

## ИНГИБИТОРЫ КОРРОЗИИ НА ОСНОВЕ ЯНТАРНОЙ КИСЛОТЫ И ЕЕ ПРОИЗВОДНЫХ

© Исаев Ниджат Закария оглу (а), Гусейнова Лала Ниязи гызы (b)

- (a) Лаборатория «Синтетические смазочные масла» Института Нефтехимических процессов Министерства Науки и Образования Азербайджана, докторант,  
[isayevnicat998@gmail.com](mailto:isayevnicat998@gmail.com), Баку
- (b) Лаборатория «Синтетические смазочные масла» Института Нефтехимических процессов Министерства Науки и Образования Азербайджана, старший специалист, Баку

**Аннотация.** В представленной работе показаны результаты исследований в области применения янтарной кислоты и ее функционально-замещенных производных (солей, эфиров, амидов и др.) в качестве ингибиторов стали, металлов и их сплавов. Показаны влияние среды, температуры, химических модификаторов на протекание коррозии в присутствии производных янтарной кислоты. Приведены основные физико-химические методы исследования процесса коррозии и механизм ингибирования в присутствии производных янтарной кислоты. Также показаны результаты собственных исследований авторов работы.

**Ключевые слова:** янтарная кислота, сукцинаты, ингибиторы коррозии, электрохимический импеданс, потенциодинамическая поляризация, сканирующая электронная спектроскопия, изотерма Ленгмюра.

## CORROSION INHIBITORS BASED ON SUCCINIC ACID AND ITS DERIVATIVES

© Isayev Nidjat Zakariyya (a), Huseynova Lala Niyazi (b)

- (a) Doctoral student of the laboratory “Synthetic lubricating oils” of the Institute of Petrochemical Processes of the Ministry of Science and Education of Azerbaijan [isayevnicat998@gmail.com](mailto:isayevnicat998@gmail.com), Baku
- (b) Senior specialist of laboratory «Synthetic lubricants» Institute of Petrochemical Processes of the Ministry of Sciences and Education of Azerbaijan, Baku

**Abstract.** The presented work shows the results of research in the field of use of succinic acid and its functionally substituted derivatives (salts, esters, amides, etc.) as inhibitors of steel, metals and their alloys. The influence of the environment, temperature, and chemical modifiers on the occurrence of corrosion in the presence of succinic acid derivatives is shown. The main physicochemical methods for studying the corrosion process and the mechanism of inhibition in the presence of succinic acid derivatives are presented. The results of the authors’ own research are also shown.

**Key words:** succinic acid, succinates, corrosion inhibitors, electrochemical impedance, potentiodynamic polarization, scanning electron spectroscopy, Langmuir isotherm.

Янтарная кислота и ее функционализированные производные (соли, эфиры, амиды и др. производные) находят широкое применение в качестве ингибиторов коррозии стали, различных металлов и их сплавов. В этой работе нами рассмотрены основные результаты исследований в области применения янтарной кислоты и ее производных в качестве ингибиторов коррозии.

Так, целью работы [1] является получение двух производных сукцинимидов, а именно; [N<sup>1</sup>,N<sup>4</sup>-бис ((2-гидроксиэтил) карбамотиоил) сукцинимид (I) и N<sup>1</sup>,N<sup>4</sup>-бис (бис (2-гидроксиэтил)карбамотиоил)сукцинимид (II)] и подтверждение их химической структуры методом FTIR, масс- и <sup>1</sup>H-ЯМР-спектроскопии. Антикоррозионные свойства приготовленных составов проверялись с использованием электрохимических методов, а антинакипные свойства оценивались с использованием стандартного метода испытаний NACE (T1A0374-90). Метод потенциодинамической поляризации (PDP) показал, что два производных сукцинимидов действуют как ингибиторы смешанного типа. Исследованные производные сукцинимидов подчиняются изотерме адсорбции Ленгмюра. Максимальная эффективность соединения (II) достигла 93,1% в качестве антикоррозионного и 91,5% в качестве антинакипного ингибитора. Результаты показали, что эффективность ингибирования отложений повышается при увеличении доз этих производных сукцинимидов. Кроме того, экспериментальные данные были подтверждены теоретическими расчетами.

Методами потенциодинамической поляризации, электрохимической импедансной спектроскопии, потери веса и оптического микроскопического анализа исследовано ингибирующее действие янтарной кислоты на коррозионную стойкость мягкой стали в сернокислых растворах [2]. Результаты показывают, что янтарная кислота действует: (i) слегка смещая потенциал коррозии в сторону менее отрицательных значений; (ii) уменьшение как анодного растворения мягкой стали, так и реакции выделения водорода. Эффективность ингибирования до 80% была зафиксирована для растворов с pH=2 и 3, тогда как для растворов с pH>4 эффекта не наблюдалось. Результаты были поняты с учетом состава раствора в зависимости от pH.

В патенте [3] показано, что в качестве ингибиторов коррозии в водных системах используются соли алканоламинов, в частности этаноламинные соли полуамидов алкенилянтарной кислоты, в которых алкенильный радикал содержит от 6 до 18 атомов углерода.

Ингибирующие свойства сукцината натрия (Na<sub>2</sub>C<sub>4</sub>H<sub>4</sub>O<sub>4</sub>) оценивали в качестве органического, экологически безопасного ингибитора коррозии арматурных стержней из углеродистой стали в 0,6 М Cl<sup>-</sup> растворе, моделирующем поры бетона [4]. Измерения потенциодинамической поляризации (PDP) и электрохимической импедансной спектроскопии (EIS) использовались для оценки эффективности ингибитора при различных температурах и концентрациях. Исследуемый ингибитор коррозии показал высокую эффективность ингибирования коррозии, поскольку он адсорбируется на поверхности арматуры, создавая защитную адсорбционную пленку. Согласно PDP, ингибитор классифицируется как ингибитор смешанного типа с эффективностью ингибитора 77, 69, 59 и 54% для 25, 35, 45 и 55°C соответственно. EIS подтвердил результаты тестов PDP, показав, что сукцинат натрия вытесняет

молекулы воды на границе раздела, создавая адсорбционную пленку за счет комплексообразования с ионами двухвалентного железа. Была рассчитана толщина пленки, и сукцинат натрия смог создать более толстую защитную пленку (диапазон нанометров) по сравнению с эталоном при каждой температуре. Адсорбция сукцината натрия соответствует изотерме адсорбции Темкина. Было обнаружено, что  $\Delta G^0_{ad}$  составляет  $-32,75$  кДж/моль, что указывает на то, что адсорбция ингибитора представляет собой комбинированный процесс физической адсорбции и хемосорбции. Для обоснования адсорбции сукцината натрия были использованы различные характеристики поверхности, в том числе сканирующая электронная микроскопия, энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия и микроรามановская спектроскопия. Наконец, квантово-химические расчеты показали, что делокализованные электроны карбоксильной группы обладают высокими энергиями ВЗМО и электростатическим потенциалом, что способствует адсорбции ингибитора коррозии сукцината натрия на поверхность арматуры из углеродистой стали.

Механизм ингибирования коррозии мягких сталей в аэрированной водной среде 3% NaCl изучали с использованием полиэпоксидно-янтарной кислоты (ПЭСА) в качестве зеленого ингибитора [5]. В исследовании использовались электрохимические, термодинамические и методы поверхностной микроскопии. Вычислительные методы подтвердили эмпирические результаты механизма ингибирования на молекулярном уровне. Результаты показали, что эффективность ингибирования PESA превышает 60% при концентрации 2 г/л при 25°C за счет образования защитного слоя на поверхности мягкой стали. Добавление 2 мг/л катионов цинка к 2 г/л PESA при 25°C повышало эффективность ингибирования, достигая 90%. Сканирование СЭМ и АСМ выявило эффективное покрытие адсорбированного слоя на поверхности мягкой стали. Квантово-химические расчеты и моделирование методом Монте-Карло позволили получить механистическое представление о местах реакционной способности и силе адсорбции PESA на металлической поверхности.

Азотные производные на основе гексенилянтарной кислоты и амина были синтезированы в работе [6] и изучены их физико-химические свойства. Консервационные жидкости на основе минерального масла Т-30 и амидного эфира, синтезированного этерификацией азотсодержащего производного гексенилянтарной кислоты с циклогексанолом. Были приготовлены и испытаны в различных агрессивных средах в качестве ингибитора.

Ингибирование коррозии сплава L80 в растворе гидроксида натрия (pH=12) янтарной кислотой оценивалось с помощью электрохимических исследований, таких как спектры поляризации и импеданса переменного тока [7]. Исследование показало, что янтарная кислота способна контролировать коррозию сплава L80 в растворе NaOH (pH = 12). При погружении сплава L80 в раствор NaOH сопротивление линейной поляризации (LPR) увеличивается, а ток коррозии (I корр) уменьшается, как показало исследование потенциодинамической поляризации. Янтарная кислота при pH=12 действует как ингибитор анодного типа. Когда сплав L80 погружается в раствор NaOH, сопротивление переносу заряда (R t) увеличивается, импеданс увеличивается, фазовый угол увеличивается, а значение емкости двойного слоя (C dl) уменьшается. Эти результаты позволяют предположить, что на поверхности металла образуется защитная пленка, которая, вероятно, состоит из комплекса  $Fe^{2+}$ -ингибитор (сукцинат железа).

В патенте [8] предложены способы ингибирования коррозии в установке для перегонки бензола или в сушильной установке, в которых алкенилянтарные кислоты или ангидриды (АСК) приводят в контакт с металлическими поверхностями, тем самым защищая металл от кислой коррозионной среды, протекающей через головной погон. Дистилляционная колонна или сушильная колонна бензола может быть использована для очистки бензола для последующей подачи очищенного бензола в процесс алкилирования, например, при алкилировании бензола этином с образованием этилбензола с использованием цеолитного катализатора алкилирования.

В работе [9] модифицированная тиомочевинной полиэпоксиянтарная кислота (CNS-PESA) была синтезирована и использована в качестве ингибитора коррозии и накипи в системе оборотной охлаждающей воды завода. Полиэпоксиянтарная кислота (PESA) широко используется в промышленной очистке воды благодаря своим хорошим характеристикам ингибирования коррозии и образования отложений. Она также действует как надежный материал для диспергирования оксида железа, имеет хорошую эффективность биоразложения и не содержит фосфора. Были изучены эффективность ингибирования отложений карбоната и фосфата кальция с эффективностью ингибирования коррозии при использовании различных концентраций ингибитора, температуры, pH и концентрации ионов кальция в зависимости от эффективности ингибирования отложений. Был использован анализ с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) окарины и коррозии углеродистой стали двумя методами: GB/T 18175-2000 «Измерение содержания ингибиторов при очистке воды: метод ротационного купона» и электрохимический метод для CNS-PESA и PESA. По сравнению с использованием CNS-PESA и PESA для карбоната и фосфата кальция степень ингибирования отложений увеличилась на 6% и 18,7%, а степень ингибирования коррозии увеличилась на 22,4%. Эффективность ингибирования отложений CNS-PESA является наилучшей, когда концентрация ионов кальция меньше или равна 350 мг/л. Кроме того, полиэпоксиянтарная кислота, модифицированная тиомочевинной (CNS-PESA), не содержит фосфора и является ингибитором коррозии и накипи, а также сводит к минимуму проблемы загрязнения окружающей среды.

Производное полиэпоксиянтарной кислоты было синтезировано из L-цистеина и полиэпоксиянтарной кислоты, полимера конденсации, образованного путем циклизации и полимеризации с малеиновым ангидридом [10]. Строение производного полиэпоксиянтарной кислоты охарактеризовано методами FTIR и  $^{13}\text{C}$  ЯМР. Были изучены характеристики ингибирования отложений и коррозии производного полиэпоксиянтарной кислоты. Механизмы ингибирования отложений и коррозии были проанализированы с помощью SEM. Степень ингибирования накипи производного полиэпоксиянтарной кислоты может достигать 98,9 % при концентрации  $\text{Ca}^{2+}$  400 мг/л,  $\text{HCO}_3^-$  800 мг/л, производного полиэпоксиянтарной кислоты 8 мг/л. Производное полиэпоксиянтарной кислоты лучше, чем полиэпоксиянтарная кислота, по эффективности ингибирования коррозии, а степень ингибирования коррозии может достигать 65,14% при 40°C в динамическом эксперименте. СЭМ показал, что кристаллическая решетка карбоната кальция была полностью искажена от кальцита до ватерита при использовании производного полиэпоксиянтарной кислоты. Поверхность образца при погружении в раствор производного полиэпоксиянтарной кислоты имеет плотный слой защитной адсорбционной пленки.

В работе [11] рассмотрены недавние экспериментальные исследования полиэпоксиянтарной кислоты и ее производных в качестве средств очистки воды, а также кратко обобщены результаты синтеза и модификации полиэпоксиянтарной кислоты и ее производных как ингибиторов солеотложений. На основании этого, в сочетании с историей модификаций полиэпоксиянтарной кислоты, авторы излагают свои взгляды на оптимизацию ее характеристик и фокусируются на объяснении ингибиторов отложения полиэпоксиянтарной кислоты в процессе синтеза. Производительность агентов масштабирования. Наконец, в основе концепции зеленой химии выдвигаются некоторые проблемы, с которыми полиэпоксиянтарная кислота и ее производные столкнутся в будущем при получении и исследованиях, что дает представление об изменениях молекулярной структуры и введении функциональных групп в последующие производные. исследовать.

Ингибирование коррозии никеля в 0,5 М растворе серной кислоты 2-(трифенилфосфоранилиден)янтарным ангидридом (2TPSA), 1,4,8,11-тетраазоциклотетрадеканом (цикламом) и N,N'-бис(2-аминоэтил)-1,3-пропандиамином (2,3,2 тет.) исследован методом поляризации постоянного тока. Анодные поляризационные кривые никеля в 0,5 М H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> при различных концентрациях трех ингибиторов снимали при комнатной температуре. Значения критической плотности тока использовали для расчета процентного ингибирования для каждой концентрации ингибитора. Результаты сравнивались с подгонками, полученными с применением изотерм Ленгмюра, Фрумкина, Флори Хаггинса, а также с применением кинетико-термодинамической модели. Полученные результаты коррелировали с химической структурой и макроциклическим действием ингибиторов [12].

В патенте [13] показана возможность для использования алкил- или алкенилянтарных кислот для ингибирования коррозии металлов в кислородсодержащих топливных системах.

Сообщается [14], что стальная инфраструктура постоянно подвергается коррозионному воздействию в большинстве экологических и промышленных условий. Продолжается поиск экологически чистых, высокоэффективных соединений-ингибиторов, которые могут обеспечить защитное действие в самых разных ситуациях: от морской среды до нефте- и газопроводов. Ингибирование коррозии трансмиссионной стали в ячейке 1М HCl в присутствии янтарной кислоты при температурах (20,30,40,50 и 60)°С в концентрациях в диапазоне (10<sup>-6</sup>-10<sup>-4</sup>)М в течение двух часов с использованием метода потери веса (WLM). Результаты показали, что эффективность ингибирования увеличивается с увеличением концентрации ингибитора и с повышением температуры до 60°С. Активационную значимость скорости коррозии рассчитывали, как энергию активации E<sub>a</sub>, изменение энтропии активации ΔH и изменение энтропии активации ΔS. К параметрам активации процесса коррозии относятся энергии активации (E<sub>a</sub>), энтальпии активации (ΔH) и энтропии активации (ΔS). Результаты также показали, что адсорбция ингибитора подчиняется закону Ленгмюра, а максимальная эффективность достигает примерно 97% при 60°С в концентрации ингибитора 10<sup>-4</sup>М.

Влияние янтарной кислоты (ЯК) на ингибирование коррозии электрода из низкоуглеродистой стали (ЛКС) исследовали в аэрированных неперемешиваемых 1,0 М растворах HCl в диапазоне pH (2-8) при 25°С [15]. Методами потери массы, потенциодинамической поляризации и электрохимической импедансной спектроскопии (ЭИС) исследовано коррозионное поведение металлов в отсутствие и в присутствии различных концентраций

ЯК под влиянием различных условий эксперимента. Также были установлены измерения потенциала разомкнутой цепи (ОСР) в зависимости от времени до достижения установившегося потенциала (Est). Анализ поверхности с использованием энергодисперсионного рентгеновского излучения (EDX) и сканирующего электронного микроскопа (SEM) позволил нам уточнить механические аспекты и оценить относительную эффективность ингибирования. Полученные результаты показали, что СК является хорошим «зеленым» ингибитором ЛКС в растворах HCl. Поляризационные кривые показали, что ЯК ведет себя преимущественно как ингибитор анодного типа. Наблюдения поверхности электрода с помощью EDX и SEM подтвердили наличие защитной адсорбированной пленки ингибитора на поверхности электрода. Эффективность ингибирования возрастает с увеличением концентрации ЯК, pH раствора и времени погружения. Максимальная эффективность ингибирования (~97,5%) достигается при концентрации ЯК >0,01 М при pH 8. Изучено влияние концентрации ЯК и pH на потенциал нулевого заряда (ПЗЗ) LCS-электрода в 1,0 М растворах HCl и обсуждается механизм адсорбции. Результаты, полученные при измерениях потери веса, поляризации и импеданса, находятся в хорошем согласии.

Синтезированы три неионогенных ПАВ Gemini на основе янтарной кислоты [16]. Структуру синтезированных ПАВ охарактеризовали с помощью спектров ИК-Фурье и ЯМР  $^1\text{H}$ . Определены некоторые физические свойства, такие как поверхностное натяжение, критическая концентрация мицеллообразования (ККМ), поверхностное давление (эффективность), максимальная поверхностная избыточная концентрация ( $\Gamma_{\text{max}}$ ) и минимальная площадь поверхности, занимаемая одной молекулой ( $A_{\text{min}}$ ). Ингибирующая способность поверхностно-активных веществ в отношении кислотной коррозии углеродистой стали была получена с использованием методов снижения веса и электрохимических методов. Морфологию поверхности углеродистой стали исследовали с помощью атомно-силового микроскопа. Установлено, что все три ПАВ действуют как хорошие ингибиторы коррозии стали в кислой среде. Эффективность ингибирования возрастает с увеличением концентрации ПАВ и времени воздействия. Ингибирующее действие было объяснено адсорбцией молекул ПАВ на поверхности стали. Установлено, что процесс адсорбции является самопроизвольным и подчиняется изотерме адсорбции Ленгмюра. На основании полученных результатов предложен механизм ингибирующего действия.

В работе [17] синтезирован N-октиламид янтарной кислоты и использован в качестве ингибитора антикоррозионных покрытий. Покрытие можно наносить распылением, кистью или погружением в предварительном порядке для дальнейшей обработки или покраски. В этом исследовании растворы для покрытия были приготовлены путем растворения различных количеств ингибитора в диапазоне 3-5 мас.% в изопропанол. Углеродистая сталь 1020 и медь подвергались воздействию уксусной кислоты, содержащейся в окружающей среде при относительной влажности 25,95% для испытаний на коррозию. Результаты экспериментов показывают, что эффективность защиты стали с покрытием аналогична эффективности защиты образца, обработанного WD-40. Кроме того, характеристики вышеупомянутого покрытия можно улучшить, добавив немного дизельное топливо или спирты. Наилучшая защита покрытий от коррозии в присутствии синтезированного амида была получена при добавлении *n*-децилового спирта, как показало исследование с помощью СЭМ.

Показано [18], что использование экологически чистых ингибиторов коррозии считается одним из наиболее эффективных и экономичных методов предотвращения деградации и разрушения металлов. Целью данного исследования является объединение свойств «зелености» и дополнительных свойств полиэпоксиянтарной кислоты (PESA) и полиакриламида (ПАМ) для ингибирования коррозии стали. В ходе этого исследования впервые был синтезирован новый ПАМ с привитым PESA (PESAPAM) и использован в качестве ингибитора коррозии углеродистой стали в 1,0 М растворе HCl. Прогноз экотоксичности подтвердил экологически чистые свойства синтезированного ингибитора. Были проведены электрохимические, кинетические и поверхностные микроскопические исследования, чтобы получить целостное представление о коррозионном поведении углеродистой стали с помощью PESA-ПАМ. Кроме того, эффективность PESA-ПАМ сравнивалась с эффективностью чистого PESA в тех же условиях испытаний. Результаты выявили преобладающие ингибирующие свойства PESA-ПАМ с эффективностью ингибирования (IE), достигающей 90% при 500 мг/л при 25 °С. Внедрение ПАМ в цепочку PESA показало общее улучшение производительности на 109% с IE% с 43 до 90%. Электрохимические измерения выявили механизм коррозии, контролируемый переносом заряда, и образование толстого двойного слоя на поверхности стали. Потенциодинамическое исследование классифицировало PESA-ПАМ как ингибитор смешанного типа. Кроме того, исследование кинетики коррозии стали С в присутствии PESA-ПАМ предсказало энергию активации  $85 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$ , что коррелирует с поведением физической адсорбции. Наконец, проведенная сканирующая электронная микроскопия и энергодисперсионный рентгеновский анализ подтвердили адсорбцию PESA и PESA-ПАМ с превосходным покрытием PESA-ПАМ на поверхности стали.

В работе [19] янтарная кислота была оценена как ингибитор коррозии углеродистой стали в попутной воде сырой нефти с использованием методов потенциодинамической поляризации, электрохимической импедансной спектроскопии (EIS) и FTIR. Результаты показали, что эффективность ингибирования увеличивается с увеличением концентрации янтарной кислоты, но снижается с повышением температуры. Наилучшая эффективность ингибирования была получена при добавлении 50 ppm янтарной кислоты при pH 3. Значения эффективности ингибирования, полученные с помощью поляризации и EIS, находятся в достаточно хорошем согласии. Была рассчитана и обсуждена энергия активации, а также другие термодинамические параметры процесса ингибирования. Поляризационные кривые показали, что янтарная кислота действует как ингибитор смешанного типа. Ингибирование коррозии объясняется физической адсорбцией янтарной кислоты на поверхности углеродистой стали. Адсорбция янтарной кислоты подчиняется изотерме Темкина с отрицательными значениями свободной энергии адсорбции. Адсорбция янтарной кислоты на поверхности электрода происходила быстро и завершалась за 30 мин.

В работе [20] аминокислота (АК) использована в качестве зеленого прививочного агента для функционализации полиэпоксиянтарной кислоты (ПЭСА), а также получены три АК-модифицированных ПЕСА (AA-PESA) ингибитора отложений  $\text{CaCO}_3$  для изменения структурной единичности ПЕСА и дальнейшего улучшения его комплексных свойств. Структуры АК-ПЕСА были охарактеризованы методами инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье (FTIR) и спектроскопии ядерного магнитного резонанса водорода ( $^1\text{H-NMR}$ ). Молекулярные массы АК-ПЕСА анализировали с помощью гель-проникающей

хроматографии (ГПХ). Технология синтеза АК-PESA была оптимизирована с помощью однофакторных и ортогональных экспериментов. Эффективность АК-PESA в ингибировании отложений  $\text{CaCO}_3$  исследовали с помощью статического метода ингибирования отложений и анализировали механизм ингибирования отложений. Результаты показали, что АК-PESA имели один и тот же процесс синтеза:  $n$  (PESA):  $n$  (AA) = 1:0,625, температура реакции  $95^\circ\text{C}$  и время реакции 2 часа. В водной системе с pH 7,0–8,5, концентрацией препарата 8–10 мг/л, периодом действия 10–14 ч, температурой окружающей среды  $<80^\circ\text{C}$  и  $\rho(\text{Ca}^{2+}) < 250$  мг/л. Скорость ингибирования трех AA-PESA на  $\text{CaCO}_3$  могла достигать 100%, и GIN был предпочтителен для привитой модификации PESA. Результаты FTIR, рентгеновской дифракции (XRD) и сканирующей электронной микроскопии (SEM) показали, что добавление АК-PESA может контролировать места зародышеобразования кристаллов  $\text{CaCO}_3$ , оказывает важное влияние на рост кристаллических плоскостей кальцита (104), и оказал хороший ингибирующий эффект на шкалу  $\text{CaCO}_3$ .

Исследована эффективность ингибирования коррозии алюминиевого сплава AA5754 малеиновой, яблочной, янтарной, винной, лимонной, трикарбаллиловой кислотами и серином в щелочной среде (pH 11) [21]. Отдельные ингибиторы коррозии характеризуются различным количеством и распределением карбонильных и гидроксильных групп в молекулах. Показана возможность применения янтарной кислоты в качестве ингибитора алюминиевого сплава.

В работе [22] образцы леденцов и плит контролировались на предмет коррозии с помощью методов линейной поляризации в течение 48 недельных циклов обработки раствором хлорида натрия и сушки. Арматурные стержни были сняты и осмотрены. Добавка солей алкенилзамещенной янтарной кислоты предотвращала коррозию неповрежденных образцов и значительно снижала коррозию в распиленных образцах по сравнению с бетоном с двумя коммерческими ингибиторами коррозии или без них.

Целью работы [23] является исследование влияния температуры ( $15\text{--}65^\circ\text{C}$ ) на эффективность янтарной кислоты (SA) в качестве ингибитора коррозии электрода из низкоуглеродистой стали (LCS) в азрированной неперемешиваемой среде 1,0 М. (растворы HCl (pH 4)). Методы потери веса, потенциодинамической поляризации и ЭИС (электрохимической импедансной спектроскопии) были применены для изучения коррозионного поведения металла в отсутствие и в присутствии различных концентраций ЯК в этом температурном диапазоне. Полученные результаты показали, что эффективность ингибирования снижается с повышением температуры, что указывает на физисорбцию ЯК на поверхности электрода. Энергии активации рассчитаны в отсутствие и в присутствии различных концентраций ЯК путем измерения температурной зависимости скорости коррозии, полученной тремя методами. Адсорбционное поведение ЯК на поверхности ЛКС подчиняется изотерме типа Темкина. Стандартные свободные энергии адсорбции ниже 40 кДж/моль, что подтверждает физисорбцию ЯК на поверхности электрода. Анализ поверхности с использованием EDX (энергодисперсионного рентгеновского излучения) подтвердил результаты, полученные в результате химических и электрохимических измерений. Все результаты, полученные с помощью использованных методов, находятся в разумном согласии.

Эффективность ингибирования (ИЭ) янтарной кислоты (СК) при борьбе с коррозией углеродистой стали в морской воде в отсутствие и наличие  $\text{Zn}^{2+}$  оценивали методом потери

веса [24,25]. Состав, состоящий из 250 ppm ЯК и 50 ppm  $Zn^{2+}$ , обладает 93% ИЕ. Установлено, что эффективность ингибирования (ИЭ) ЯК увеличивается при добавлении иона  $Zn^{2+}$ . Существует синергетический эффект между ЯК и  $Zn^{2+}$ . Поляризационные исследования показывают, что система ЯК –  $Zn^{2+}$  контролирует преимущественно катодную реакцию. FTIR. Спектры показывают, что защитная пленка состоит из комплекса  $Fe^{2+}$  – ЯК и  $Zn(OH)_2$ . Морфология поверхности защитной пленки на поверхности металла охарактеризовали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Подходящий механизм ингибирования коррозии предлагается на основе результатов вышеупомянутых исследований.

Эффективность ингибирования (ИЕ) янтарной кислоты (SA) в сочетании с  $Zn^{2+}$  и диэтиленetriаминпента (метиленфосфоновой кислотой) [DTPMP] коррозии алюминия в 0,01 М NaOH исследовали методом потери веса и электрохимическими методами [26]. Тройная система SA (240 ppm) –  $Zn^{2+}$  (20 ppm) – DTPMP (20 ppm) имеет ИЭ 98%. Значения ИЕ, рассчитанные на основе исследований электрохимической поляризации, хорошо согласуются со значениями, рассчитанными на основе исследований потери веса. Значения  $\Delta G$  были рассчитаны на основе значений покрытия поверхности. Также было изучено влияние температуры на ИЕ, на основании чего были рассчитаны  $E_a$  и  $\Delta H$ . Исследования морфологии поверхности проводились с использованием сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и атомно-силовой микроскопии (АСМ). Ингибиторы действуют как смешанные ингибиторы и подчиняются изотерме адсорбции Ленгмюра.

Широко известно, что магниевые сплавы, обладая превосходными свойствами биосовместимости и биоразлагаемости, обладают низкой коррозионной стойкостью, особенно в кислой среде. Частично защитный слой  $Mg(OH)_2$  играет важную роль в коррозионном поведении магния, а конверсионная пленка из фосфатов и фторидов повышает коррозионную стойкость магниевых сплавов [27]. Сравнительное исследование электрохимического коррозионного поведения Mg-5Zn в различных средах проведено в 1 %  $(NH_4)_3PO_4$  и 1 % NaF. Также было проанализировано влияние малоновой и янтарной кислоты на коррозионное поведение Mg-5Zn. Для характеристики микроструктуры сплавов Mg-5Zn использован режим сканирующей электронной микроскопии с обратным рассеянием электронов. Электрохимическая импедансная спектроскопия (ЭИС) и потенциодинамическая поляризационная кривая были использованы для изучения электрохимического коррозионного поведения Mg-5Zn. Установлено, что присутствие малоновой и янтарной кислот снижает сопротивление пленки и усиливает электронный перенос Mg-5Zn в 1%  $(NH_4)_3PO_4$  и 1% NaF. Более высокая скорость растворения Mg-5Zn наблюдалась в бинарной смеси 1% малоновой кислоты и 1% янтарной кислоты с 1%  $(NH_4)_3PO_4$  и 1% NaF по сравнению с Mg-5Zn в 1%  $(NH_4)_3PO_4$  и 1% NaF.

Ингибирование  $CO_2$  - коррозии мягкой стали в 0,5 М NaCl при атмосферном давлении при 40 °С, а также при высоком давлении (10 бар) при 120°С с помощью 2-[2-метил-4(или 5)-алкилизоксазолидина-5( или 4)-ил]метил]янтарных кислот, нового класса молекул, имеющих ингибирующие фрагменты янтарной кислоты, изоксазолидина и гидрофобной алкильной цепи, собранные в одно целое, исследованы гравиметрическими и электрохимическими методами. Молекула-ингибитор, содержащая  $CH_3(CH_2)_8$ , превзошла по эффективности аналог с более коротким гидрофобом  $CH_3(CH_2)_4$  и два других коммерческих ингибитора на основе имидазолина. Эффективность этих новых ингибиторов также оценивалась с по-

мощью электрохимической импедансной спектроскопии. Было обнаружено, что эффективность ингибирования с помощью EIS составляет 75%, 91% и 98% в присутствии 1, 5 и 20 ppm соответственно при 40 °С. Исследования потенциодинамической поляризации показали, что новые ингибиторы действуют как анодные ингибиторы. Адсорбция синтезированных ингибиторов соответствует модели изотермы адсорбции Темкина с благоприятными высокими значениями  $-\Delta G^\circ_{ad}$  и  $-\Delta H^\circ_{ads}$ , указывающими на то, что ингибиторы адсорбируются на поверхности металла в результате процесса хемосорбции. РФЭС-исследование подтвердило адсорбцию ингибиторов на поверхности металла.

Таким образом, результаты проведенных исследований, описанных в этой работе, позволяет сделать вывод о том, что функционально-замещенные производные янтарной кислоты обладают хорошими ингибиторными свойствами, что создает предпосылки для применения этих соединений в промышленных целях в качестве эффективных ингибиторов коррозии.

В наших исследованиях был осуществлен синтез гексенилянтарной кислоты на основе еновой реакции взаимодействия *n*-гексанола с малеиновым ангидридом с последующим получением азотсодержащих производных гексенилянтарной кислоты и исследованы их антикоррозионные свойства в некоторых агрессивных средах, в частности морской воде, гидрокамере и 0,001 %-ном растворе серной кислоты. Проведенные исследования показали оптимальные результаты, что создает предпосылки для возможной рекомендации синтезированных производных октенилянтарной кислоты в качестве ингибиторов коррозии.

В качестве модельного соединения использовали диэтиловый полуамид гексенилянтарной кислоты, синтез которого описан в предыдущей главе. Это соединение исследовали в качестве ингибиторов коррозии и изучали их влияние на коррозию стальных пластинок марки Сталь-3. Для этого были приготовлены 3, 5, 7, 10%-ные композиции эфирамида гексенилянтарной кислоты в нефтяном масле Т-30 по ГОСТ 9.054-75 и испытаны в качестве консервационных жидкостей. В качестве агрессивной среды были взяты гидрокамера «К-4», 0,001% раствор серной кислоты и морская вода при температуре 40°C и повышенной влажности (95%).

Оценка защитных свойств этих составов основана на визуальном наблюдении образования пятен первичной коррозии на стальных пластинах. Коррозионная способность амидоэфира, полученного этерификацией свободной гидроксильной группы *n*-гексильным спиртом изменяется в пределах 25-64 суток в зависимости от концентрации компонента в составе масла Т-30 и типа агрессивной среды.

Так, композиция, содержащая 5 % анализируемого соединения обеспечивает защиту стальных пластинок от коррозии в гидрокамере в течение 48 суток, в морской воде – 25 суток, а в растворе 0,001 %-ной серной кислоты – 27 суток. Сравнивая соответствующие показатели для масла Т-30 при отсутствии добавок (чистого масла) в этих же средах (35, 15 и 9 суток соответственно), можно заключить, что добавление анализируемого соединения способствует более длительной защите стали от коррозии.

Показано, что для композиции, содержащей 7 % *n*-гексильного эфира диэтиламида гексенилянтарной кислоты эти показатели соответственно составляют 55, 33 и 33 суток, а для композиции, содержащей 10 % анализируемого соединения защита стали от коррозии сохраняется в течение 64, 36 и 37 дней соответственно.

Результаты исследований показывают, что с увеличением содержания *n*-гексилового эфира диэтиламида гексенилянтарной кислоты длительность защиты стальной пластинки от коррозии агрессивных сред возрастает. Кроме того, можно сделать вывод, что добавление анализируемого вещества в состав масла Т-30 обеспечивает защиту стали от коррозии в агрессивных средах по сравнению с самим маслом без добавок.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1.Kamal R., Migahed M., Abd El-Sattar E.A. Synthesis, characterization and performance of succinimide derivatives as anti-corrosion and anti-scalant in petroleum applications // *Journal of Molecular Liquids*. 2022. Vol. 354. N 5. Pp. 118869-118874
- 2.Giacomelli F.C., Amadori M.F., Fernando C.G. Inhibitor effect of succinic acid on the corrosion resistance of mild steel: Electrochemical, gravimetric and optical microscopic studies // *Materials Chemistry and Physics*. 2004. Vol. 83. N 1. Pp. 124-128
- 3.Pat. 3300874A1. DE. 1983 Succinic acid derivatives as corrosion protection agents / Geke Y., Upadek H.
- 4.Mohamed A., Visco D., Bastidas D. Sodium Succinate as a Corrosion Inhibitor for Carbon Steel Rebars in Simulated Concrete Pore Solution // *Molecules*. 2022. Vol. 27. N 24. Pp. 8776-8782
- 5.Zeino A., Abdulazeez I., Khaled M. Mechanistic study of polyepoxy succinic acid (PESA) as green corrosion inhibitor on carbon steel in aerated NaCl Solution // *Materials Today Communications*. 2021. Vol. 29. N 12. Pp. 102848-102854
- 6.Mammadyarov M.A., Abbasov V.A., Aliyeva F.Kh., Isayev N.Z. Synthesis the esters of monodiethylamide of hexenylsuccinic acid and their investigation as inhibitor of corrosion // *PPOR*. 2018. Vol. 19. N 1. Pp. 116-124
- 7.Sowmiya R., Kumar S., Raja S. Inhibition of corrosion of L 80 alloy in sodium hydroxide solution (pH=12) by succinic acid // *Zastita materijala*. 2023. Vol. 64. N 1. Pp. 78-85
- 8.Pat. 2014084828A1. WO. 2014. Alkenyl succinic acids or anhydrides as corrosion inhibitors for metal surfaces / Link J.
- 9.Defang T., Zeng T. Study on the Corrosion and Scale Inhibition Mechanism of the Thiourea-Modified Polyepoxysuccinic Acid (CNS-PESA) // *Journal of Chemistry*. 2022. N 1. Pp. 297-304
- 10.Xinhua L., Wang W., Tong X. Study of Corrosion and Scale Inhibition of Polyepoxy-succinic Acid Derivative // *Asian Journal of Chemistry*. 2022. Vol. 26. N 22. Pp. 313-319
- 11.Manxi L., Xingyu L., Wang X. Study on Synthesis and Modification of Polyepoxy-succinic Acid // *Frontiers in Educational Research*. 2020. Vol. 3. N 6. Pp. 30-33
- 12.Mahgoub F.M., Abd El-Nabey B.A., Khalifa M. Acid Corrosion Inhibition of Nickel by Some Organic/Macrocyclic Compounds // *Chapter in Book Science and Technology of Polymers and Advanced Materials*. 1998. Pp. 175-184
- 13.Pat. 5080686A. US. 1982. Alkyl or alkenyl succinic acids as corrosion inhibitors for oxygenated fuels / Garrecht R., Knepper I., Dear G.
- 14.Dhaye A., Mohamed R., Al-Alawy J. Chemical Inhibition for Steel Corrosion in Succinic acid at Different Temperature // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Volume 1094. 1st International Conference on Sustainable Engineering and Technology. 15th-16th December. 2020. Baghdad. Iraq. Pp. 14-18

15. Amin M., El-Rehim S., El-Sherbini F. The inhibition of low carbon steel corrosion in hydrochloric acid solutions by succinic acid. Part I. Weight loss, polarization, EIS, PZC, EDX and SEM studies // *Electrochimica Acta*. 2007. Vol. 52. N 11. Pp. 3588-3600
16. El-Etre M., Abdelhamed S., Deef Allah M. Synthesis of Novel Gemini Surfactants Based on Succinic Acid and Their Application as Inhibitors for Carbon Steel Corrosion // *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*. 2020. Vol. 6. Pp. 127-136
17. Wu J., Lin C., Bor H. Evaluation of the Anti-corrosion Effect of a Succinic Acid Derivative as a Corrosion Inhibitor // *Journal of Chinese Corrosion Engineering*. 2004. Vol. 18. N 4. Pp. 385-392
18. Jalab R., Ben Ali A., Khaled M. Novel Polyepoxysuccinic Acid-Grafted Polyacrylamide as a Green Corrosion Inhibitor for Carbon Steel in Acidic Solution // *ACS Omega*. 2023. Vol. 8. N 19. Pp. 16673-16686
19. Deyab M.A., El-Rehim S.S. Effect of succinic acid on carbon steel corrosion in produced water of crude oil // *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2014. Vol. 45. N 3. Pp. 1065-1072
20. Zhao H., Yang Y., Changrui M. Synthesis and evaluation of amino acid modified polyepoxysuccinic as inhibitor of calcium carbonate scale // *Water Science and Technology. Water Supply*. 2022. Vol. 22. N 2. Pp. 8923-8941
21. Wysocka I., Cieslik M., Krakowiak S. Carboxylic acids as efficient corrosion inhibitors of aluminium alloys in alkaline media // *Electrochimica Acta*. 2018. Vol. 289. N 11. Pp. 175-192
22. Allyn M., Frantz G.C. Corrosion tests with concrete containing salts of alkenyl-substituted succinic acid // *ACI Materials Journal*. 2001. Vol. 98. N 3. Pp. 224-232
23. Mohammed A., Sayed S., Bayou R. Chemical and Electrochemical (AC and DC) Studies on the Corrosion Inhibition of Low Carbon Steel in 1.0 M HCl Solution by Succinic Acid - Temperature Effect, Activation Energies and Thermodynamics of Adsorption // *International Journal of Electrochemical Sciences*. 2008. Vol. 3. N 2. Pp. 199-215
24. Manivannan M.I., Rajendran S. Corrosion Inhibition of Carbon steel by Succinic acid – Zn<sup>2+</sup> system // *Research Journal of Chemical Sciences*. 2011. Vol. 1. N 8. Pp. 42-48
25. Selvarani F.R., Sauthamadarasi S., Sahavaraj W. Synergistic effect of succinic acid and Zn<sup>2+</sup> in controlling corrosion of carbon steel // *Bulletin of Electrochemistry*. 2004. Vol. 20. N 12. Pp. 561-565
26. Rajendran S., Thangaveju C., Annamalai G. Inhibition of corrosion of aluminium in alkaline medium by succinic acid in conjunction with zinc sulphate and diethylene triamine penta (Methylene phosphonic acid) // *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*. 2012. Vol. 4. N 11. Pp. 4836-4844
27. Thaba Y., Daraono N., Utomo M. The Effect of Malonic Acid and Succinic Acid on the Corrosion Behavior of Mg-5Zn in (NH<sub>4</sub>)<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> and NaF // *International Journal of Technology*. 2019. Vol. 10. N 8. Pp. 1576-1579
28. Shaikh A., Mazumder A., Nazal M. Assembly of succinic acid and isoxazolidine motifs in a single entity to mitigate CO<sub>2</sub> corrosion of mild steel in saline media // *Arabian Journal of Chemistry*. 2020. Vol. 13. N 1. Pp. 242-257

REFERENCES

1. Kamal R., Migahed M., Abd El-Sattar E.A. Synthesis, characterization and performance of succinimide derivatives as anti-corrosion and anti-scalant in petroleum applications // *Journal of Molecular Liquids*. 2022. Vol. 354. N 5. Pp. 118869-118874
2. Giacomelli F.C., Amadori M.F., Fernando C.G. Inhibitor effect of succinic acid on the corrosion resistance of mild steel: Electrochemical, gravimetric and optical microscopic studies // *Materials Chemistry and Physics*. 2004. Vol. 83. N 1. Pp. 124-128
3. Pat. 3300874A1. DE. 1983 Succinic acid derivatives as corrosion protection agents / Geke Y., Upadek H. /
4. Mohamed A., Visco D., Bastidas D. Sodium Succinate as a Corrosion Inhibitor for Carbon Steel Rebars in Simulated Concrete Pore Solution // *Molecules*. 2022. Vol. 27. N 24. Pp. 8776-8782
5. Zeino A., Abdulazeez I., Khaled M. Mechanistic study of polyepoxy succinic acid (PESA) as green corrosion inhibitor on carbon steel in aerated NaCl Solution // *Materials Today Communications*. 2021. Vol. 29. N 12. Pp. 102848-102854
6. Mammadyarov M.A., Abbasov V.A., Aliyeva F.Kh., Isayev N.Z. Synthesis the esters of monodiethylamide of hexenylsuccinic acid and their investigation as inhibitor of corrosion // *PPOR*. 2018. Vol. 19. N 1. Pp. 116-124
7. Sowmiya R., Kumar S., Raja S. Inhibition of corrosion of L 80 alloy in sodium hydroxide solution (pH=12) by succinic acid // *Zastita materijala*. 2023. Vol. 64. N 1. Pp. 78-85
8. Pat. 2014084828A1. WO. 2014. Alkenyl succinic acids or anhydrides as corrosion inhibitors for metal surfaces / Link J.
9. Defang T., Zeng T. Study on the Corrosion and Scale Inhibition Mechanism of the Thiourea-Modified Polyepoxysuccinic Acid (CNS-PESA) // *Journal of Chemistry*. 2022. N 1. Pp. 297-304
10. Xinhua L., Wang W., Tong X. Study of Corrosion and Scale Inhibition of Polyepoxy-succinic Acid Derivative // *Asian Journal of Chemistry*. 2022. Vol. 26. N 22. Pp. 313-319
11. Manxi L., Xingyu L., Wang X. Study on Synthesis and Modification of Polyepoxy-succinic Acid // *Frontiers in Educational Research*. 2020. Vol. 3. N 6. Pp. 30-33
12. Mahgoub F.M., Abd El-Nabey B.A., Khalifa M. Acid Corrosion Inhibition of Nickel by Some Organic/Macrocyclic Compounds // *Chapter in Book Science and Technology of Polymers and Advanced Materials*. 1998. Pp. 175-184
13. Pat, 5080686A. US. 1982. Alkyl or alkenyl succinic acids as corrosion inhibitors for oxygenated fuels / Garrecht R., Knepper I., Dear G. /
14. Dhayea A., Mohamed R., Al-Alawy J. Chemical Inhibition for Steel Corrosion in Succinic acid at Different Temperature // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Volume 1094. 1st International Conference on Sustainable Engineering and Technology. 15th-16th December. 2020. Baghdad. Iraq. Pp. 14-18
15. Amin M., El-Rehim S., El-Sherbini F. The inhibition of low carbon steel corrosion in hydrochloric acid solutions by succinic acid. Part I. Weight loss, polarization, EIS, PZC, EDX and SEM studies // *Electrochimica Acta*. 2007. Vol. 52. N 11. Pp. 3588-3600
16. El-Etre M., Abdelhamed S., Deef Allah M. Synthesis of Novel Gemini Surfactants Based on Succinic Acid and Their Application as Inhibitors for Carbon Steel Corrosion // *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*. 2020. Vol. 6. Pp. 127-136

17. Wu J., Lin C., Bor H. Evaluation of the Anti-corrosion Effect of a Succinic Acid Derivative as a Corrosion Inhibitor // *Journal of Chinese Corrosion Engineering*. 2004. Vol. 18. N 4. Pp. 385-392
18. Jalab R., Ben Ali A., Khaled M. Novel Polyepoxysuccinic Acid-Grafted Polyacrylamide as a Green Corrosion Inhibitor for Carbon Steel in Acidic Solution // *ACS Omega*. 2023. Vol. 8. N 19. Pp. 16673-16686
19. Deyab M.A., El-Rehim S.S. Effect of succinic acid on carbon steel corrosion in produced water of crude oil // *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2014. Vol. 45. N 3. Pp. 1065-1072
20. Zhao H., Yang Y., Changrui M. Synthesis and evaluation of amino acid modified polyepoxysuccinic as inhibitor of calcium carbonate scale // *Water Science and Technology. Water Supply*. 2022. Vol. 22. N 2. Pp. 8923-8941
21. Wysocka I., Cieslik M., Krakowiak S. Carboxylic acids as efficient corrosion inhibitors of aluminium alloys in alkaline media // *Electrochimica Acta*. 2018. Vol. 289. N 11. Pp. 175-192
22. Allyn M., Frantz G.C. Corrosion tests with concrete containing salts of alkenyl-substituted succinic acid // *ACI Materials Journal*. 2001. Vol. 98. N 3. Pp. 224-232
23. Mohammed A., Sayed S., Bayou R. Chemical and Electrochemical (AC and DC) Studies on the Corrosion Inhibition of Low Carbon Steel in 1.0 M HCl Solution by Succinic Acid - Temperature Effect, Activation Energies and Thermodynamics of Adsorption // *International Journal of Electrochemical Sciences*. 2008. Vol. 3. N 2. Pp. 199-215
24. Manivannan M.I., Rajendran S. Corrosion Inhibition of Carbon steel by Succinic acid – Zn<sup>2+</sup> system // *Research Journal of Chemical Sciences*. 2011. Vol. 1. N 8. Pp. 42-48
25. Selvarani F.R., Sauthamadarasi S., Sahavaraj W. Synergistic effect of succinic acid and Zn<sup>2+</sup> in controlling corrosion of carbon steel // *Bulletin of Electrochemistry*. 2004. Vol. 20. N 12. Pp. 561-565
26. Rajendran S., Thangaveju C., Annamalai G. Inhibition of corrosion of aluminium in alkaline medium by succinic acid in conjunction with zinc sulphate and diethylene triamine penta (Methylene phosphonic acid) // *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*. 2012. Vol. 4. N 11. Pp. 4836-4844
27. Thaba Y., Daraono N., Utomo M. The Effect of Malonic Acid and Succinic Acid on the Corrosion Behavior of Mg-5Zn in (NH<sub>4</sub>)<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> and NaF // *International Journal of Technology*. 2019. Vol. 10. N 8. Pp. 1576-1579
28. Shaikh A., Mazumder A., Nazal M. Assembly of succinic acid and isoxazolidine motifs in a single entity to mitigate CO<sub>2</sub> corrosion of mild steel in saline media // *Arabian Journal of Chemistry*. 2020. Vol. 13. N 1. Pp. 242-257