

УДК 620.193:541.13:543.25
DOI: 10.52531/1682-1696-2026-26-3-53-57

EDN: MJEVMC

Научная статья

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНГИБИТОРОВ КОРРОЗИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АНАЛИЗА КРИВЫХ ТАФЕЛЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЯХ ИНГИБИТОРА

Original article

Х.В. ВЕРЕС

РГУ нефти и газа (НИУ) имени
И.М. Губкина (Москва, Россия);
УНИВЕРСИТЕТ ДЫРЕ ДАВА ТЕХНОЛОГИЧЕ-
СКИЙ ИНСТИТУТ (ДЫРЕ ДАВА, ЭФИОПИЯ)

**ELECTROCHEMICAL EVALUATION OF
THE EFFECTIVENESS OF CORROSION
INHIBITORS USING TAFEL METHOD
ANALYSIS AT VARIOUS INHIBITOR
CONCENTRATIONS**

H.W. WERES

GUBKIN RUSSIAN STATE UNIVERSITY OF OIL
AND GAS (NATIONAL RESEARCH UNIVERSITY)
(MOSCOW, RUSSIA);
DIRE DAWA UNIVERSITY, INSTITUTE OF
TECHNOLOGY (DIRE DAWA, ETHIOPIA)

В данной статье анализируется электрохимическое коррозионное поведение трех образцов металла: нержавеющей стали, углеродистой стали и сварных соединений на углеродистой стали в кислой среде. Для анализа использовался потенциостат PARSTAT 4000+ с программным обеспечением VERSA STUDIO. Были исследованы два ингибитора: ингибитор А (Anticor-A), на основе нитрита натрия и ингибитор Б (Rutrol AC1201), на основе коллоидного углерода, в различных концентрациях, смешанных с различными концентрациями электролита (0.03, 0.1 и 0.15) г/мл лимонной кислоты ($C_6H_8O_7$); этот раствор демонстрирует кислую среду. Результаты показали, что скорость коррозии в значительной степени зависит от типа ингибитора, его концентрации и агрессивности электролита. В целом, исследование подчеркивает важную роль оптимизированного выбора ингибитора для эффективной защиты от коррозии в кислых условиях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ингибирование коррозии; поляризация Тафеля; электрохимическая оценка; электролит уксусной кислоты; электрохимическая реакция; скорость коррозии; кривая Тафеля; концентрация

This article analyzes the electrochemical corrosion behavior of three metal samples; stainless steel, carbon steel, and welded joints on carbon steel in acidic environment. PARASTAT 4000+ potentiostat with Versa Studio software was used for analysis. Two inhibitors, Inhibitor A, based on sodium nitrite, and Inhibitor B, based on colloidal carbon, were evaluated with different concentrations (10 ml, 20 ml, 30 ml, and 40 ml) mixed with different electrolyte concentrations (3, 10 and 15% (wt./vol)) of citric acid ($C_6H_8O_7$); this solution demonstrates acidic environment. Results showed that the corrosion rate is highly dependent on the type of inhibitor, its concentration, and the aggressiveness of the electrolyte. Overall, the study highlights the important role of optimized inhibitor selection for effective corrosion protection in acidic conditions.

KEY WORDS: Corrosion inhibition, Tafel polarization, Electrochemical evaluation, Acidic electrolyte, Electrochemical reaction, Corrosion rate, Taffel curve, Concentration

ВВЕДЕНИЕ

Дегградация металлических материалов в агрессивных средах представляет собой серьезную проблему для различных отраслей промышленности, что обуславливает постоянный интерес к ингибиторам кор-

розии как к практическому средству борьбы с этим явлением [6]. Защита материалов от коррозии может быть достигнута различными способами. Среди них использование эффективных ингибиторов является одним из наиболее экономически выгодных [6, 10]. Ингибиторы коррозии – химические соединения, которые вводятся в малых концентрациях и замедляют скорость электрохимических реакций, вызывающих коррозию, за счет взаимодействия с поверхностью

металла или с коррозионно-активной средой [7]. Ингибиторы действуют активно, адсорбируясь на поверхности металла и образуя барьер, который влияет на электрохимические реакции, ответственные за коррозию [3, 4]. Эффективность ингибиторов коррозии обычно оценивается с помощью электрохимических методов; среди них центральное место занимает метод потенциодинамической поляризации, широко известный как метод Тафеля [4, 8].

В данной работе исследуются два образца промышленных ингибиторов коррозии: ингибитор А и ингибитор Б, которые подавляют коррозию нержавеющей стали, углеродистой стали и сварных соединений на углеродистой стали в кислых (лимонная кислота) растворах с соответствующими концентрациями (3, 10 и 15% масс. /об.). Органические кислоты широко используются в качестве модели в исследованиях благодаря их умеренной агрессивности и применимости в промышленных условиях, таких как нефтехимическая переработка и кислотная очистка. Ингибиторы применялись в различных дозировках 10, 20, 30 и 40 мл на 100 мл кислого электролитного раствора для определения оптимальной стабильности ингибитора, обеспечивающей надежную коррозионную стойкость. Основная цель данного исследования – электрохимическая оценка эффективности ингибирования коррозии ингибитором А и ингибитором Б с использованием анализа по методу Тафеля при различном количестве ингибитора в кислой среде для трех образцов металлов [1, 9]. Ожидается, что результаты позволят лучше понять влияние типа металла, дозировки ингибитора и концентрации кислоты на коррозионные свойства, что поможет определить наиболее эффективные условия для минимизации скорости коррозии и повышения долговечности материалов в кислых средах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Подготовка образцов

Для испытаний были подготовлены металлические образцы из нержавеющей стали (12Kh18N10T), углеродистой стали (С: 0,14–0,22%, Мп: 0,40–0,65%) и сварного соединения на углеродистой стали (09Г2С), каждый с открытой поверхностью площадью 1 см². Открытые поверхности были механически отполированы наждачной бумагой различной зернистости до гладкости, затем промыты дистиллированной водой и высушены на воздухе для обеспечения чистоты и однородности поверхности перед погружением в электролит.

Приготовление электролитов и методика электрохимических измерений

Электролиты готовили растворением лимонной кислоты в дистиллированной воде до концентраций 0,03; 0,10 и 0,15 г/мл (3, 10 и 15 мас. %) без добавления солей. Использовали два ингибитора: Anticor-A (се-

рия, SC ZECASIN-Brazi, Румыния) – ингибитор А, и RUTROL AC 1201 (на основе коллоидного углерода) – ингибитор Б. К 100 мл электролита добавляли 10; 20; 30 и 40 мл ингибитора, что соответствует 9,1; 16,7; 23,1 и 28,6 об. % системы «кислота + ингибитор». Растворы готовили непосредственно перед тестированием и выдерживали при 25°C. Измерения проводили на потенциостате PARSTAT 4000+ (PO VERSA STUDIO) в трехэлектродной ячейке: рабочий образец, графитовый вспомогательный электрод и электрод сравнения. Поляризационные кривые снимали от –250 до +250 мВ относительно потенциала разомкнутой цепи со скоростью 1 мВ×с^{–1}.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Лимонная кислота была выбрана в качестве модельной слабой органической кислоты, поскольку она широко применяется в процессах кислотной очистки оборудования в пищевой, фармацевтической и нефтегазовой отраслях, а также входит в состав средств для удаления накипи и продуктов коррозии. Полученные закономерности могут быть экстраполированы на другие слабые органические кислоты (уксусную, щавелевую, муравьиную) с учетом их констант диссоциации.

Нержавеющая сталь

Результаты электрохимического анализа (рис. 1) показывают, что электрохимическая коррозия нержавеющей стали в значительной степени зависит от концентрации кислотного электролита, типа ингибитора и его дозировки. При 0,03 г/мл концентрации нержавеющей сталь демонстрировала низкую скорость коррозии при использовании обоих ингибиторов, что указывает на присущую сплаву коррозионную стойкость в слабокислых средах. По результатам ингибитор Б продемонстрировал несколько лучшую стабилизацию при более низких концентрациях ингибитора, в то время как ингибитор А потребовал более высоких дозировок для достижения сопоставимой защиты.

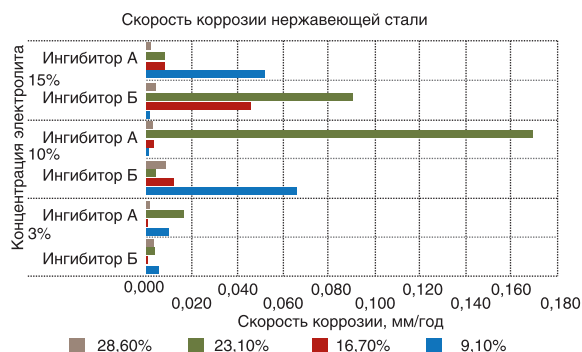


Рис. 1.

Электрохимическая коррозионная стойкость нержавеющей стали в электролите на основе органических кислот в присутствии ингибиторов

Как видно из рисунка 1, при увеличении концентрации электролита с 0,03 до 0,10 г/мл скорость коррозии значительно возросла, особенно в присутствии ингибитора А, где наблюдалось заметное увеличение при дозировке ингибитора 23,1%. Это указывает на нестабильность защитной пленки ингибитора в более агрессивных кислых условиях. В отличие от этого, ингибитор Б поддерживал относительно более низкие скорости коррозии при оптимизированных концентрациях, что свидетельствует о лучшей адсорбции и более эффективном покрытии поверхности. При 0,15 г/мл концентрации электролита коррозионная среда стала очень агрессивной, что привело к дальнейшему увеличению скорости коррозии нержавеющей стали. Ингибитор Б продемонстрировал более стабильные ингибирующие свойства при различных концентрациях кислоты, в то время как ингибитор А показал большую чувствительность как к агрессивности электролита, так и к его концентрации. Эти результаты подтверждают, что даже коррозионноустойчивые материалы, такие как нержавеющая сталь, требуют тщательно оптимизированных систем ингибиторов в сильноокислых средах.

Углеродистая сталь

Электрохимические коррозионные испытания углеродистой стали (рис. 2) показывают значительно более высокую коррозионную активность, чем у нержавеющей стали, при всех концентрациях органических веществ. При 0,03 г/мл концентрации кислоты скорость коррозии была относительно умеренной, но отмечены явные различия между двумя ингибиторами. Ингибитор Б обеспечивал частичную защиту от коррозии при более низких концентрациях, в то время как ингибитор А демонстрировал колебания эффективности, что указывает на неравномерное образование пленки ингибитора на поверхности углеродистой стали.

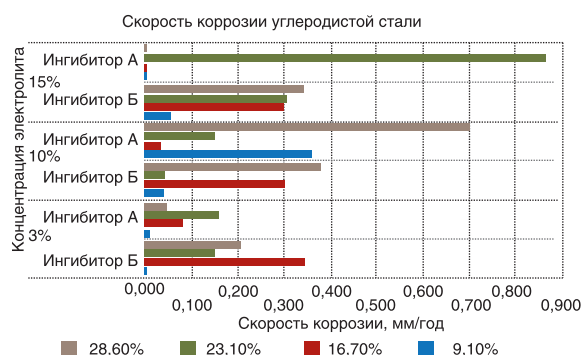


РИС. 2.

Электрохимический анализ коррозии углеродистой стали в органических кислотных электролитах в присутствии ингибиторов

Увеличение скорости коррозии при определенных дозировках ингибитора предполагает, что в слабоокислых условиях может наблюдаться недостаточное покрытие поверхности или конкурентная адсорбция между ингибиторами и агрессивными ионами. Результаты, представленные на графике выше, показали, что скорость коррозии резко возросла с увеличением концентрации кислотного электролита до 10 и 15 мас. %, что подтверждает агрессивность электролита по отношению к углеродистой стали. В сильноокислой среде ингибитор А продемонстрировал некоторое улучшение при более высоких концентрациях, особенно при 28,6 об. %, что указывает на усиление адсорбции ингибитора и улучшение барьерных свойств. В отличие от этого, ингибитор Б продемонстрировал переменную эффективность, с увеличением скорости коррозии при промежуточных дозировках, что указывает на возможную десорбцию ингибитора или нестабильность защитной пленки. В целом, результаты подчеркивают, что для эффективного снижения коррозии в сильноокислых средах углеродистой стали требуются более высокие концентрации ингибитора и тщательный выбор химического состава ингибитора.

Сварное соединение на углеродистой стали

Результаты электрохимического анализа коррозии сварного соединения на углеродистой стали указывают на значительно более высокую скорость коррозии по сравнению с основной углеродистой сталью, что подчеркивает критическое влияние микроструктурной неоднородности, вызванной сваркой. При концентрации кислоты 3 мас. % сварное соединение уже продемонстрировало выраженную коррозионную активность, особенно при низких дозах ингибитора (9,1 об. %), при этом для обоих ингибиторов была продемонстрирована ограниченная защитная способность. Такое поведение можно объяснить гальваническим взаимодействием между металлом сварного шва и основным металлом, которое способствует локальной коррозии и снижает эффективность ингибитора при недостаточных концентрациях.

Как видно из рисунка 3, увеличение концентрации кислоты до 10 и 15 мас. %, резко повышает скорость коррозии, особенно в присутствии ингибитора А при более высоких дозах, где наблюдались чрезвычайно высокие скорости коррозии. В отличие от него, ингибитор Б продемонстрировал относительно лучшую эффективность ингибирования при оптимизированных концентрациях. В аналогичных условиях ингибитор Б поддерживает более низкие скорости коррозии, чем ингибитор А. Эти результаты указывают на то, что сложная химия поверхности и остаточные напряжения в сварных соединениях препятствуют равномерной адсорбции ингибитора, что требует более высоких концентраций и более стабильных составов ингибитора. В целом, результаты показывают, что сварные соединения являются наиболее уязвимыми участками



РИС. 3.

Химический анализ сварное соединение на углеродистая сталь в электролитах на основе органических кислот в присутствии ингибиторов коррозии

в кислых средах и требуют специализированных стратегий защиты от коррозии, отличных от тех, которые используются для неблагородных металлов.

Впервые с использованием метода тафелевских кривых было проведено систематическое сравнительное исследование эффективности двух ингибиторов (А и В) в средах лимонной кислоты трех концентраций (3, 10 и 15 мас. %). Результаты нашего эксперимента применимы для углеродистых и нержавеющей сталей в средах лимонной кислоты с концентрацией 3–15 мас. % при температурах 20–25°C. Они могут найти применение в нефтегазовой отрасли (защита трубопроводов при кислотной обработке скважин), пищевой и энергетической промышленности (химическая очистка котлов), а также в металлообработке (травление поверхностей). Ожидается, что установленный для лимонной кислоты механизм адсорбции ингибитора будет характерен и для других слабых органических кислот, однако для сильных минеральных кислот (HCl, H₂SO₄) требуется дополнительная проверка.

ВЫВОДЫ

Электрохимический анализ коррозии нержавеющей стали, углеродистой стали и сварных соединений на углеродистой стали в среде органических кислот демонстрирует четкую зависимость коррозионного поведения от типа материала, концентрации кислоты и состава ингибитора. По результатам электрохимического анализа, нержавеющая сталь продемонстрировала самую высокую коррозионную стойкость при всех условиях испытаний, что подтверждает ее превосходное пассивное поведение даже в агрессивных кислых средах. Углеродистая сталь показала умеренную и высокую скорость коррозии, которая значительно возрастала с увеличением концентрации кислоты, в то время как сварные соединения неизменно демонстрировали самую высокую коррозионную

Х.В. ВЕРЕС
ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ
ИНГИБИТОРОВ КОРРОЗИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
АНАЛИЗА КРИВЫХ ТАФЕЛЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ
КОНЦЕНТРАЦИЯХ ИНГИБИТОРА

активность. Выраженная коррозионная активность в сварных соединениях подчеркивает пагубное влияние микроструктурной неоднородности и гальванического взаимодействия между металлическим швом и прилегающими зонами.

Из двух ингибиторов, изученных в данной статье, ингибитор В продемонстрировал в целом более высокое и стабильное ингибирование на всех трех образцах металлов, особенно при более высокой дозировке ингибитора (23,1 и 28,6 об. %) и в более агрессивных электролитах (10–15 мас. %). В то время как ингибитор А продемонстрировал эффективное снижение коррозии только в ограниченных условиях, и показал нестабильное поведение, особенно на углеродистой стали и сварных соединениях при более высоких концентрациях кислоты. Таким образом, ингибитор В при оптимизированных более высоких дозировках можно считать более эффективным ингибитором для защиты как основных металлов, так и сварных соединений в кислых средах.

ЛИТЕРАТУРА

1. БЕРЕЖНАЯ А.Г., ЧЕРНЯВИНА В.В., ПАВЛИЦКИЙ И.Н. Серосодержащие органические вещества и их смеси с моноэтаноламидом таллового масла как ингибиторы сернокислотной коррозии стали-3 // Коррозия: защита материалов и методы исследований. 2025. №3. С. 52–64.
2. ГАЙДАР С.М., НИЗАМОВ Р.К., ГОЛУБЕВ М.И., ГОЛУБЕВ И.Г. Защитная эффективность водорастворимых ингибиторов коррозии // Инженерные технологии и системы. 2018. №28(3). С. 429–444.
3. ГРОЙСМАН А. Проблемы коррозии и их решения в нефтяной, газовой, нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности // Журнал «КОМ» – Коррозия и защита материалов. 2017. №61(3). С. 100–117.
4. НАРЗУЛЛАЕВ А.Х., БЕКНАЗАРОВ Х.С., ДЖАЛИЛОВ А.Т. Изучение эффективности ингибитора коррозии ИКЦФ-1 в 1М HCl // Universum: химия и биология. 2019. №2 (56). С. 34–39.
5. НУРИЛЛОВ З., БЕКНАЗАРОВ Х., НОМЗОВ А. Получение ингибиторов коррозии на основе кротонного альдегида и их ингибирующие свойства // Международный журнал инженерных тенденций и технологий. 2021. № 70. С. 423–434. <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V70I8P243>.
6. САВЕНКО О.В., ГОРПИНЧЕНКО А.Н., ПОРЫВКИН П.П. Анализ коррозионно-механических разрушений конструкционных материалов нефтегазового промышленного оборудования // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). 2022. № 3. 133 с.
7. УСПЕНСКИЙ И.А., ФАДЕЕВ И.В., ПЕСТРЕВА А.Ш., САДЕТДИНОВ Ш.В., КАЗАРИН А.С. Новые ингибиторы коррозии для за-

- щиты сельскохозяйственной техники // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2020. №3 (59). С. 365–376.
8. УШАКОВ И.А., НИКОНОВА В.С., ПОЛЫНСКИЙ И.В., КНЯЗЕВА А.Г., ПОЛЫНСКАЯ М.М., АНЦИФЕРОВ Е.А. Исследование эффективности ингибиторов коррозии на основе производных изотиурониевых солей // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2021. №11(2, 37). С. 326–332.
 9. ЧЕН С., ШЕН Т., ВЭЙ ДЖ., ЯН ДЖ., ЦАО В., ЛИ В. Автономное самовосстанавливающееся антикоррозионное покрытие, созданное благодаря синергии гидрофобного глубокоэвтектического растворителя и эластичной смолы // Передовые функциональные материалы. 2026. №36(4), e12310.
 10. ШЕРЯЗОВ С.К., САРКУЛОВА З.С., БАЛГИНОВА А.М., ШУКИРОВА С.С. Методы защиты от коррозии оборудования и трубопроводов в нефтегазовой отрасли // Вестник Актыбинского регионального университета имени К. Жубанова. 2024. № 76(2). С. 35–42.
- REFERENCES**
1. BEREZHNYAYA A.G., CHERNYAVINA V.V., PAVLITSKY I.N. Sulfur-containing organic substances and their mixtures with tall oil monoethanolamide as inhibitors of sulfuric acid corrosion of steel-3. *Korroziya: zashchita materialov i metody issledovaniy*. 2025;3:52–64.
 2. GAIDAR S.M., NIZAMOV R.K., GOLUBEV M.I., GOLUBEV I.G. Protective effectiveness of water-soluble corrosion inhibitors. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy*. 2018;28;(3):429–444.
 3. GROYSMAN A. Problems of corrosion and their solutions in the oil, gas, oil refining and petrochemical industries. *Zhurnal «KOM» – Korroziya i zashchita materialov*. 2017;61;(3):100–117.
 4. NARZULLAEV A.KH., BEKNAZAROV KH.S., DZHALILOV A.T. Study of the effectiveness of the corrosion inhibitor IKCF-1 in 1 M HCl. *Universum: khimiya i biologiya*. 2019;2;(56):34–39.
 5. NURILLOEV Z., BEKNAZAROV KH., NOMOZOV A. Preparation of corrosion inhibitors based on crotonaldehyde and their inhibitory properties. *Mezhdunarodnyy zhurnal inzhenernykh tendentsiy i tekhnologiy*. 2021;70: 423–434. <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V70I8P243>.
 6. SAVENOK O.V., GORPINCHENKO A.N., PORYVKIN P.P. Analysis of corrosion-mechanical destruction of structural materials of oil and gas field equipment. *Nauka. Tekhnika. Tekhnologii (politekhnichestkiy vestnik)*. 2022;3:133.
 7. USPENSKY I.A., FADEEV I.V., PESTRYAEVA L.SH., SADETDINOV SH.V., KAZARIN A.S. New corrosion inhibitors for the protection of agricultural machinery. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vyssheye professional'noye obrazovaniye*. 2020;3;(59):365–376.
 8. USHAKOV I.A., NIKONOVA V.S., POLYNSKY I.V., KNYAZEVA L.G., POLYNSKAYA M.M., ANTSIFEROV E.A. Study of the effectiveness of corrosion inhibitors based on derivatives of isothiuronium salts. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya khimiya i biotekhnologiya*. 2021;11;(2, 37):326–332.
 9. CHEN S., SHEN T., WEI J., YANG J., CAO W., LI W. Autonomous self-healing anti-corrosion coating created by the synergy of hydrophobic deep eutectic solvent and elastic resin. *Peredovyye funktsional'nyye materialy*. 2026;36;(4):12310.
 10. SHERYAZOV S.K., SARKULOVA Z.S., BALGINOVA A.M., SHUKIROVA S.S. Methods of corrosion protection of equipment and pipelines in the oil and gas industry. *Vestnik Aktyubinskogo regional'nogo universiteta imeni K. Zhubanova*. 2024;76;(2):35–42.
-
- Хафту Велдеслассие Верес,**
аспирант Российского государственного университета нефти и газа; Университета Дыре Дава Технологический институт (Дыре Дава, Эфиопия)
- ✉ 119991, г. Москва, пр-т Ленинский, д. 65, корп. 1,
119991, Moscow, Leninsky Ave., 65, bldg. 1,
тел.: +7 (991) 698-71-16, e-mail: haftoma54@gmail.com