

===== ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЗАЩИТЫ МАТЕРИАЛОВ =====

УДК 544

ПОВЕРХНОСТНОЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ 4-АМИНО-4Н-1,2,4-ТРИАЗОЛ-3,5-ДИТИОЛОМ ДЛЯ ИНГИБИРОВАНИЯ КОРРОЗИИ В 0,5М РАСТВОРЕ СЕРНОЙ КИСЛОТЫ

© 2024 г. М. Д. Плотникова^{а,*}, М. Г. Щербань^а, А. Б. Шеин^а, К. Ю. Шумяцкая^а

^аПермский государственный национальный исследовательский университет

Букирева, 15, Пермь, 614000 Россия

*e-mail: plotnikova-md@mail.ru

Поступила в редакцию 06.09.2024 г.

После доработки 20.10.2024 г.

Принята к публикации 04.12.2024 г.

Органические ингибиторы коррозии на основе гетероциклических соединений обеспечивают значительное покрытие металлической поверхности и защищают металлическую поверхность от коррозии путем адсорбции. Адсорбция 4-амино-4Н-1,2,4-триазол-3,5-дитиол (АТД) на поверхности малоуглеродистой стали в 1 Н растворе серной кислоты была исследована комплексом физико-химических методов, включающим: поляризационные измерения, спектроскопию электрохимического импеданса, метод краевых углов смачивания, оптическую микроскопию. В пользу существования защитной пленки АТД свидетельствует перераспределение компонент свободной энергии поверхности и ее гидрофобизация. Расчет энергии активации коррозионного процесса на основании поляризационных измерений показал изменение характера адсорбции с ростом температуры от смешанного к химическому. На основании данных спектроскопии электрохимического импеданса и краевых углов смачивания установлено, что монослойное заполнение происходит при концентрации 100 мг/л. АТД ингибирует преимущественно катодную парциальную электрохимическую реакцию, образуя адсорбционные слои на энергетически неоднородной поверхности в соответствии с моделью изотермы Редлиха-Петерсона.

Ключевые слова: адсорбция, ингибитор коррозии, краевой угол, спектроскопия электрохимического импеданса, свободная энергия поверхности, изотерма адсорбции

DOI: 10.31857/S0044185624060071, EDN: MPSLAX

ВВЕДЕНИЕ

Стальные сплавы благодаря своей экономичности, хорошим механическим свойствам и доступности повсеместно применяются в качестве конструкционных материалов [1]. Однако их поверхность подвержена коррозии из-за контакта с агрессивными средами.

Одним из наиболее распространенных и агрессивных типов коррозионных сред являются кислоты. Особенно опасна ситуация контакта металлов с нагретыми растворами кислот, температура которых при проведении процедуры кислотного стимулирования нефтеносных

пластов может достигать 260°C [2]. Промышленное применение растворов кислот во многом определяется их повышенной реакционной способностью, что используется при разрушении карбонатных горных пород и кислотной обработке скважин [3–6], удалении различных продуктов, накапливающихся на поверхности стали: железной окалины [7,8], отложений, возникающих при контакте с различными технологическими жидкостями [9, 10] и накипи [2, 3, 5].

В ряде отраслей промышленности (целлюлозно-бумажная промышленность, энергетика, водоочистные сооружения, ядерные реакторы, нефтегазовая промышленность,

металлообработка и химическая промышленность) для защиты стали от коррозии используют ингибиторы коррозии.

Значительное количество ингибиторов кислотной коррозии представлено гетероциклическими соединениями [11–19]. В современной отечественной литературе имеются многочисленные работы и обзорные статьи, посвященные различным классам органических ингибиторов кислотной коррозии [20, 21], где обсуждаются механизмы их действия.

В работе [22] в качестве ингибиторов солянокислой коррозии рассматривают производные сахара, связанные с триазолом. Данные соединения обладают высоким защитным действием, достигающим 96%. Установлено, что данные производные адсорбируются согласно модели Лэнгмюра. Наблюдается зависимость защитного действия от длины углеводородного радикала.

Попова и др. [23–25] исследовали бензимидазол, индол, триазол и их производные в качестве ингибиторов коррозии малоуглеродистой стали в 1 М растворе HCl. Они показали, что рассматриваемые соединения проявляют достаточно высокие ингибирующие свойства в данных условиях. Их эффективность увеличивается с увеличением концентрации ингибитора в растворе за счет смешанного типа действия, с преимущественным уменьшением скорости анодной реакции.

В последнее время наряду с классическими методами исследования коррозионных процессов (спектроскопия электрохимического импеданса, микроскопия, поляризационные измерения) применяются методы изучения смачиваемости адсорбционных ингибиторных пленок. Так, метод лежащей капли, заключающийся в измерении контактного краевого угла, был использован в работах [26–31]. Хотелось бы отметить, что возможности данного метода несколько шире и позволяют оценить не только степень гидрофобности и сплошности пленки, но и, при использовании тестовых жидкостей – энергетическое состояние поверхности: величину свободной энергии, и ее составляющие, что способствует пониманию механизма адсорбции ингибитора [32, 33].

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Гравиметрические испытания проводились в соответствии с ГОСТ 9.502-82. Микроструктурные исследования образцов Ст3 проводились

с помощью металлографического микроскопа Olympus BX 100. Измерение краевых углов смачивания проводилось с помощью прибора DSA30 (диапазон измерения: 0–180°, разрешение $\leq 0,01^\circ$, Кресс, Германия), объем капли 2 мкл. Углы смачивания определялись автоматически с помощью системного программного обеспечения ADVANCE.

Для определения кислотно-основных составляющих свободной поверхностной энергии (СПЭ) использовали пространственный метод: параметры твердых поверхностей определялись посредством нахождения неизвестных коэффициентов A, B, C в уравнении плоскости $z = Ax + By + C$.

Методом многомерной аппроксимации строили трехмерные плоскости, в координатах (x, y, z), которые являются известными величинами

$$\left(\sqrt{\frac{\gamma_l^d}{\gamma_l^-}}; \sqrt{\frac{\gamma_l^+}{\gamma_l^-}}; \frac{\gamma_l(1 + \cos\theta)}{2\sqrt{\gamma_l^-}} \right)$$

для тестовых жидкостей, где θ – угол смачивания поверхности тестовой жидкостью; γ_l^d – дисперсионная составляющая СПЭ жидкостей, мДж/м²; γ_s^d – дисперсионная составляющая СПЭ твердого тела, мДж/м²; γ_l^+ , γ_l^- – кислотный и основной параметры СПЭ жидкостей, мДж/м²; γ_s^+ , γ_s^- – кислотный и основной параметры СПЭ твердого тела, мДж/м².

Далее в программе Статистика подбирались уравнение плоскости с коэффициентами:

$$A = \sqrt{\gamma_s^d}, B = \sqrt{\gamma_s^-}, C = \sqrt{\gamma_s^+}.$$

Электрохимические исследования проводили в трехэлектродной ячейке с отдельными катодными и анодными пространствами с использованием электрохимического измерительного комплекса SOLARTRON 1280 С. Рабочий электрод изготовлен из Ст3, электрод сравнения – хлорид-серебряный, вспомогательный электрод – платиновый.

Для определения энергии активации коррозионного процесса в присутствии ингибитора регистрировали поляризационные кривые в температурном интервале 20° ÷ 80°С. Для поддержания необходимой температуры ячейку подключали к термостату LT 100 с внешней циркуляцией. Расчеты производились согласно температурно-кинетическому методу Горбачева С.В. При концентрационной поляризации или замедленной стадии разряда влияние температуры на плотность тока описывается уравнением, аналогичным уравнению Аррениуса:

$$\ln i_k = \frac{-E_a}{RT},$$

где i_k – плотность тока коррозии, А/м², E_a – эффективная энергия активации, Дж/моль, T – температура, К. При построении графиков в координатах $\ln i_k = f(1/T)$ получается прямая, тангенс угла наклона которой является E_a/R .

Спектры импеданса регистрировались в интервале частот 20000 – 0,1 Гц с амплитудой переменного сигнала 5 мВ.

Степень заполнения θ поверхности Ст3-электрода ингибитором коррозии рассчитывалась по формуле:

$$\theta = \frac{C_{dl}^0 - C_{dl}^1}{C_{dl}^0 - C_{dl}^1},$$

где C_{dl}^0 , C_{dl} и C_{dl}^1 – соответственно емкость двойного электрического слоя в растворе кислоты, в растворе с данной концентрацией соединения ингибиторов и при $\theta = 1$. Значение C_{dl}^1 определяли экстраполяцией кривой в координатах

$$C_{dl} = f\left(\frac{1}{C_{инг}}\right) \text{ до } \left(\frac{1}{C_{инг}}\right) = 0,$$

где $C_{инг}$ – концентрация ингибитора в электролите, г/л. Емкость двойного слоя рассчитывали из параметров элемента постоянной фазы (СРЕ), опираясь на уравнение [34]:

$$C_{dl} = \left[Q \left(R_s^{-1} + R_{ct}^{-1} \right)^{(p-1)} \right]^{1/p},$$

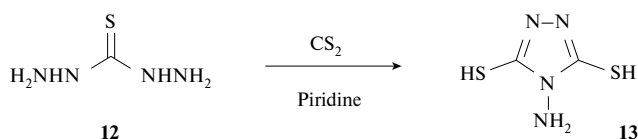


Рис. 1. Синтез 4-амино-4Н-1,2,4-триазол-3,5-дитиола.

где Q , p – параметры элемента СРЕ, R_s , R_{ct} – сопротивление раствора и сопротивление переноса заряда, рассчитываемые из экспериментальных данных с помощью программного обеспечения ZView2.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве объекта исследования был выбран 4-амино-4Н-1,2,4-триазол-3,5-дитиол (АТД), полученный кипячением тиокарбогидрида с сероуглеродом в пиридине (рис. 1).

Соединение может служить основой для синтеза ингибиторов более сложной структуры, поскольку природа боковых замещений триазольного фрагмента влияет на его способность предотвращать коррозионные процессы [35].

Рис. 2 показывает, что в диапазоне концентраций от 12,5 до 200 мг/л защитное действие АТД немонотонно возрастает с 6 до 96%, превышая 90% при концентрации 100 мг/л, что соответствует 0,7 ммоль/л.

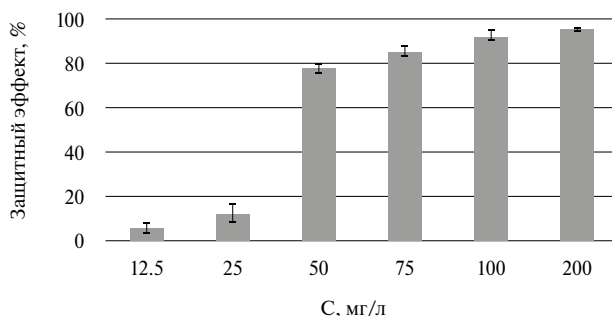


Рис. 2. Влияние концентрации АТД на величину защитного эффекта в 0,5М растворе серной кислоты

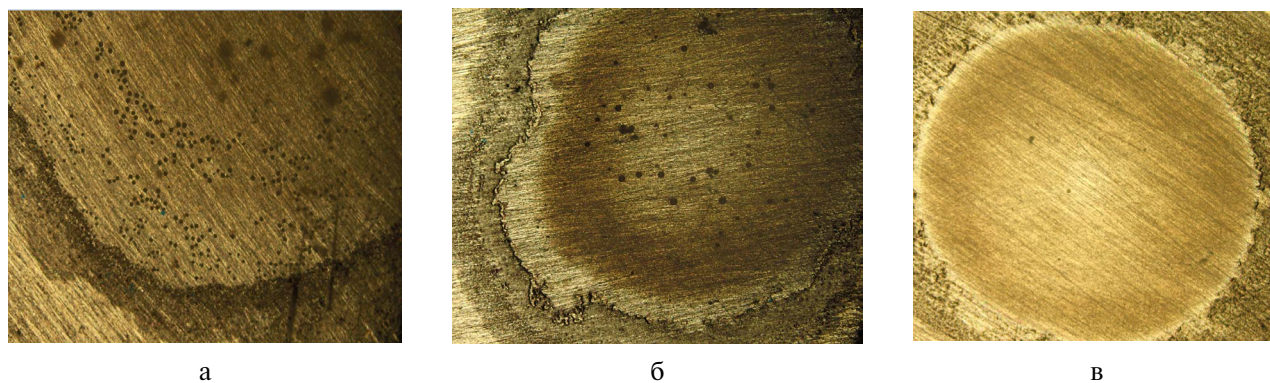


Рис. 3. Состояние поверхности Ст3 при контакте с раствором 0,5М серной кислоты в присутствии АТД в концентрациях (мг/л): а – 0, б – 50, в – 100. Увеличение 25.

С увеличением концентрации АТД происходит блокировка активных центров поверхности, что препятствует растворению металла и наглядно продемонстрировано на рис. 3. Микрофотографии иллюстрируют уменьшение количества пузырьков водорода на поверхности стали с ростом концентрации ингибитора. Это позволяет предположить, что введение АТД в систему преимущественно влияет на парциальную катодную реакцию коррозионного процесса.

Также рост концентрации АТД приводит к увеличению адгезионных взаимодействий в системе сталь-ингибитор, что выражается в снижении краевых углов смачивания и росте адгезионного напряжения, которое вычисляли как произведение поверхностного натяжения раствора АТД на косинус краевого угла смачивания им же поверхности стали.

Следует подчеркнуть, что молекула АТД не обладает дифильным строением, поэтому поверхностной активности на границе жидкость/газ не наблюдалось: величина поверхностного натяжения всех растворов не изменялась и составляла 72 мН/м (рис. 4).

Образованная АТД пленка имеет гидрофобный характер, так как происходит увеличение краевого угла смачивания водой после выдержки образцов в ингибированных растворах (табл. 1). Образованная пленка носит немонослойный

характер, так как наблюдается колебание краевых углов с ростом концентрации АТД.

Также при образовании адсорбционной пленки возможна различная ориентация молекул на поверхности из-за наличия нескольких активных центров в молекуле АТД. Согласно литературным данным и результатам компьютерного моделирования, молекула АТД в кислых средах может существовать в таутомерных формах (рис. 5).

В этом случае информативной характеристикой поверхности будет являться свободная поверхностная энергия (СПЭ). СПЭ аддитивно содержит несколько компонентов различной природы. Определение компонентов СПЭ Ст3 проводилось по методу ванн Осса-Чодери-Гуда (ВОЧГ) или метода тестовых жидкостей. Проведенные расчеты позволяют оценить характер поверхности, рассчитав количество активных центров различной природы. Табл. 2 демонстрирует изменение энергетических параметров поверхности исходного образца Ст3, подвергнувшегося коррозионным испытаниям в тестовом и ингибированном растворах серной кислоты.

Первоначально на поверхности подложки находится значительное количество оксидов железа, что обуславливает преобладание дисперсионной составляющей. После контакта поверхности с коррозионной средой происходит

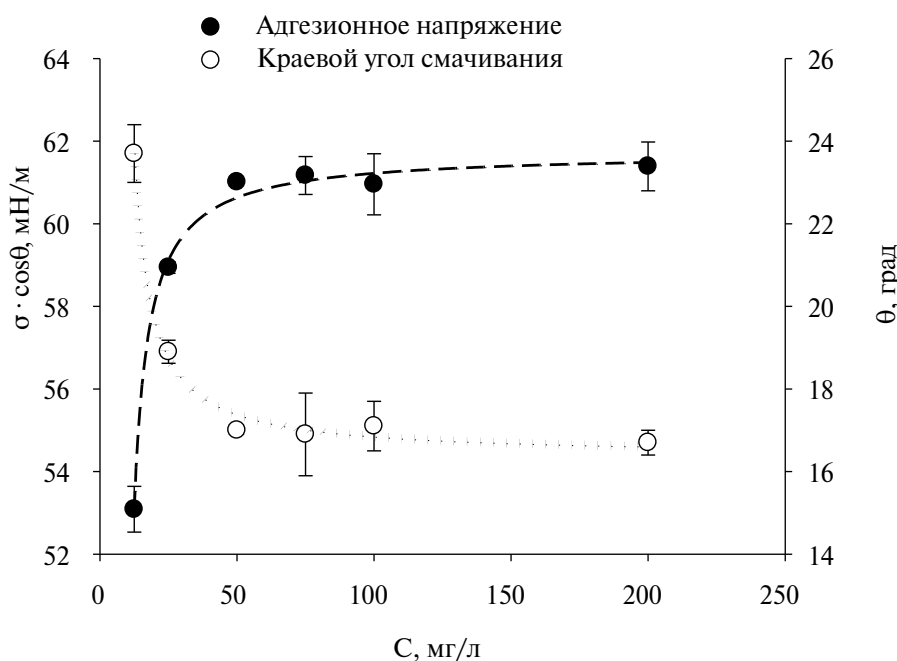


Рис. 4. Изменение краевого угла смачивания и напряжения адгезии при различной концентрации АТД

Концентрация ингибитора, мг/л						
0	12,5	25	50	75	100	200
						
Краевой угол смачивания, град						
71,6±2,9	87,1±0,8	87,8±4,4	75,6±2,3	69,6±2,9	85,4±2,6	82,8±2,9

Таблица 1. Гидрофобизация поверхности образцов Ст3 под действием АТД после гравиметрических испытаний

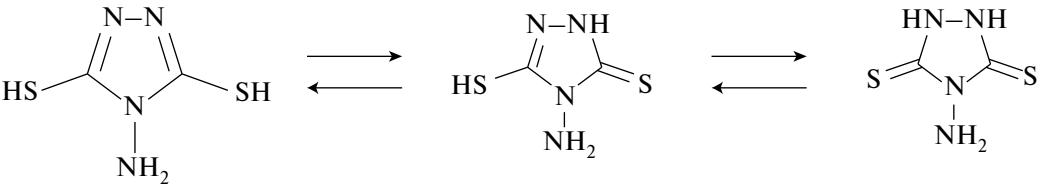


Рис. 5. Таутомерные формы АТД в кислых средах.

снятие оксидной пленки, и свободная энергия поверхности возрастает. При этом основной вклад в СПЭ вносит полярная составляющая, для которой в результате протекания коррозионного процесса отмечается значительный рост по сравнению с исходной поверхностью. При введении АТД в коррозионную среду его адсорбция, как следует из результатов, происходит преимущественно на полярных центрах поверхности, снижая кислотную составляющую γ_s^+ СПЭ, в то время как дисперсионная компонента γ_s^d возрастает вследствие появления на поверхности триазольных фрагментов молекулы АТД.

Из представленных данных следует, что введение ингибитора в концентрации 100 мг/л снижает полную энергию поверхности в 3 раза, что практически исключает взаимодействие металлической поверхности с коррозионной средой. Уменьшение полярной и рост дисперсионной составляющих СПЭ говорят о том, что на поверхности стали с ростом концентрации ингибитора сокращается число энергетических центров, несущих заряд, а именно ионов железа. Вклад полярной составляющей в общую энергию поверхности с ростом концентрации ингибитора уменьшается и обуславливается наличием гетероатомов в молекуле ингибитора.

Адсорбция ингибитора может протекать как за счет физических, так и за счет химических

взаимодействий. Для определения характера связи между поверхностью Ст3 и молекулами АТД использовался электрохимический метод. Типичные поляризационные кривые представлены на рис. 6. Поляризационные измерения проводились с интервалом 10 К, определялись потенциал и токи коррозии экстраполяцией тафелевых участков.

Из данных табл. 3 следует, что в присутствии АТД потенциал свободной коррозии смещается в сторону более отрицательных значений. При увеличении температуры до 303 К наблюдали дальнейшее смещение потенциала в катодную область, дальнейший рост температуры практически не влиял на потенциал коррозии, что позволило предположить формирование монослоя ингибитора на поверхности стали.

С ростом температуры скорость коррозии, как и любого процесса, возрастает. Зависимость плотности коррозионного тока от температуры позволяет вычислить величину энергии активации коррозионного процесса, чтобы судить о типе адсорбции ингибитора на поверхности стали. Для определения энергии активации были построены зависимости в координатах уравнения Аррениуса ($\ln i_k - 1/T$) (рис. 7). По графику определяли тангенс угла наклона прямой и рассчитывали значения эффективной энергии активации. Результаты представлены в табл. 4.

Таблица 2. Результаты обработки краевых углов смачивания по методу ВОЧГ

Плоскость в координатах уравнения ВОЧГ	Значения компонентов СПЭ, мДж/м2
Исходный образец	γ_s^+ γ_s^- γ_s^d γ_s 1,00 0,10 30,1 31,1
Образец после выдержки в неингибированном растворе 0,5М H ₂ SO ₄	γ_s^+ γ_s^- γ_s^d γ_s 73,95 15,95 16,77 106,67
После выдержки в растворе 0,5М H ₂ SO ₄ + 100 мг/л АДД	γ_s^+ γ_s^- γ_s^d γ_s 10,17 1,33 27,42 38,91

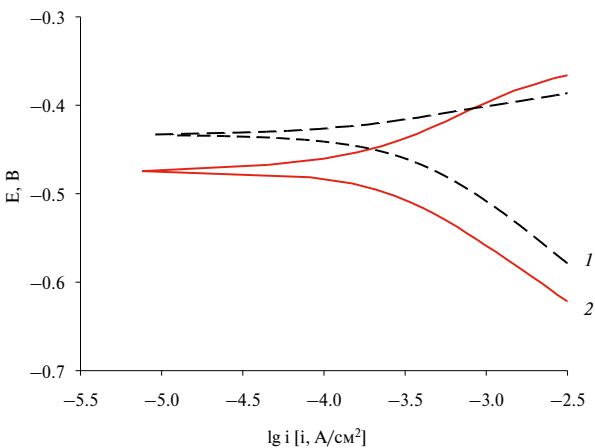


Рис. 6. Поляризационные кривые Ст3 в 0,5М растворе H₂SO₄ при температуре 293 К и концентрации АДД (мг/л): 1 – 0, 2 – 100.

Таблица 3. Влияние температуры на потенциал свободной коррозии Ст3 в тестовом и ингибированном (100 мг/л АДД) 0,5 М растворе H₂SO₄.

Температура, К	E _{ср} , В		i _к , А/м²		Z, %
	АДД	H ₂ SO ₄	АДД	H ₂ SO ₄	
293	–0,467	–0,433	1,5	3,8	60
303	–0,474	–0,439	2,1	6,3	66
313	–0,470	–0,437	2,8	8,7	68
323	–0,472	–0,439	3,0	11,3	73
333	–0,472	–0,434	3,5	22,5	84
353	–0,474	–0,429	4,5	49,2	91

Таблица 4. Влияние АДД на величину энергии активации Ст3 в 0,5М растворе H₂SO₄.

Т, К	E _а , кДж/моль при концентрации АДД	
	0	100 мг/л
293–313	36,3	23,8
313–353		11,3

Значение энергии активации в неингибированной коррозионной среде составило 36,3 кДж/моль. В присутствии ингибитора эта величина снижается. На аррениусовской зависимости можно выделить два линейных участка с разными наклонами. В интервале температур 293–313 К энергия активации соответствует механизму смешанной адсорбции, т.е. молекулы ингибитора адсорбируются на поверхности как за счет физической, так и химической адсорбции. С ростом температуры доля физической адсорбции уменьшается, и молекулы адсорбируются химически. Об этом свидетельствует не только меньшее значение энергии активации, но и рост защитного эффекта при увеличении температуры (рис. 7).

Метод спектроскопии электрохимического импеданса дает возможность изучить механизм и кинетику коррозионного процесса, а также рассчитать степень заполнения поверхности молекулами ингибитора и определить тип изотермы адсорбции. Диаграммы Найквиста СтЗ в ингибированном и неингибированном 0,5 М растворах серной кислоты представлены на рис. 8.

С ростом АТД в растворе увеличивается поляризационное сопротивление благодаря формированию защитной пленки, в то время как емкость двойного электрического слоя уменьшается. Спектры импеданса обрабатывались с помощью эквивалентной электрической схемы, представленной на рис. 9, широко применяемой для описания коррозионных процессов в кислых средах, где R_s – сопротивление раствора, R_1 – поляризационное сопротивление, CPE_1 – элемент постоянной фазы, R_2 – C_1 – цепочка, моделирующая адсорбцию интермедиата.

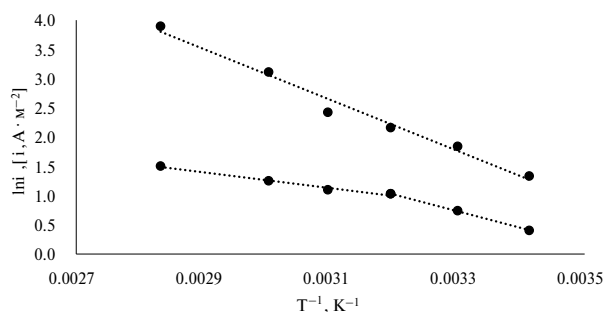


Рис. 7. Определение энергии активации процесса коррозии СтЗ в 0,5 М растворе H_2SO_4 : 1 – без ингибитора, 2 – с добавлением 100 мг/л АТД.

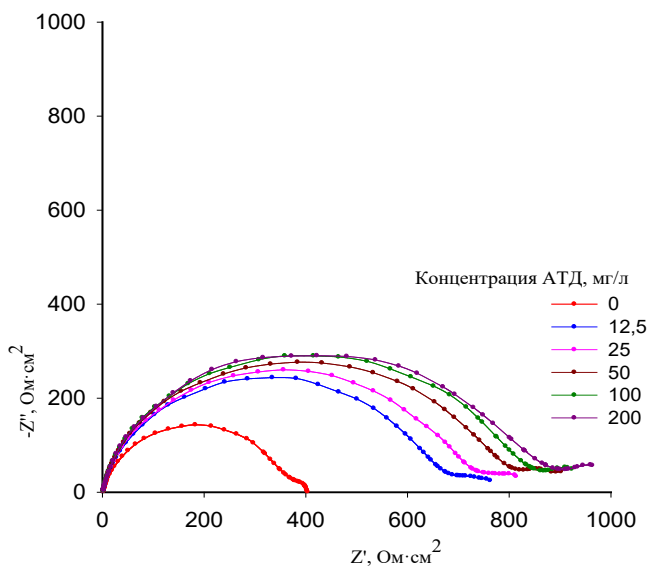


Рис. 8. Диаграммы Найквиста СтЗ в 0,5 М растворе серной кислоты в присутствии АТД

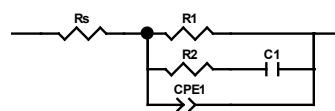


Рис. 9. Эквивалентная электрическая схема для описания коррозионных процессов в кислых средах

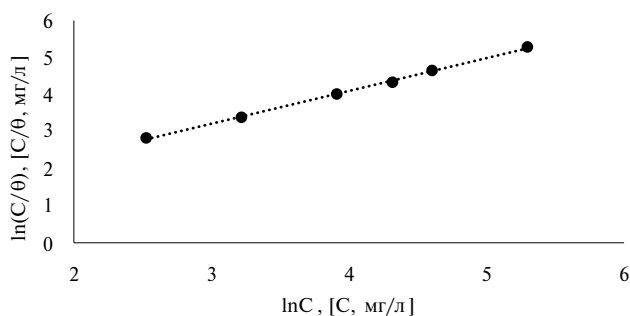


Рис. 10. Линеаризация данных адсорбции АТД в координатах модели Редлиха–Петерсона

После расчета степени заполнения поверхности СтЗ молекулами АТД был проведен анализ данных на соответствие моделям адсорбции, результаты приведены в табл. 5. В соответствии с величинами R^2 , процесс адсорбции АТД наилучшим образом описывается моделью Редлиха–Петерсона, описывающую образование монослоя на энергетически неоднородной поверхности (рис. 10).

Таблица 5. Параметры моделей адсорбции

Модели	Уравнение	Параметры		
Фрейндлих	$\ln \theta = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C$	K_F	n	R^2
Ленгмюр	$\frac{C}{\theta} = \frac{\theta_{max}}{K} + \frac{1}{\theta_{max}} C$	$1/\theta_{max}$	b, мг/л	R^2
Редлих–Петерсон	$\ln \frac{C}{\theta} = \ln K + g \ln C$	g	K, мг/л	R^2
		0,4914	6,579	0,9195
		0,9597	0.168	0,9990
		0,885	1,750	0,9986

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексное исследование адсорбции АТД показало, что данное вещество изменяет состояние поверхности малоуглеродистой стали в 0,5 М растворе H_2SO_4 путем формирования гидрофобной пленки. В результате происходит снижение СЭП, что ослабляет коррозионное взаимодействие сталь-кислота. При увеличении температуры происходит формирование химических связей АТД с поверхностью Ст3, на что указывают значения энергии активации коррозионного процесса. Основываясь на данных электрохимических измерений установлено, что АТД преимущественно ингибирует катодную парциальную реакцию, а его адсорбция протекает в соответствии с моделью Редлиха-Петерсона. Заполнение близкое к монослойному достигается в диапазоне концентраций 50–100 мг/л, что обеспечивает защитный эффект, превышающий 80%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Finšgar M., Jackson J.* // Cor. Sci. 2014. Т. 86. С. 17–41.
2. *Hong L.V., Mahmud H.B.* // J. Petrol. Explor. Prod. Technol. 2019. V. 9. P. 753.
3. *Глуценко В.Н., Силин М.А.* // Нефтепромысловая химия. 2010. Т. 4. С. 703.
4. *Guo B., Liu X., Tan X.* // Gulf. Prof. Publ. 2nd Ed. 2017. P. 367–387.
5. *Hong L.V., Mahmud H.B.* / In IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng. 2017. V. 217.
6. *Shafiq M.U., Mahmud H.B.* // J. Petrol. Explor. Prod. Technol. 2017. V. 7. P. 1205.
7. *Rögener F., Lednova Yu. A., Andrianova M.Yu., Lednov A.V.* // Вестн. МГТУ им. Г. И. Носова. 2019. Т. 17. № 2. С. 38.
8. *Agrawal A., Sahu K.K.* // J. Hazard. Mater. 2009. V. 171. P. 61.
9. *Obot I.B., Meroufel A., Onyeachu I.B. et al.* // Mol. Liq. 2019. V. 296. 111760.
10. *Kamal M.S., Hussein I., Mahmoud M et al.* // J. Petrol. Explor. Prod. Technol. 2018. V. 171. P. 127.
11. *Dohare P. et al.* // Results in Phys. 2019. Т. 13. С. 102344.
12. *Haque J. et al.* // J. of Indust. & Engin. Chem. 2017. Т. 49. С. 176–188.
13. *Yoo S. H. et al.* // Indust. & Engin. Chem. Res. 2013. Т. 52. №. 32. С. 10880–10889.
14. *Abdallah M. et al.* // J. of Molecular Liq. 2016. Т. 216. С. 590–597.
15. *Chauhan D. S. et al.* // J. of Molecular Liq. 2019. Т. 289. С. 111113.
16. *Suhasaria A. et al.* // J. of Molecular Liq. 2020. Т. 313. С. 113537.
17. *Qiang Y., Li H., Lan X.* // J. of Materials Sci. & Tech. 2020. Т. 52. С. 63–71.
18. *Zhang R. et al.* // Org. letters. 2017. Т. 19. № 20. С. 5629–5632.
19. *Lebrini M. et al.* // Applied Surface Sci. 2007. Т. 253. №. 23. С. 9267–9276.
20. *Авдеев Я. Г., Кузнецов Ю. И.* // Rus. J. of Phys. Chem. A. 2023. Т. 97. №. 4. С. 459–468.
21. *Авдеев Я. Г., Кузнецов Ю. И.* // Успехи химии. 2012. Т. 81. №. 12. С. 1133–1145.
22. *Yousef T. A. et al.* // J. of Molec. Struct. 2023. Т. 1275. С. 134603.
23. *Popova A. et al.* // Cor. Sci. 2003. Т. 45. № 1. С. 33–58.
24. *Popova A. et al.* // Cor. sci. 2004. Т. 46. № 6. С. 1333–1350.
25. *Popova A., Christov M., Zwetanova A.* // Cor. Sci. 2007. Т. 49. №. 5. С. 2131–2143.
26. *Zhang X. et al.* // ACS omega. 2022. Т. 7. № 36. С. 32208–32224.
27. *Abd-El-Nabey B. A. et al.* // Indust. & Engin. Chem. Res. 2024.
28. *Zobeidi A. et al.* // ACS omega. 2023. Т. 8. № 24. С. 21571–21584.
29. *Chen X., Wang P., Zhang D.* // ACS applied materials & interfaces. 2019. Т. 11. № 41. С. 38276–38284.
30. *Huang Y. et al.* // J. Langmuir. 2023. Т. 39. № 17. С. 6018–6028.
31. *Behera S. K. et al.* // J. Langmuir. 2019. Т. 35. № 49. С. 16120–16129.
32. *Kozbial A. et al.* // J. Langmuir. 2014. Т. 30. № 28. С. 8598–8606.
33. *Plotnikova M. D. et al.* // Eurasian J. of Chem. 2023. Т. 28. № 4. 112.
34. *Brug J., van den Eeden A.L. G., Sluyters-Rehbach M., Sluyters J.H.* // J. Electroanal. Chem. 1984. V. 176. P. 275–295.
35. *Faisal M., Saeed A., Shahzad D., Abbas N., Ali Larik F., Ali Channar P., Abdul Fattah T., Muhammad Khan D. & Aaliya Shehzadi S.* // Cor. Reviews. 2018. V. 36. № 6. P. 507–545.