	67	$0.8 \pm 0.1$	$0.14 \pm 0.2$
5 мМ ИФХАН-92	77	$3.5 \pm 0.2$	$2.0 \pm 0.2$
1 мМ ИФХАН-92 + 4 мМ уротропина	86	$2.3 \pm 0.1$	$0.38 \pm 0.2$

виях высокотемпературной коррозии ( $t = 100\text{--}180^\circ\text{C}$ ). В этих условиях модификация двухкомпонентного ИК ИФХАН-92 + KI добавкой уротропина позволяет обеспечить эффективную защиту этих сплавов [24, 25]. Модификация уротропином двухкомпонентного ИК ИФХАН-92 + KNCS обеспечивает сильное подавление коррозии низкоуглеродистых сталей в растворах HCl + H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> и H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, содержащих соли Fe(III) (рис. 1). Это служит предпосылкой для создания промышленных ингибированных кислотных составов, обладающих низкой коррозионностью в отношении сталей и устойчивых к накоплению катионов Fe(III) [26]. В таких системах роль уротропина не ограничивается его включением в структуру защитного слоя, формирующуюся на поверхности стали. Кроме этого, наряду с фосфат-анионами уротропин участвует в связывании катионов Fe(III) в комплексные соединения, что существенно снижает их окислительную способность [19].



**Рис. 1.** Коэффициенты торможения коррозии стали 08 ПС в 2 М H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> и 2 М HCl + H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> с добавкой 0.05 М Fe(III), содержащие 4.5 мМ ИФХАН-92 + 0.5 мМ KNCS (1) и 4.5 мМ ИФХАН-92 + 0.5 мМ KNCS + 0.20 М уротропина (2), при различной мольной доле в них H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>. Продолжительность опытов 2 ч,  $t = 60^\circ\text{C}$ .

## II. ОСНОВНЫЕ ГРУППЫ ИНГИБИТОРОВ КОРРОЗИИ МЕТАЛЛОВ

Анализ современного состояния исследований в области ингибиторной защиты металлов в кислых средах невозможен без рассмотрения наиболее важных групп органических соединений, применяемых для этих целей. Наиболее полную и систематизированную информацию можно получить из обзорных исследований, в которых рассматриваемые вещества, используемые для замедления коррозии, объединяются на основании сходства их химической структуры или по какому-либо технологическому принципу (табл. 2).

Непредельные органические соединения широко исследованы в качестве ИК различных сталей в растворах HCl [27–29]. Интерес к этой группе соединений определяется тем, что на их основе можно создавать смесевые ИК для защиты стальных конструкций от воздействия растворов HCl в условиях высокотемпературной коррозии. Это очень важно для предотвращения коррозии промышленного оборудования на предприятиях нефтегазовой отрасли, где растворы HCl используют для стимулирования нефтеносных пластов с повышенной температурой, т.е. увеличения притока углеводородного сырья. К настоящему времени определены наиболее важные структуры непредельных соединений среди производных ацетилена, непредельных альдегидов, кетонов и азометинов, перспективные для эффективной защиты сталей. Рассмотрены подходы к созданию на их основе композиционных продуктов, способных защищать стали в HCl в условиях высокотемпературной коррозии. Выдающимся результатом следует считать защиту сталей при  $t > 200^\circ\text{C}$ . В основе механизма действия этих соединений в столь жестких условиях лежит способность их молекул после адсорбции на поверхности сталей вступать в химические превращения, образуя защитный слой полимера. Недостатки, ограничивающие применение этих соединений, – деструкция и полимеризация их молекул в агрессивной среде, снижающие содержание в ней ИК.

Широкое применение азометинов в качестве ИК металлов в кислых средах во многом определяется простотой их химического синтеза. Исследовано огромное число соединений этой группы, существенно различающихся особенностями их химической структуры [30, 31]. К числу недостатков этих веществ при использовании в кислых средах следует отнести склонность к гидролизу, приводящую к образованию альдегида и протонированного амина [32]. Таким же недостатком обладают и серосодержащие органические соединения [33], вероятность деструкции которых в кислой среде высока. Наиболее оправдано использование серосодержащих соединений не в

индивидуальной форме, а в составе композиционных ИК, что позволит существенно снизить содержание этих часто высокотоксичных соединений в коррозионной среде.

Перспективным направлением в защите металлов от коррозии являются исследования N-содержащих гетероциклических соединений, включающих как шестичленные [34–40], так и пятичленные [41–49] структуры. С нашей точки зрения, среди этих соединений наиболее перспективны производные азолов, в частности, триазолов [49], что обсуждалось выше. Необходимо отметить, что способность азолов к хемосорбции на поверхности металлов делает их универсальными ИК, которые способны существенно замедлять коррозию металлов не только в растворах минеральных кислот, но и в водных (углекислых [50, 51], нейтральных [52], щелочных [53]) и парофазных [54] средах. Среди ионных жидкостей [55–58], исследованных в качестве кислотных ИК металлов, важную роль играют производные имидазола.

Низкоэффективная группа ИК для кислых сред – аминокислоты [59, 60]. Даже в холодных растворах кислот их защитные эффекты, как правило, не высоки. Вызывает сомнение экологичность некоторых из соединений этой группы, поскольку наряду с встречающимися в природе соединениями, исследуются вещества, полученные синтетически и не характерные для природных объектов. Более интересны ИК на основе природных полимеров [61–63], но и они не всегда обеспечивают хорошую защиту металлов. Также в качестве кислотных ИК рассматриваются синтетические полимерные соединения [61–64].

Многие из органических соединений, являющихся фармацевтическими препаратами, изучены в качестве ИК и обеспечивают в кислых средах сильное замедление коррозии металлов [65–67]. Идея применения большинства из этих соединений на практике сомнительна в силу сложности их синтеза и высокой цены. В связи с этим предполагается использовать фармацевтические препараты с истекшим сроком годности, что рассматривается как способ их утилизации [68, 69]. Важный вывод об экологичности фармацевтических препаратов, как ИК, сделан Гисе [65]. Он отметил, что не все эти вещества легко разлагаются микроорганизмами, а продукты их трансформации могут быть в равной степени или даже более опасны для окружающей среды. Поэтому требуются дополнительные исследования, прежде чем фармацевтический препарат будет окончательно отнесен к экологичным ингибиторам.

За последние 30 лет в мировой литературе отмечается экспоненциальный рост числа публикаций, посвященных так называемым экологичным или “зеленым” ИК [70]. Это нашло отраже-

Таблица 2. Ассортимент ингибиторов кислотной коррозии металлов

№	Группы ингибиторов коррозии	Рассматриваемые соединения	Литература	
1	Непредельные органические соединения	Ацетиленовые соединения	[27, 28]	
		Непредельные альдегиды, кетоны и азометины	[28, 29]	
2	Азометины	Основания Шиффа	[30, 31]	
3	S-содержащие органические соединения	Производные тиомочевины и тиadiaзола	[33]	
4	N-содержащие гетероциклические органические соединения	Производные хиноксалина	[34]	
		Производные хинолина	[35]	
		N-гетероциклические соединения на основе пиридина	[36]	
		Производные пиримидина	[37]	
		Триазины	[38]	
		Хинолин, пиридин и производные пиридина, ИК на основе имидазола	[39]	
		N-содержащие шестичленные гетероциклические органические соединения	[40]	
		Ингибиторы коррозии на основе имидазола	[41]	
		Имидазолы, пиразолы, оксазолы, пиридины, триазины, тетразины, пиразины, пиридазины, пиримидины, триазолы, тетразолы, тиазолы, тиadiaзолы, макроциклические соединения	[42]	
		Имидазолы, азолы, пиридины, диазины, хинолины, хинолоны, хиноксалины, хиназолины, триазины, тетразины, макроциклические соединения	[43]	
		Производные 1,2,4-триазола	[44]	
		Имидазо[1,2-а]пиридины	[45]	
		Производные пиразола	[46]	
		Фталоцианин, нафталоцианин и их производные	[47]	
		N-содержащие гетероциклические органические соединения	[48]	
		N-содержащие пятичленные гетероциклические органические соединения	[49]	
5		Ионные жидкости	Нейтральные, кислотные, основные и функционализированные ионные жидкости	[55]
			Протонные, полимерные протонные, апротонные и полимерно-апротонные ионные жидкости	[56]
			Ионные жидкости	[57]
			Ионные жидкости на основе имидазолия, триазолия, тиазолия, индолия, пирролидиния, пиридиния, пиколиния, пиперидина, тиазиния, пиридазиния, аммония, аминокислот, фосфония, хитозана, акриламида и сульфония	[58]
6	Аминокислоты	Производные аминокислот	[59]	
		Производные глутаминовой кислоты	[60]	
7	Органические полимеры	Натуральные и синтетические полимеры	[61–63]	
		Поли(фенилендиамин)	[64]	
8	Фармацевтические препараты	Различные группы фармацевтических препаратов	[65–67]	
		Фармацевтические препараты с истекшим сроком годности	[68, 69]	

Таблица 2. Окончание

№	Группы ингибиторов коррозии	Рассматриваемые соединения	Литература
9	Экологичные (“зеленые”) ингибиторы	Натуральные продукты	[72, 73]
		Растительные экстракты	[74–85]
		Кумарины	[86]
		Алкалоиды	[87]
		Экстракты растений, эфирные масла, ионные жидкости, лекарства, аминокислоты, экологически чистые полимеры, “зеленые” неорганические ингибиторы	[88]
		Экстракты растений, натуральные полимеры, биоимитация “зеленых” ингибиторов	[89]
		Натуральные смолы	[90]
	Твердые отходы	[91]	

ние в следующих обзорных работах [55, 56, 58, 71–91]. Идея применения в качестве ИК соединений и продуктов технического или природного происхождения, безвредных для человека и окружающей природы заслуживает серьезного внимания, хотя ее практическая реализация далека до завершения. Отсутствуют общепринятые и детально обсужденные коррозионистами критерии экологичных ИК, предназначенных для защиты металлов в кислых средах. Лишь Курайши в своем обзоре [92], опираясь на данные Парижской комиссии Европейского экономического общества, выделяет “зеленые” ИК на основании следующих критериев:

– *токсичность*, величина ЛД50 ИК должна быть более 500 мг/кг массы крысы;

– *биodeградация*, биоразлагаемость ИК должна составлять 60% за 28 суток;

– *биоаккумуляция*, биоаккумуляция – способность любого химического вещества накапливаться в живых организмах, ее можно рассчитать, используя значение коэффициента распределения ( $\lg P_{o/v}$ ), которое должно быть не более 3.0:

$$P_{o/v} = C'_{in} (C''_{in})^{-1}, \quad (\text{II.1})$$

где  $C'_{in}$  – концентрация ИК в октанолe,  $C''_{in}$  – концентрация ИК в воде. Часто заведомо токсичные соединения определяют модным термином “экологичные” или технология получения такого готового продукта сопряжена с использованием токсичных реагентов. С другой стороны, отсутствуют систематические исследования, позволяющие сравнить свойства экологичных ИК и промышленно применяемых продуктов. Только такие исследования могут показать, что экологичные продукты хотя бы не уступают в свойствах промышленным, эксплуатация которых часто осуществляется в жестких технологи-

ческих условиях, а не при комнатной температуре, при которой часто исследуют рассматриваемую группу продуктов.

Проблематика разработки экологичных ИК во многом требует нового подхода. Следует уходить от поиска экологичных ИК, необходимо использовать безопасные и чистые технологии эксплуатации ингибированных кислотных растворов, соответствующих жестким требованиям современного производства. Использовать для создания ингибированных растворов в первую очередь следует соединения, эффективно тормозящие разрушение металлов во всем диапазоне условий промышленной эксплуатации. При этом нельзя забывать об опасности использования кислот, являющихся основным компонентом обсуждаемых агрессивных сред.

Во многом специфической коррозионной средой являются растворы фосфорной кислоты [26, 93]. В ней сложно добиться высокой степени защиты сталей в широком диапазоне температур, используя индивидуальные органические соединения [26]. Напротив, применение композиционных ИК (производное триазола + серосодержащее органическое соединение или роданид щелочного металла) позволяет существенно замедлять коррозию низкоуглеродистых сталей при  $t \leq 100^\circ\text{C}$ .

Наряду с разработкой ИК сталей для растворов кислот, ведутся активные исследования в области ингибиторной защиты в этих средах меди [94–98], алюминия [71, 99] и сплавов на их основе. Часто при защите медных сплавов в растворах кислот существенное снижение коррозии позволяет обеспечить соединения группы азолов, в первую очередь, различные производные триазола. Существуют серьезные сложности с защитой сплавов Al в средах с высоким содержанием кислоты и при высоких температурах. В случае эко-

логичных ИК чаще всего следует говорить об их низкой способности в замедлении коррозии этих сплавов [71].

Для защиты металлического оборудования, в первую очередь стального, от коррозии при контакте с растворами кислот на предприятиях нефтегазового комплекса рекомендованы и применяются самые различные группы соединений [2, 3, 100–105]. Анализ литературных данных [3, 106–108] показывает, что существует насущная потребность в разработке для нужд нефтегазового комплекса ИК, способных защищать стальные конструкции в широком диапазоне  $t$ , включая высокотемпературные среды ( $t > 100^\circ\text{C}$ ). Современные подходы к решению этой производственной проблемы путем использования композиционных ИК на основе триазолов рассмотрены выше.

Выделяют ИК, рекомендуемые для введения в растворы кислот при очистке поверхностей металлов от минеральных загрязнений [109–111]. Интересна работа [109], где рассматриваются не сами ИК, а готовые ингибированные смеси на основе кислот, предназначенные для удаления минеральных отложений. Отмечается большое число исследований, посвященных ингибированным средам для очистки различных сталей, и недостаточное рассмотрение проблемы очистки медных и титановых сплавов, также применяемых для изготовления теплообменного оборудования. Как правило, в качестве ИК для кислых сред используются азотсодержащие органические соединения, среди которых наиболее перспективны амины и азолы.

Следует также отметить справочные обзоры [112–116], обобщающие сведения о свойствах различных групп кислотных ИК металлов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение ИК металлов в растворах кислот должно происходить не в форме индивидуальных веществ, а в форме смесей, что позволяет снизить расход ИК и придать им новые свойства. Увеличивая число компонентов в смеси и варьируя их относительное содержание, можно придавать ингибиторным композициям новые свойства. Так, трехкомпонентные композиции, содержащие триазолы, позволяют защищать стали в растворах кислот в крайне жестких условиях высокотемпературной коррозии или в присутствии солей Fe(III).

Необходимо отметить, что несмотря на серьезный интерес к проблеме защиты металлов в кислых средах экологичными ИК, практический аспект их использования проработан недостаточно. Следует уходить от поиска очередных “зеленых” ИК, необходимо разрабатывать технологии применения ингибированных растворов кислот, со-

ответствующие экологическим требованиям современного производства и учитывающие также высокую опасность растворов самих кислот.

Исследование выполнено в рамках НИОКТР (2022–2024 гг.): “Химическое сопротивление материалов, защита металлов и других материалов от коррозии и окисления” (регистрационный номер в ЕГИСУ 122011300078-1, инвентарный номер FFZS-2022-0013).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Авдеев Я.Г., Кузнецов Ю.И.* // Журн. физ. химии. 2023. Т. 97. № 3. С. 1–17.  
<https://doi.org/10.31857/S0044453723030056>.
2. *Schmitt G.* // Br. Corros. J. 1984. V. 19. № 4. P. 165.  
<https://doi.org/10.1179/000705984798273100>
3. *Finšgar M., Jackson J.* // Corros. Sci. 2014. V. 86. P. 17.  
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.04.044>
4. *Umoren S.A., Solomon M.M.* // J. Ind. Eng. Chem. 2015. V. 21. P. 81.  
<https://doi.org/10.1016/j.jiec.2014.09.033>
5. *Кузнецов Ю.И.* // Успехи химии. 2004. Т. 73. № 1. С. 79.
6. *Umoren S.A., Solomon M.M.* // J. Environ. Chem. Eng. 2017. V. 5. № 1. P. 246.  
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.12.001>
7. *Murakawa T., Nagaura S., Hackerman N.* // Corros. Sci. 1967. V. 7. № 2. P. 79.  
[https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(67\)80105-7](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(67)80105-7)
8. *Aramaki K., Hackerman N.* // J. Electrochem. Soc. 1969. V. 116. № 5. P. 568.  
<https://doi.org/10.1149/1.2411965>
9. *Лучкин А.Ю., Гончарова О.А., Андреев Н.Н.* // Коррозия: материалы, защита. 2021. № 1. С. 27.  
<https://doi.org/10.31044/1813-7016-2021-0-1-27-32>
10. *Экилик В.В., Экилик Г.Н.* // Защита металлов. 1998. Т. 34. № 2. С. 162.
11. *Avdeev Ya.G., Kuznetsov Yu.I., Buryak A.K.* // Corros. Sci. 2013. V. 69. P. 50.  
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2012.11.016>
12. *Подобаев Н.И., Авдеев Я.Г.* // Защита металлов. 2001. Т. 37. № 1. С. 19.
13. *Avdeev Ya.G., Tyurina M.V., Kuznetsov Yu.I.* // Int. J. Corros. Scale Inhib. 2014. V. 3. № 4. P. 246.  
<https://doi.org/10.17675/2305-6894-2014-3-4-246-253>
14. *Berezhnaya A.G., Shayeя Gh.A.H., Chernyavina V.V.* // Ibid. 2017. V. 6. № 4. P. 372.  
<https://doi.org/10.17675/2305-6894-2017-6-4-2>
15. *Berezhnaya A.G., Khudoleeva E.S., Chernyavina V.V.* // Ibid. 2021. V. 10. № 2. P. 649.  
<https://doi.org/10.17675/2305-6894-2021-10-2-11>
16. *Berezhnaya A.G., Chernyavina V.V., Krotkii I.I.* // Ibid. 2022. V. 11. № 2. P. 831.  
<https://doi.org/10.17675/2305-6894-2022-11-2-25>
17. *Авдеев Я.Г., Лучкин А.Ю., Тюрина М.В., Кузнецов Ю.И.* // Коррозия: материалы, защита. 2015. № 1. С. 23.

18. Авдеев Я.Г., Тюрина М.В., Кузнецов Ю.И. и др. // Коррозия: материалы, защита. 2013. № 6. С. 17.
19. Avdeev Ya.G., Kuznetsov Yu.I. // Int. J. Corros. Scale Inhib. 2021. V. 10. № 3. P. 1069. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2021-10-3-15>
20. Bayol E., Kayakirilmaz K., Erbil M. // Mater. Chem. Phys. 2007. V. 104. № 1. P. 74. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2007.02.073>
21. Решетников С.М. Ингибиторы кислотной коррозии металлов. Л.: Химия, 1986. 144 с.
22. Антропов Л.И., Макушин Е.М., Панасенко В.Ф. Ингибиторы коррозии металлов. Киев: Техніка, 1981. 183 с.
23. Авдеев Я.Г., Макарычев Ю.Б., Кузнецов Д.С., Казанский Л.П. // Коррозия: материалы, защита. 2018. № 9. С. 22. <https://doi.org/10.31044/1813-7016-2018-0-9-22-29>
24. Avdeev Ya.G., Kuznetsov D.S., Tyurina M.V. et al. // Int. J. Corros. Scale Inhib. 2017. V. 6. № 2. P. 180. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2017-6-2-7>
25. Avdeev Ya.G., Kuznetsov D.S., Tyurina M.V. et al. // Ibid. 2017. V. 6. № 1. P. 47. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2017-6-1-4>
26. Avdeev Ya.G. // Int. J. Corros. Scale Inhib. 2019. V. 8. № 4. P. 760. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2019-8-4-1>
27. Подобаев Н.И., Авдеев Я.Г. // Защита металлов. 2004. Т. 40. № 1. С. 11.
28. Авдеев Я.Г., Кузнецов Ю.И. // Успехи химии. 2012. Т. 81. № 12. С. 1133.
29. Авдеев Я.Г. // Коррозия: материалы, защита. 2014. № 6. С. 27.
30. Shetty P. // Chem. Eng. Commun. 2020. V. 207. № 7. P. 985. <https://doi.org/10.1080/00986445.2019.1630387>
31. Verma C., Quraishi M.A. // Coord. Chem. Rev. 2021. V. 446. 214105. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2021.214105>
32. Barmatov E., Hughes T. // Mater. Chem. Phys. 2021. V. 257. 123758. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123758>
33. Loto R.T., Loto C.A., Popoola A.P.I. // J. Mater. Environ. Sci. 2012. V. 3. № 5. P. 885.
34. Chauhan D.S., Singh P., Quraishi M.A. // Mol. Liq. 2020. V. 320. Part A. 114387. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114387>
35. Verma C., Quraishi M.A., Ebenso E.E. // Surf. Interfaces. 2020. V. 21. 100634. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100634>
36. Verma C., Rhee K.Y., Quraishi M.A., Ebenso E.E. // J. Taiwan Inst. Chem. Eng. 2020. V. 117. P. 265. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2020.12.011>
37. Rasheeda K., Alva V.D.P., Krishnaprasad P.A., Samshuddin S. // Int. J. Corros. Scale Inhib. 2018. V. 7. № 1. P. 48. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2018-7-1-5>
38. Chauhan D.S., Quraishi M.A., Nik W.B.W., Srivastava V. // Mol. Liq. 2021. V. 321. 114747. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114747>
39. Verma C., Abdellattif M.H., Alfantazi A., Quraishi M.A. // Ibid. 2021. V. 340. 117211. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117211>
40. Avdeev Ya.G. // Int. J. Corros. Scale Inhib. 2018. V. 7. № 4. P. 460. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2018-7-4-1>
41. Mishra A., Aslam J., Verma C. et al. // J. Taiwan Inst. Chem. Eng. 2020. V. 114. P. 341. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2020.08.034>
42. Goni L.K.M.O., Jafar Mazumder M.A., Quraishi M.A., Rahman M.M. // Chem. Asian. J. 2021. V. 16. P. 1–42. <https://doi.org/10.1002/asia.202100201>
43. Quraishi M.A., Chauhan D.S., Saji V.S. / In Heterocyclic Organic Corros. Inhib. / Eds. M.A. Quraishi, D.S. Chauhan and V.S. Saji. Elsevier Inc. All Rights Reserved. 2020. P. 87. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818558-2.00004-7>
44. Phadke Swathi N., Alva V.D.P., Samshuddin S. // J. Bio. Tribo. Corros. 2017. V. 3. P. 42. <https://doi.org/10.1007/s40735-017-0102-3>
45. Salim R., Ech-chihbi E., Oudda H. et al. // Ibid. 2019. V. 5. P. 14. <https://doi.org/10.1007/s40735-018-0207-3>
46. Merimi I., Touzani R., Aouniti A. et al. // Int. J. Corros. Scale Inhib. 2020. V. 9. № 4. P. 1237. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2020-9-4-4>
47. Verma C., Ebenso E.E., Quraishi M.A., Rhee K.Y. // Mol. Liq. 2021. V. 334. 116441. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.116441>
48. Verma C., Haque J., Quraishi M.A., Ebenso E.E. // Ibid. 2019. V. 275. P. 18. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.11.040>
49. Avdeev Ya.G., Kuznetsov Yu.I. // Int. J. Corros. Scale Inhib. 2021. V. 10. № 2. P. 480. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2020-10-2-2>
50. Quraishi M.A., Chauhan D.S., Saji V.S. / In Heterocyclic Organic Corros. Inhib. / Eds. M.A. Quraishi, D.S. Chauhan and V.S. Saji. Elsevier Inc. All Rights Reserved. 2020. P. 133. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818558-2.00005-9>
51. Obot I.B., Onyeachu I.B., Umoren S.A. et al. // J. Petrol. Sci. Eng. 2020. V. 185. 106469. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106469>
52. Quraishi M.A., Chauhan D.S., Saji V.S. / In Heterocyclic Organic Corros. Inhib. / Eds. M. A. Quraishi, D.S. Chauhan and V.S. Saji. Elsevier Inc. All Rights Reserved. 2020. P. 159. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818558-2.00006-0>
53. Quraishi M.A., Chauhan D.S., Saji V.S. // Ibid. 2020. P. 195. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818558-2.00007-2>
54. Quraishi M.A., Chauhan D.S., Saji V.S. // Ibid. 2020. P. 211. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818558-2.00008-4>
55. Verma C., Ebenso E.E., Quraishi M.A. // Mol. Liq. 2017. V. 233. P. 403. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.02.111>
56. Kobzar Ya.L., Fatyeyeva K. // Chem. Eng. J. 2021. V. 425. 131480. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131480>



57. *Deyab M.A.* // Mol. Liq. 2020. V. 309. 113107. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113107>
58. *Ardakani E.K., Kowsari E., Ehsani A., Ramakrishna S.* // Microchemical J., 2021. V. 165. 106049. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2021.106049>
59. *El Ibrahimy B., Jmiai A., Bazzi L., El Issami S.* // Arab. J. Chem. 2020. V. 13. № 1. P. 740. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2017.07.013>
60. *Hamadi L., Mansouri S., Oulmi K., Kareche A.* // Egypt. J. Petrol. 2018. V. 27. № 4. P. 1157. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2018.04.004>
61. *Umoren S.A., Solomon M.M.* // Open Mater. Sci. J. 2014. V. 8. P. 39. <https://doi.org/10.2174/1874088X01408010039>
62. *Aljeaban N.A., Goni L.K.M.O., Alharbi B.G. et al.* // Int. J. Polym. Sci. 2020. V. 2020. 9512680. <https://doi.org/10.1155/2020/9512680>
63. *Arthur D.E., Jonathan A., Ameh P.O., Anya C.* // Int. J. Ind. Chem. 2013. V. 4. Article 2. <https://doi.org/10.1186/2228-5547-4-2>
64. *Verma C., Quraishi M.A.* // Int. J. Corros. Scale Inhib. 2021. V. 10. № 3. P. 851. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2021-10-3-1>
65. *Gece G.* // Corros. Sci. 2011. V. 53. P. 3873. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.08.006>
66. *Pathak R.K., Mishra P.* // Int. J. Sci. Res., 2016. V. 5. № 4. P. 671.
67. *Tanwer S., Shukla S.K.* // Current Res. Green Sustainable Chem. 2022. V. 5. 100227. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2021.100227>
68. *Baari M.J., Sabandar C.W.* // Indones. J. Chem. 2021. V. 21. № 5. P. 1316. <https://doi.org/10.22146/ijc.64048>
69. *Shamnamol G.K., Sreelakshmi K.P., Ajith G., Jacob J.M.* / AIP Conference Proceedings. 2020. V. 2225. 070006. <https://doi.org/10.1063/5.0005931>
70. *Kamaruzzaman W.M.I.W.M., Nasir N.A.M., Hamidi N.A.S.M. et al.* // Arab. J. Chem. 2022. V. 15. 103655. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103655>
71. *Xhanari K., Finšgar M., Knez Hrcic M. et al.* // RSC Adv. 2017. V. 7. 27299. <https://doi.org/10.1039/c7ra03944a>
72. *Raja P.B., Sethuraman M.G.* // Mater. Lett. 2008. V. 62. P. 113. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2007.04.079>
73. *Kadhim A., Betti N., Al-Bahrani H.A. et al.* // Int. J. Corros. Scale Inhib. 2021. V. 10. № 3. P. 861. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2021-10-3-2>
74. *Salleh S.Z., Yusoff A.H., Zakaria S.K et al.* // J. Clean. Prod. 2021. V. 304. 127030. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127030>
75. *Umoren S.A., Solomon M.M., Obot I.B., Sulieman R.K.* // J. Ind. Eng. Chem. 2019. V. 76. P. 91. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.03.057>
76. *Shang Z., Zhu J.* // J. Mater. Res. Technol. 2021. V. 15. P. 5078. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.10.095>
77. *Chaubey N., Savita, Qurashi A., Chauhan D.S., Quraishi M.A.* // Mol. Liq. 2021. V. 321. 114385. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114385>
78. *Singh A., Ebenso E.E., Quraishi M.A.* // Int. J. Corros. 2012. V. 2012. 897430. <https://doi.org/10.1155/2012/897430>
79. *Abd-El-Nabey B.A., Abd-El-Khalek D.E., El-Housseiny S., Mohamed M.E.* // Int. J. Corros. Scale Inhib. 2020. V. 9. № 4. P. 1287. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2020-9-4-7>
80. *Badawi A.K., Fahim I.S.* // Ibid. 2021. V. 10. № 4. P. 1385. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2021-10-4-2>
81. *Rajendran S., Srinivasan R., Dorothy R. et al.* // Ibid. 2019. V. 8. № 3. P. 437. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2019-8-3-1>
82. *Chigondo M., Chigondo F.* // J. Chem. 2016. V. 2016. 6208937. <https://doi.org/10.1155/2016/6208937>
83. *Bilgiç S.* // Int. J. Corros. Scale Inhib. 2021. V. 10. № 1. P. 145. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2021-10-1-9>
84. *Bilgiç S.* // Ibid. 2022. V. 11. № 1. P. 1–42. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2022-11-1-1>
85. *Devi N.R., Karthiga N., Keerthana R. et al.* // Ibid. 2020. V. 9. № 4. P. 1169. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2020-9-4-2>
86. *Al-Amiery A.A., Kadhim A., Al-Adili A., Tawfiq Z.H.* // Ibid. 2021. V. 10. № 4. P. 1355. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2021-10-4-1>
87. *Verma C., Ebenso E.E., Quraishi M.A.* // Ibid. 2019. V. 8. № 3. P. 512. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2019-8-3-3>
88. *Wei H., Heidarshenas B., Zhou L. et al.* // Mater. Today Sustainability. 2020. V. 10. P.100044. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2020.100044>
89. *Kesavan D., Gopiraman M., Sulochana N.* // Chem. Sci. Rev. Lett. 2012. V. 1. № 1. P. 1–8.
90. *Vaidya N.R., Aklujkar P., Rao A.R.* // J. Coat. Technol. Res. 2022. V. 19. P. 223. <https://doi.org/10.1007/s11998-021-00510-z>
91. *Abdel Hameed R.S., Qureshi M.T., Abdallah M.* // Int. J. Corros. Scale Inhib. 2021. V. 10. № 5. P. 68. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2021-10-1-4>
92. *Quraishi M.A., Chauhan D.S., Saji V.S.* / In Heterocyclic Organic Corros. Inhib. / Eds. M.A. Quraishi, D.S. Chauhan and V.S. Saji. Elsevier Inc. All Rights Reserved. 2020. P. 225. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818558-2.00009-6>
93. *Khadom A.A., Farhan S.N.* // Corros. Rev. 2018. V. 36. № 3. P. 267. <https://doi.org/10.1515/corrrev-2017-0104>
94. *Fateh A., Aliofkhaezaei M., Rezvanian A.R.* // Arab. J. Chem. 2020. V. 13. P. 481. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2017.05.021>
95. *Antonijević M.M., Petrović M.B.* // Int. J. Electrochem. Sci. 2008. V. 3. P. 1–28.
96. *Petrović Mihajlović M.B., Antonijević M.M.* // Int. J. Electrochem. Sci. 2015. V. 10. P. 1027.
97. *Finšgar M., Milošev I.* // Corros. Sci. 2010. V. 52. P. 2737. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.05.002>

98. *Allam N.K., Nazeer A.A., Ashour E.A.* // J. Appl. Electrochem. 2009. V. 39. P. 961.  
<https://doi.org/10.1007/s10800-009-9779-4>
99. *Xhanari K., Finšgar M.* // RSC Adv. 2016. V. 6. 62833.  
<https://doi.org/10.1039/c6ra11818f>
100. *Ansari K.R., Chauhan D.S., Singh A., Saji V.S.* / In Corrosion Inhibitors in the Oil and Gas Industry / Eds.: V.S. Saji and S.A. Umoren. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany. 2020. P. 153–176.  
<https://doi.org/10.1002/9783527822140.ch6>
101. *Singh A., Quraishi M.A.* // J. Mater. Environ. Sci. 2015. V. 6. № 1. P. 224.
102. *Askari M., Askari M., Aliofkhaezrai M. et al.* // Appl. Surf. Sci. Adv. 2021. V. 6. 100128.  
<https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2021.100128>
103. *Quraishi M.A., Chauhan D.S., Ansari F.A.* // Mol. Liq. 2021. V. 329. 115514.  
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.115514>
104. *Askari M., Aliofkhaezrai M., Ghaffari S., Hajizadeh A.* // J. Nat. Gas Sci. Eng. 2018. V. 58. P. 92.  
<https://doi.org/10.1016/j.jngse.2018.07.025>
105. *Tiu B.D.B., Advincula R.C.* // Reactive Function. Polymer. 2015. V. 95. P. 25.  
<https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2015.08.006>
106. *Avdeev Ya.G., Kuznetsov Yu.I.* // Int. J. Corros. Scale Inhib. 2020. V. 9. № 2. P. 394.  
<https://doi.org/10.17675/2305-6894-2020-9-2-2>
107. *Avdeev Ya.G., Kuznetsov Yu.I.* // Ibid. 2020. V. 9. № 3. P. 867.  
<https://doi.org/10.17675/2305-6894-2020-9-3-5>
108. *Avdeev Ya.G., Kuznetsov Yu.I.* // Ibid. 2020. V. 9. № 4. P. 1194.  
<https://doi.org/10.17675/2305-6894-2020-9-4-3>
109. *Obot I.B., Meroufel A., Onyeachu I.B. et al.* // Mol. Liq. 2019. V. 296. 111760.  
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111760>
110. *Goyal M., Kumar S., Bahadur I. et al.* // Ibid. 2018. V. 256. P. 565.  
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.02.045>
111. *Hooshmand Zaferani S., Sharifi M., Zaarei D., Reza Shishesaz M.* // J. Environ. Chem. Eng. 2013. V. 1. P. 652.  
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.09.019>
112. *Verma C., Ebenso E.E., Quraishi M.A., Hussain C.M.* // Mater. Adv. 2021. V. 2. P. 3806.  
<https://doi.org/10.1039/d0ma00681e>
113. *Verma C., Olasunkanmi L.O., Ebenso E.E., Quraishi M.A.* // Mol. Liq. 2018. V. 251. P. 100.  
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.12.055>
114. *Yang H.-M.* // Molecules. 2021. V. 26. P. 3473.  
<https://doi.org/10.3390/molecules26113473>
115. *Abd El-Maksoud S.A.* // Int. J. Electrochem. Sci. 2008. V. 3. P. 528.
116. *Vinutha M.R., Venkatesha T.V.* // Port. Electrochimica Acta. 2016. V. 34. № 3. P. 157.  
<https://doi.org/10.4152/pea.201603157>