

Растительные экстракты как ингибиторы коррозии меди. Обзор. Часть I.

С. Билгич

Университет Анкары, факультет естественных наук, отдел химии, 06100.

Аннотация

Один из методов предотвращения коррозии заключается в добавлении в агрессивную среду химических соединений, называемых ингибиторами. Ингибиторы могут представлять собой неорганические или органические соединения. Однако эти соединения могут быть опасны для здоровья человека и окружающей среды из-за своего токсичного действия. К тому же добыть их может быть сложно и дорого. По этой причине в последние годы предметом многих исследований являются нетоксичные, биосовместимые, безвредные для здоровья человека и окружающей среды ингибиторы коррозии, которые можно легко и дешево получить. Многие исследователи сосредоточились на новом классе ингибиторов, таких как растительные экстракты, экстракты фруктов и овощей и эфирные масла. Растительные экстракты представляют собой наиболее изученный класс этих ингибиторов, называемых зелеными ингибиторами. Защитное действие растительных экстрактов обусловлено адсорбцией их молекул на поверхности металла. Они обеспечивают металл защитной пленкой, блокируя активные центры. Формирование пленки обеспечивает для металлической поверхности физический барьер от агрессивных сред и обеспечивает защитный эффект от коррозионных воздействий. Медь – благородный металл, и благодаря этому свойству она устойчива к коррозии. Однако определенные условия могут вызвать коррозию меди, например, загрязненный воздух, окисляющие кислоты, окисляющие соли тяжелых металлов, сернистый аммиак и некоторые соединения серы и аммиака. Поэтому исследование коррозии меди имеет важное значение. В данном обзоре обобщены исследования экстрактов растений, оказывающих ингибирующее действие на коррозию меди.

Ключевые слова: *коррозия, медь, ингибитор, растительные экстракты.*

Поступила в редакцию 21.05.2024 г.; После доработки 27.05.2024г.; Принята к публикации 3.06.2024 г.

doi: [10.61852/2949-3412-2024-2-3-44-67](https://doi.org/10.61852/2949-3412-2024-2-3-44-67)

Введение

Коррозия, под которой понимается разрушение металлов и сплавов в различных условиях, является естественным и нежелательным явлением. Одним из наиболее важных методов предотвращения коррозии является использование химикатов и соединений, называемых ингибиторами. Ингибиторы могут представлять собой

неорганические и/или органические соединения. Эти соединения проявляют высокий ингибирующий эффект против коррозии [1–10]. Однако использование этих соединений на практике ограничено из-за возможности их вредного воздействия на здоровье человека и окружающую среду. Токсичность этих ингибиторов привела к изучению возможности использования нетоксичных природных ингибиторов, которые являются экологически чистыми и биоразлагаемыми. Этими свойствами обладают растительные экстракты как ингибиторы коррозии. Также, дешевле проводить исследования с экстрактами растений. Поэтому во многих исследованиях экстракты растений изучаются как ингибиторы коррозии, особенно в последнее время [12–32].

Медь и ее сплавы широко используются во многих отраслях промышленности из-за превосходных свойств, таких как хорошая коррозионная стойкость, высокая электро- и теплопроводность, механическая обрабатываемость и ковкость. Из-за этих преимуществ наиболее важными областями применения меди являются интеллектуальные устройства, проводка в зданиях, телекоммуникации и электроника. Однако, как и для многих металлов, коррозия также является важной проблемой для меди. Коррозия меди происходит, когда металл вступает в контакт с водой или кислородом в присутствии электролита. Эта ситуация вызывает реакцию между поверхностью меди и электролитом. В результате на поверхности меди происходит реакция окисления, появляется изменение цвета и происходит потеря сопротивления металла. В настоящем обзоре обобщена эффективность ингибирования коррозии меди растительными экстрактами.

Исследования в кислой среде.

В среде HCl

Чаухан протестировал экстракт *Zenthoxylum alatum* [33] как ингибитор коррозии меди и алюминия в 0,1 М растворе HCl. В этом исследовании были применены измерение потери веса и метод потенциометрической поляризации. Установлено, что этот экстракт предотвращает коррозию меди и алюминия. Обнаружено, что эффективность ингибирования возрастает с увеличением концентрации экстракта. Согласно экспериментальным данным, полученным методом потенциометрической поляризации, в присутствии экстракта как анодная, так и катодная поляризационные кривые смещались в сторону меньших плотностей тока. Коррозионный потенциал меди в среде 1 М HCl при добавлении в экстракт существенно смещается в менее отрицательные значения. Было обнаружено, что адсорбция экстракта *Zenthoxylum alatum* подчиняется изотерме Ленгмюра.

Гарг и др. [34] исследовали ингибирующее действие листьев, коры стебля и смолы сенегальской акации на коррозию меди в 1 М HCl. Они использовали методы потери массы и термометрические методы. Установлено, что присутствие экстракта снижает скорость коррозии Cu. Эффективность ингибирования увеличивается при росте его концентрации. По экспериментальным данным адсорбция всех видов

экстрактов описывается изотермой Ленгмюра. Было установлено, что экстракт камеди сенегальской акации проявляет более высокий эффект ингибирования, чем другие виды экстракта сенегальской акации. Наблюдается ингибирующий эффект использованного природного танина, экстрагированного из сырой гамбиры (*Uncaria gambier* Roxb.). Авторы [35] изучали коррозию меди в растворе HCl ореха (*Areca catechu*) и кожуры манго (*Garcinia mangostana*). Влияние источника танина и концентрации танина на ингибирование коррозии определяли гравиметрическим методом. Было обнаружено, что добавление 0,75% экстракта оказывает наибольший защитный эффект.

Шабани и др. [36] исследовали защиту от коррозии меди в среде 2 моль/л HCl экстрактом *Calligonum comosum* методами ее потенциодинамической поляризации и спектроскопии электрохимического импеданса (СЭИ). Оба метода показали, что изучаемый экстракт действует как ингибитор смешанного типа, а максимальная степень эффективности ингибирования $Z = 80,06\%$.

Существует множество исследований, показывающих ингибирующее действие различных растительных экстрактов на коррозию Cu в средах HCl, таких как *Tecomella Undulata* [37], беталаины (экстракт цветков бугенвиллии) [38], масло *Sesum indicum* [39] и африканская тыква (*Momondica balsam-ina* Linn) [40], листья *Prosopis Cineraria* [41], экстракт пчелиной пыльцы [42], *Zizyphus Lotuse* – экстракт мякоти зизифуса [43], растительный экстракт *Papever somniferum* L [44]. Самонта и Лугсанангарм [45а] опубликовали информацию о механизме ингибирования и адсорбции эвгенола на Cu в среде HCl. В исследовании изучалось влияние концентрации эвгенола, времени погружения и температуры. В другой работе приведено изменение ингибирующего действия эвгенола с температурой на коррозию Cu в среде 1 М HCl [45б]. Исследователи измеряли потери веса Cu и использовали сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) для изучения её поверхности. Показано, что эффективность ингибирования эвгенола снижается с повышением температуры от 30°C до 70°C. Наибольшее ингибирование было обнаружено на уровне 50% при 30°C.

Джмиами и др. [46] изучали экстракт скорлупы зизифуса в качестве ингибитора коррозии меди в 1 М HCl, используя потенциодинамическую поляризацию Cu, СЭИ и измерение потери массы в сочетании с методами атомной абсорбции. По результатам экспериментов, этот экстракт действует как катодный ингибитор, и эффективность ингибирования $Z = 91\%$ для $C_{\text{ин}} = 2$ г/л при 298 К. В этой работе проведено моделирование методом Монте-Карло и квантово-химические расчеты также выполнены с применением DFT, чтобы доказать точность экспериментальных результатов.

Экстракт *Alchemilla Vulgaris* был исследован Ахмедом и Чжаном в качестве зеленого ингибитора коррозии меди в 1 М растворе HCl [47]. С этой целью из ее листьев готовили экстракт *Alchemilla vulgaris* и определяли эффективность ингибирования экстракта, измеряли потери массы образца, проводя его потенциодинамическую поляризацию и анализ СЭМ, а также СЭИ. Электрохимические данные показали, что защитная активность экстракта *Alchemilla*

Vulgaris увеличивается с ростом его $C_{ин}$. Адсорбция экстракта на поверхности меди описывается изотермой Ленгмюра. Шабани-Нушабади и др. [48] показали методом потенциодинамической поляризации и СЭИ, что экстракт *Ephedra sarcocarpa* ингибирует коррозии Cu в 2 М HCl. Исследования поляризации показали, что этот экстракт действует как катодный ингибитор, а максимальный $Z = 95\%$ достигается при концентрации 0,5 г/л. Диаграммы Найквиста в СЭИ показывают увеличение сопротивления переносу заряда с ростом $C_{ин}$ и уменьшение емкости двойного слоя меди. Экстракт адсорбируется на поверхности Cu в соответствии с изотермой Ленгмюра.

Деяб [49] показал, что экстракт египетской солодки можно использовать в качестве ингибитора коррозии меди в 0,1 М HCl. Исследователь изучал методы постоянной поляризации и переменного тока. Установлено значительное снижение скорости коррозии меди в 0,1 М HCl в присутствии экстракта. Эффективность ингибирования увеличивается с повышением $C_{ин}$ экстракта. Кроме того, скорость коррозии зависит от температуры и состава экстракционного растворителя. Поляризационные эксперименты показали, что экстракт ведет себя как ингибитор смешанного типа. Адсорбция экстракта на поверхности меди подчиняется изотерме Темкина. Калада и Джеймс [50а] указали на ингибирование коррозии меди в растворе HCl с помощью геля *aloe vera Barbadensis* при $C_{ин} = 10, 5, 4, 3, 2$ и 1% об./об. и диапазоне температур 303–303–303–303–303–503% об./об. 353 К. В этом исследовании применялась методика определения снижения массы образца меди. Результаты показали, что скорость коррозии увеличивается с ростом температуры. Эффективность ингибирования возрастала с увеличением $C_{ин}$. Процесс ингибирования коррозии связывали с физической адсорбцией ингибитора. Определена адсорбция геля *aloe vera Barbadensis* на меди и показано, что она описывается изотермой Ленгмюра. Харт и Джеймс [50б] опубликовали данные об ингибировании коррозии металлической меди в растворах соляной кислоты и тетраоксосульфата(VI) с помощью геля *aloe vera Barbadensis*. Установлено, что эффективность ингибирования увеличивается с повышением $C_{ин}$ в системе, а с повышением температуры эффективность ингибирования снижалась. Отмечается, что адсорбция ингибитора коррозии описывается уравнением изотермы Ленгмюра.

Ингибирующее действие спиртового экстракта *Acacia nilotica* на коррозию меди в 0,5 Н HCl было доказано Ядавом и Шармой [51]. Метод потери массы медного образца использовали в диапазоне температур 303–353 К. Показано, что ингибирующая активность возрастает с увеличением $C_{ин}$ экстракта. Однако скорость коррозии увеличивалась с повышением температуры. Максимальная эффективность ингибирования составила 85,84% при 303 К. Показано, что адсорбция *Acacia nilotica* на Cu подчиняется изотерме адсорбции Ленгмюра. Значения свободной энергии (ΔG) и энтропии (ΔS) адсорбции показали, что эта адсорбция имеет физическую природу. Анализ поверхности (Фурье-ИКС) показывает механизм ингибирования коррозии меди в среде 0,5 Н HCl.

Ингибирующее действие на коррозию Cu в растворах HCl были опубликованы для следующих экстрактов: танина мангрового дерева [52 а,б], *Ziziphus mauritiana* [53], *Azadirachta indica* [54], Purgent [55], *Wrightia Tinctorial* [56], *Emilia sonchi-folia* [57], *Capparis decidua* [58], *Pisonia Grandis* [59], *Caccinia Grandis* [60] о коррозии меди в среде HCl.

Кавита и др. [61] сообщили об использовании экстракта листьев *Leucas Aspera* для ингибирования коррозии меди в 1 М HCl. Авторы использовали измерения потери веса и электрохимические методы в зависимости от различных концентраций экстракта. Результаты метода снижения веса представлены в таблице 1.

Таблица 1. Влияние концентрации *Leucas Aspera* на коррозию меди в 1 М HCl (по методу потери массы образца [61])

Концентрация <i>Leucas Aspera</i> , г/л	1 ч		5 ч		48 ч		71 ч	
	<u>CR</u> , мм/год	Z%	<u>CR</u> , мм/год	Z%	<u>CR</u> , мм/год	Z%	<u>CR</u> , мм/год	Z%
фон	86,21	–	92,46	–	90,43	–	91,33	–
0,05	44,98	47,83	42,96	53,53	38,22	57,73	37,54	58,89
0,10	33,73	60,87	31,41	66,02	30,50	66,27	28,25	69,06
0,15	26,23	69,57	23,32	74,77	22,37	75,26	18,21	80,06
0,20	18,74	78,26	17,41	81,17	16,23	82,05	15,37	83,17
0,25	11,24	86,96	10,27	88,89	9,47	89,52	8,43	90,76

Результаты показывают сдвиг величин $E_{\text{сog}}$ в присутствии экстракта по сравнению с контрольным раствором, который составляет менее 85 мВ. Это означает, что затрагиваются как анодные, так и катодные реакции. По поляризационному методу значения Z выше, чем величины, найденные по СЭИ.

Из этой таблицы видно, что по мере увеличения концентрации экстракта листьев *Leucas Aspera* значения эффективности ингибирования Z% увеличиваются. Графики Тафеля и диаграммы Найквиста для коррозии меди в 1 М HCl без и с различными концентрациями экстракта приведены на рисунках 2а и б соответственно.

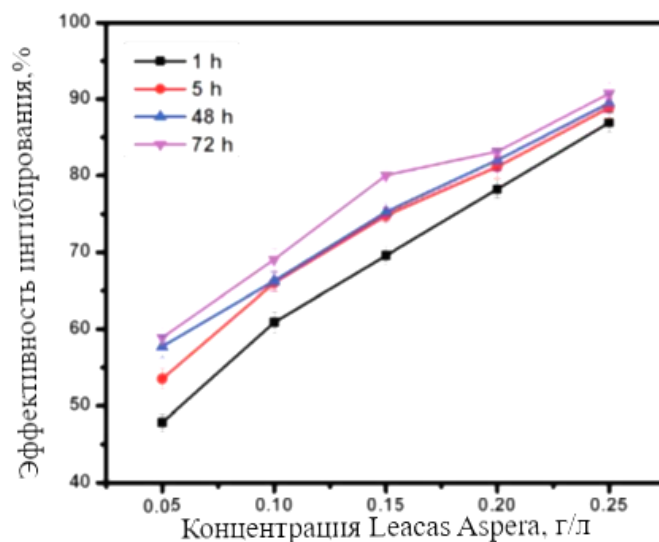


Рисунок 1. Влияние концентрации Leucas Aspera на коррозию Cu в 1 М НСl, определенной по методу потери массы меди [61].

Измерения поляризации были получены на основе графиков Тафеля (рис. 2а). Тафелевские наклоны рассчитывались путем линейной экстраполяции катодной и анодной области поляризационных кривых (рис. 2а). Ток коррозии $I_{\text{корр}}$ рассчитывали по наклону поляризационной кривой (b_a , b_c), а сопротивление линейной поляризации R_p рассчитывали с использованием следующего уравнения.

$$I_{\text{сопг}} = \left[\frac{b_a \cdot b_c}{2.303(b_a + b_c)} \right] \cdot \frac{1}{R_p}$$

Диаграммы импеданса, полученные на основе диаграмм Найквиста, показаны на рисунке 2б.

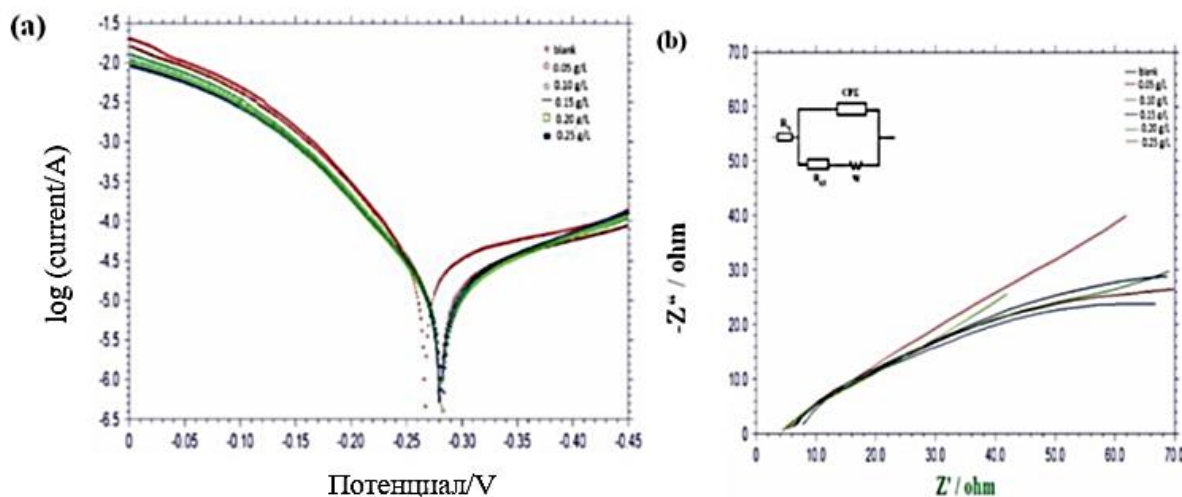


Рисунок 2. а) Тафелевские диаграммы коррозии Cu в 1 М HCl с разными концентрациями Leucas Aspera. б) диаграммы Найквиста для коррозии Cu в 1 М HCl с разными концентрациями Leucas Aspera [61].

Они получены для всех изученных систем как несовершенные полукруги. Несовершенный полукруг объясняется частотной дисперсией из-за шероховатости и однородности поверхности электрода. Чтобы получить более точное соответствие экспериментальным данным, были протестированы различные схемы, и наилучшая точность была обнаружена с помощью простой эквивалентной схемы Рэндлса. Эквивалентные схемы Рэндлса для измерения импеданса приведены на рисунке 2б, где R_s – сопротивление раствора, C_{dl} – емкость двойного слоя, а R_{ct} – сопротивление переноса заряда. Эти данные приведены в таблице 2.

Электрохимические параметры коррозии меди в 1 М HCl для методов потенциодинамической поляризации (ПДП) и спектроскопии электрохимического импеданса (СЭИ) приведены в таблице 2.

Таблица 2. Электрохимические параметры коррозии меди в 1 М HCl при различных концентрациях ингибитора [61].

Концентрация Leucas Aspera, г/л	ПДП				СЭИ			
	$b_a \text{ mV} \cdot \text{dec}^{-1}$	$b_k \text{ mV} \cdot \text{dec}^{-1}$	$-E_{\text{corr}}, \text{ mV} \cdot \text{s}^{-1}$	$I_{\text{corr}} \cdot 10^{-4}, \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$	Z%	$R_{ct}, \Omega \cdot \text{cm}^{-2}$	$C_{dl} \cdot 10^{-5}, \text{ F} \cdot \text{cm}^{-2}$	Z%
0,00	72,33	257,123	241,2	1,142	–	119,1	41,66	-
0,05	69,71	263,08	280,5	0,2111	82,14	136,7	43,78	12,87
0,10	67,77	212,17	281,8	0,1787	84,88	145,6	45,51	18,20
0,15	75,33	200,44	281,2	0,1740	85,27	148,2	46,09	19,63
0,20	72,47	184,39	281,8	0,1682	85,76	234,7	46,84	49,25
0,25	77,28	186,32	283,7	0,1497	87,33	371,2	47,37	67,91

Определено, что адсорбция экстракта листьев *Leucas Aspera* на поверхности меди описывается уравнением изотермы Фрейндлиха (рисунок 3).

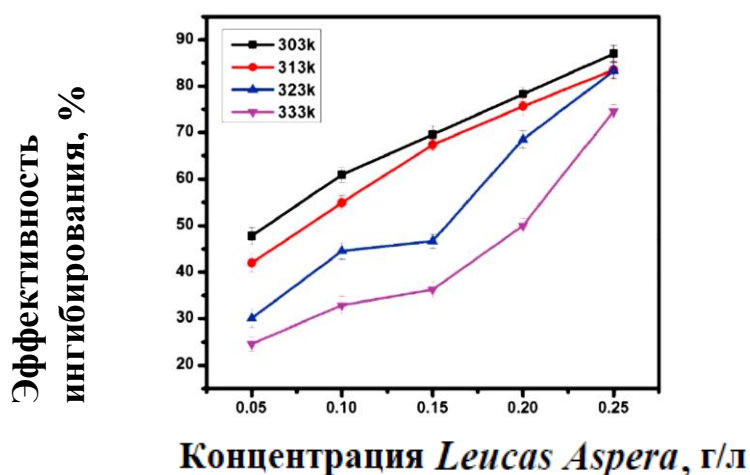


Рисунок 3. Влияние температуры на коррозию меди в растворе 1 М HCl, содержащий экстракт листьев *Leucas Aspera* [61].

Ахмед и Чжан [62] проиллюстрировали антикоррозионный эффект экстракта *Atriplex leucoclada* на коррозию меди в среде 1 М HCl. Для этой цели используется несколько методик, таких как потенциодинамическая поляризация при равновесном потенциале и СЭИ, изучена также морфология поверхности меди при защите её ингибитором, которым был экстракт *Atriplex leucoclada*. Результаты экспериментов показали, что этот экстракт действует как ингибитор смешанного типа. При комнатной температуре его наибольший ингибирующий эффект Z был на уровне $\approx 91,5\%$, а изотерма адсорбции экстракта на меди описывается уравнением Ленгмюра.

Кативаран [63] исследовали защитное действие водного раствора *Ruellia tuberosa* L на коррозию Cu в 0,5 М HCl. Эксперименты проводились с использованием поляризационных исследований и метода СЭИ. Эффективность ингибирования зависит от концентрации экстракта, концентрации кислоты и температуры. Результаты экспериментов показали, что защитное действие экстракта усиливается с увеличением его концентрации. Адсорбция экстракта на поверхности меди описывается уравнением изотермы Ленгмюра. Результаты сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), Фурье инфракрасная спектроскопия преобразования (FT-IR) и энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия (EDX) подтвердили адсорбцию экстракта на поверхности меди.

Одунлами и др. [64] исследовали в качестве ингибитора коррозии меди в 0,5 М HCl поверхностно-активное вещество *Zea mays*. Исследователи провели электрохимическую оценку в растворе горячей кислоты для химико-механических целей. Они изучали влияние температуры 298 К, 313 К и 323 К с помощью потенциодинамического поляризационного и сканирующего микроскопического анализа (СЭМ). Было определено действие поверхностно-активного вещества *Zea mays* при концентрации 0%, 10%, 15% и 20%. Результаты экспериментов показали,

что увеличение концентрации поверхностно-активного вещества *Zea mays* снижает скорость коррозии. Ингибитор продемонстрировал механизм физической адсорбции и ингибирующую эффективность, близкую к 90% при добавлении его в раствор 20 мл.

Как показали Диабом и Абд Эль-Халим [65] в качестве ингибитора коррозии меди в 0,5 М растворе HCl можно использовать экстракт хны (*Lawsonia inermis* L.). Они использовали измерение потенциала меди при разомкнутой цепи, потерю массы и метод гальваностатической поляризации.

Кайя с соавт. [66] определили защитное действие различных частей *Rheum Ribes* (işgin): RRF цветков, RRL листьев и RRR корней на коррозию меди в 1 М растворе HCl с использованием электрохимических методов, таких как изменение во времени потенциала разомкнутой цепи (ЕОСР), сопротивления линейной поляризации (LPR), СЭИ и потенциодинамической поляризации (ПДП). Поверхность Cu после воздействия изучаемых растворов исследовали с помощью СЭМ, электронографического рентгеновского спектрофотометра (EDX) и измерения угла смачивания поверхности меди водой Θ_c . По результатам экспериментов экстракт RRF показал лучшую защиту от коррозии. Экстракт RRR неэффективен для защиты Cu в 1 М HCl. RRF имеет эффективность защиты от коррозии более 60%. Экстракты действуют как ингибиторы коррозии анодного и смешанного типа.

Тивагаран и др. [67] опубликовали эффект *Magnifera indica* или листьев манго как зеленого ингибитора коррозии меди в 1,0 М HCl. Авторы использовали измерения потери массы меди, диаграммы EIS и методы анализа поверхности. Присутствие многих активных компонентов с ароматическими и кислородсодержащими функциональными группами в спиртовом экстракте листьев *Magnifera indica* выявлено методами ИК-Фурье и УФ-видимой спектрофотометрии (УФ-Вид). Экстракт действует как ингибитор смешанного типа, который снижает скорость как анодной, так и катодной реакции. Показано, что имеет место уменьшение повреждения поверхности меди в местах, где гладкий слой формируется ингибитором, особенно на активных центрах.

В среде HNO₃

Сангита и Фредимосес [68a] исследовали эффективность защиты меди ингибитором коррозии из сухих семян *Azadirachta indica* при различных концентрациях HNO₃, таких как 1 Н, 2 Н и 3 Н HNO₃. Для определения скорости коррозии и эффективности ингибирования они использовали метод потери массы металла и фитохимический анализ. Результаты показывают, что семена *Azadirachta indicia* являются хорошим ингибитором коррозии. Максимальная эффективность ингибирования составила 95% при концентрации ингибитора 1%. Эффективность ингибирования коррозии меди экстрактом листьев *Azadirachta indica* была обнаружена и в 0,5 М HNO₃ Пателем и Ваши [68b]. Они использовали методы потери массы меди, поляризации и СЭИ. Было определено также влияние температуры. Скорость коррозии увеличивается с ростом концентрации кислоты и температуры. Установлена максимальная эффективность ингибирования до 98%. Адсорбция экстракта соответствует изотерме адсорбции

Ленгмюра. Миту и др. [68с] исследовали защитное действие экстракта листьев *Azadirachta indica* на коррозию меди в 1 М HNO_3 , используя метод снижения массы металла. Результаты показали, что скорость коррозии снижается в присутствии экстракта *Azadirachta indica*, а эффективность ингибирования увеличивается с ростом его $C_{\text{ин}}$. Снижение скорости коррозии произошло за счет адсорбции экстракта. Адсорбция экстракта описывается уравнением изотермы Ленгмюра.

Эффективность ингибирования кожур *Gnetum africana* и *Musa acuminata* [69] против коррозии Cu определяли в растворе HNO_3 при температурах 303 и 333 К методом потери массы меди. Было обнаружено, что ингибирующий эффект обоих ингибиторов увеличивается с ростом концентрации, но снижается с увеличением температуры и времени погружения. Было показано, что эффективность ингибирования *Gnetum africana* превышала таковую для *Musa acuminata* в тех же условиях. Например, при 303 К для концентрации 0,003 г/л *Gnetum africana* показала эффективность защиты $Z=80,5\%$, тогда как для *Musa acuminata* $Z=72,9\%$. Термодинамические параметры показали, что адсорбция обоих ингибиторов на поверхности меди происходит по изотерме адсорбции Ленгмюра.

Хубаири и др. [70] опубликовали сведения об ингибирующем действии эфирного масла тимьяна Марокко на коррозию меди в 2 М HNO_3 . Для этой цели авторы использовали методы потери массы меди и поляризации. Было установлено, что эффективность ингибитора увеличивается с ростом его $C_{\text{ин}}$ и достигает $Z=89,02\%$ при 1200 мг/л эфирного масла *Thymus Satureoides* и 69,72% при 1600 мг/л только для основного компонента. Адсорбция ингибитора также соответствует изотерме Ленгмюра.

Шалаби [71] определил эффективность защиты экстракта тимуса обыкновенного от коррозии меди в среде 1 М HNO_3 . Он использовал метод измерения потери массы и электрохимические методы, такие как потенциодинамическая поляризация, СЭИ и электрохимической частотной модуляции (EFM). Эффективность ингибирования увеличивается с ростом концентрации экстракта и снижается с увеличением температуры в среде HNO_3 . Максимальная эффективность ингибирования была обнаружена на уровне $Z=97\%$ при использовании метода потери массы, а при использовании метода поляризации $Z=89\%$. По методу СЭИ при 25°C Z было определено как 92%. Результаты СЭМ указывали на образование защитной пленки на меди в присутствии экстракта. Рассчитанные термодинамические параметры показали, что экстракт тимуса обыкновенного адсорбируется в виде спонтанного и экзотермического процесса, при этом его адсорбция соответствует изотерме адсорбции Ленгмюра.

Авторы [72] измерили коррозию меди в 2 М HNO_3 без масла *Ricinus communis*, а с ним, определяя потерю массы Cu и электрохимические методы, такие как электрохимическая поляризация и СЭИ показали, что скорость коррозии Cu снижается с $C_{\text{ин}}$. В диапазоне температур 283÷313 К её изменение существенно не меняет эффективность ингибирования коррозии. Величина Z , определенная при температуре 298 К соответственно методами потери массы меди, электрохимической

поляризации и СЭИ для концентрации ингибитора 300 мг/л составила 96,24%, 99,47% и 98,87%.

Фауда с соавт. [73] исследовали экстракт *Zygorhllum soccineum* L. как зеленый ингибитор коррозии меди в 1 М растворах HNO_3 методами измерения потери массы меди, потенциодинамической поляризации, СЭИ и электрохимической частотной модуляции (EFM). Морфологию поверхности объяснили с помощью СЭМ. В этом исследовании установлено, что эффективность ингибирования увеличивается с ростом концентрации экстракта и снижается с повышением температуры. Установлено, что адсорбция экстракта *Zygorhllum soccineum* L. на поверхности меди подчиняется изотерме Ленгмюра.

Опубликованы защитные эффекты многих экстрактов, таких как *Ceratonia siliqua* [74], экстракт *Carapichea Ipecacuanha* [75], *Euphorbia Heliosopia linn* [76], экстракт *Alkanna Tinctoria* [77], экстракт *Hyoscyamus muticus* [78] против коррозии меди.

Защита от коррозии меди в 3 М растворе HNO_3 экстрактами листьев *Vitex negundo*, *Adhatoda vasica* и *Saraka asoka* была исследована авторами [79]. Они использовали методы гравиметрии, и потенциодинамической поляризации и СЭИ. По термодинамическим параметрам адсорбция этих ингибиторов на поверхности меди описывается изотермой Ленгмюра. Результаты атомно-силовой микроскопии (АСМ) подтвердили, что на поверхности меди ингибитор предотвращает коррозию, образуя на ней защитный слой.

В среде HNO_3 (продолжение)

Савита и др. [80] показали адсорбционное и ингибирующее действие плодов *Capsiumasnum* (CAN) на коррозию меди. Для определения ингибиторных свойств этих фруктовых экстрактов использовались методы гравиметрии, потенциодинамической поляризации (ПДП) и СЭИ.

Айша и др. [81] определили ингибирующее действие красных водорослей *Gellidum* на ингибирование коррозии меди в 1,0 М растворе HNO_3 . Исследователи применили методы гравиметрии и потенциодинамической поляризации. Эффективность ингибирования увеличивалась по мере повышения концентрации ингибитора и достигала 84%. Кофеин был исследован как ингибитор коррозии меди в 1,0 М Куаку и др. [82], которые провели измерения потери массы меди при 308-328 К и квантово-химические расчеты. Установлено, что величины Z зависят от концентрации кофеина и температуры. Кроме того, были определены термодинамические параметры, такие как свободная энергия адсорбции ΔG_{ad}^0 , энтальпия ΔH_{ad}^0 и энтропия адсорбции ΔS_{ad}^0 . Максимальная величина Z составила 78% при концентрации кофеина $C_{\text{ин}} = 5$ мМ и 328 К. Процесс коррозии ингибировался за счет адсорбции молекул кофеина на поверхности меди в соответствии с модифицированной изотермой адсорбции Лэнгмюра. Квантово-химические расчеты показали, что адсорбция кофеина в основном концентрируется вокруг гетероатомов (кислорода и азота) в молекуле.

Принимая во внимание литературные источники, видно, что существует много исследований, показывающих, что экстракты растений, используемые в качестве ингибиторов коррозии, уменьшают коррозию меди в экспериментах с HNO_3 . Эти растительные экстракты показаны в таблице 3.

Таблица 3. Различные растительные экстракты как ингибиторы коррозии меди в HNO_3

Экстракт	Среда	Методы	Изотерма адсорбции	Максим. защита, %	Литер. ссылка
Trigonella stellate	1 М HNO_3	гравиметрия, ПДП, СЭИ, EFM, СЭМ	Темкин	90,4	[83]
Strychnos nuxvomica, Piper longum Mucuna	3 М HNO_3	гравиметрия, ПДП, СЭИ, СЭМ, AFM, теоретические расчеты	Ленгмюр	91,60 80,00 71,60	[84]
Capparis spinosa	1 М HNO_3	гравиметрия, ПДП, квантовая химия	Ленгмюр	82,7	[85]
Lupine seeds	2 М HNO_3	гравиметрия, ПДП, EFM, СЭИ	Ленгмюр	95,2	[86]
Calotropis procera	2 М HNO_3	гравиметрия, ПДП, СЭИ, EFM, FT-IR	Темкин	93,9	[87]
Euphorbia geterophlla	0,5 М HNO_3	гравиметрия	Фрумкин	90,10	[88]
Berry leaves	2 М HNO_3	гравиметрия, ПДП, EPM, СЭИ, FT-IR	Темкин	87,93	[89]
Nerium Oleander	0,5 М HNO_3	гравиметрия, электрохимич. методы	Фрумкин	87,10	[90]
Chenopodium	1 М HNO_3	химическ. и электрохим. методы	Ленгмюр	92,0	[91]
Withania somnifera	0,5 М HNO_3	гравиметрия, ПДП, СЭИ, СЭМ	Фрумкин	91,80	[92]
Methanolic myrrh	2 М HNO_3	гравиметрия, ПДП, EFM, СЭИ, СЭМ, FT-IR	Ленгмюр	90,8	[93]

Авторы [94] оценивали экстракт фисташки атлантической как ингибитор коррозии меди и α -латуни в растворе азотной кислоты. Для этой цели использовались измерения потери массы металла, сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и энергодисперсионного рентгеновского излучения (EDX). Показано, что экстракт фисташки атлантической действует как эффективный ингибитор.

В работах [95а, б] было изучено ингибирующее поведение *Gnetum Africana* на коррозии меди в кислых растворах. Фауда и др. [96] исследовали экстракт *Fagonia arabica* как экологически безопасный зеленый ингибитор коррозии меди в среде азотной кислоты. Они использовали в своей работе метод потери массы, потенциодинамическое измерение поляризации, методы спектроскопии электрохимического импеданса СЭИ и СЭМ. Морфологию поверхности металлической меди исследовали с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ) и СЭМ. Установлено, что эффективность ингибитора возрастает с повышением $C_{ин}$. Адсорбция экстракта *Fagonia arabica* описывается уравнением изотермы Флори-Хаггинса.

Об экстракте рисовой соломы как ингибиторе коррозии меди в 2 М растворе HNO_3 сообщилось в статье [97]. Для определения эффективности её в этой функции авторы использовали гравиметрию, электрохимические методы и оценку поверхности меди. Показано, что с увеличением дозы экстракта рисовой соломы (до 300 мг/л) эффективность защиты возросла до 96,8% при 25°C. Адсорбция этого ингибитора соответствует изотермам Ленгмюра и Флори-Хаггинса, она является физической адсорбцией. Авторы [98а] для защиты меди в 1 М HNO_3 использовали в качестве ингибитора коррозии экстракт кожуры *Artocarpus Heterophyllus*. Для определения скорости коррозии они использовали метод потенциодинамической поляризации (ПДП). Они установили, что экстракт кожуры *Artocarpus Heterophyllus* является ингибитором смешанного типа, но близок к ингибиторам анодного типа. Самая высокая эффективность ингибитора $Z=98\%$ при $C_{ин}=800$ мг/л. Его адсорбция описывается уравнением изотермы Фрумкина. В другом исследовании Хэ и другие. изучали ингибирующие коррозионные свойства экстракта листьев *Artocarpus Heterophyllus* в отношении коррозии меди. [98б]. С этой целью были проведены электрохимические эксперименты, исследования на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) и атомно-силовом микроскопе (АСМ). В экспериментах по СЭИ была определена самая высокая эффективность ингибирования $Z=97,3\%$. Адсорбция экстракта на поверхности меди соответствует изотерме адсорбции Ленгмюра.

Растение *Sapindus saponaria* L. [99] испытывали в качестве ингибитора коррозии меди в среде 1 М HNO_3 . Использовали методы потери массы, потенциодинамической поляризации циклического и линейного сканирования, хроноамперометрии и СЭМ. Полученная эффективность ингибирования равна 60% в пересчете на изменение массы и 80% в пересчете на ионы Cu в растворе для концентрации 1000 мг/л.

Аль-Джахдали [100] указал на активную защиту от коррозии Cu в 1 М растворе HNO_3 экстрактом *Rosmarinus officinalis*. В ходе исследования были проведены как экспериментальные, так и теоретические исследования. В экспериментальных испытаниях применялись методы потери массы, ПДП и СЭИ. Самая высокая эффективность защиты $Z=87,6\%$ при концентрации экстракта 300 мг/л. Адсорбция экстракта описывается уравнением изотермы Ленгмюра. С помощью теории функционала плотности (DFT) показано, что это соединение обладает высокой эффективностью ингибирования.

Рамадан и Ахмед [101] исследовали ингибирующее действие экстракта чеснока на коррозию Cu в среде 0,5 М HNO_3 . Они использовали метод гравиметрии для определения защитного действия этого экстракта. Эффективность защиты повышается с увеличением $C_{\text{ин}}$. Самое высокое значение Z составило 87,8% при 400 мг/л экстракта чеснока. Адсорбционные характеристики экстракта на поверхности меди примерно соответствуют изотерме адсорбции Ленгмюра.

Эль-Асри и др. [102] исследовали в качестве эффективного и экологически чистого ингибитора коррозии меди экстракт листьев *Carissa macrocarpa*. Они использовали методы измерения потери массы меди и электрохимические методы для определения параметров коррозии, в дальнейшем морфология поверхности меди, обработанной HNO_3 , была охарактеризована методами СЭМ в сочетании с ЭДС и ИК-Фурье. Кроме того, теоретические исследования на электронном и атомном уровнях проводились с использованием теории функционала плотности электронной структуры (DFT) и Монте-Карло (MC).

3. ЛИТЕРАТУРА

1. F. Bentiss, M. Traisnel and M. Lagrenee, The substituted 1,3,4-oxadiazoles: a new class of corrosion inhibitors of mild steel in acidic media, *Corros. Sci.*, 2000, 42, 127–146. doi: [10.1016/S0010-938X\(99\)00049-9](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(99)00049-9)
2. A. Popova, E. Sokolova, S. Raicheva and M. Christov, AC and DC study of the temperature effect on mild steel corrosion in acid media in the presence of benzimidazole derivatives, *Corros. Sci.*, 2003, 45, 33–58 doi: [10.1016/S0010-938X\(02\)00072-0](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(02)00072-0)
3. S.A. Abd El Maksoud and A.S. Fouda, Some pyridine derivatives as corrosion inhibitors for carbon steel in acidic medium, *Mater. Chem. Phys.*, 2005, 93, 84–90 doi: [10.1016/j.matchemphys.2005.02.020](https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2005.02.020)
4. M. Karakuş, M. Şahin and S. Bilgiç, An investigation on the inhibition effects of some new dithiophosphonic acid monoesters on the corrosion of steel in 1 M HCl medium, *Mater. Chem. Phys.*, 2005, 92, 565–571 doi: [10.1016/j.matchemphys.2005.02.010](https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2005.02.010)
5. S.D. Shetty, P. Shetty and V.S. Nayak, Inhibition of mild steel corrosion in acidic media by N-(2-thiophenyl)-N'-phenyl thiourea, *J. Chil. Chem. Soc.*, 2006, 51, 849–853.
6. R. Hasanov, S. Bilge, S. Bilgiç, G. Gece and Z. Kılıç, Experimental and theoretical calculations on corrosion inhibition of steel in 1 M H₂SO₄ by crown type polyethers, *Corros. Sci.*, 2010, 52, 984–990 doi: [10.1016/j.corsci.2009.11.022](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.11.022)
7. K.F. Khaled, N.S. Abdel-Shafi and N.A. Al-Mobarak, Understanding Corrosion Inhibition of iron by 2- Thiophenecarboxylic Acid Methyl Ester: Electrochemical and Computational Study, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 2012, 7, 1027–1044.
8. A.A. Khadom, Effect of corrosion solution motion on copper-nickel alloy pipe in presence of naphthylamine as a corrosion inhibitor, *J. Mater. Environ. Sci.*, 2013, 4, 510–519
9. Y.G. Avdeev, M.V. Tyurina and Y.I. Kuznetsov, Protection of low-carbon steel in phosphoric acid solution by mixtures a substituted triazole with sulfur-containing compounds, *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, 2014, 3, no. 4, 246–253 doi: [10.17675/2305-6894-2014-3-4-246-253](https://doi.org/10.17675/2305-6894-2014-3-4-246-253)
10. V.P. Grigor'ev, E.V. Plekhanova, E.E. Verbitskaya and L.D. Popov, The inhibitive effects of 8-mercaptoquinoline and its iron chelate complex in the acid corrosion of iron in 1 M HCl, *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, 2014, 3, no. 4, 215–226. doi: [10.17675/2305-6894-2014-3-4-215-226](https://doi.org/10.17675/2305-6894-2014-3-4-215-226)
11. A. Khadraoui, A. Khelifa, K. Hachama, H. Boutoumi and B. Hammaouti, Synergistic effect of potassium iodide ion controlling the corrosion of steel in acid medium by Mentha pulegium extract, *Res. Chem. Intermed.*, 2015, 41, 7973–7980. doi: [10.1007/s11164-014-1870-8](https://doi.org/10.1007/s11164-014-1870-8)
12. A. Nnanna and I.O. Owate, Electrochemical study of corrosion inhibition of mild steel in acidic solution using Gnetum africana leaves extract, *Br. J. Appl. Sci. Technol.*, 2015, 5, 556–567.
13. S. Mo and H.Q. Li, N.B. Li, Plant extracts as green corrosion inhibitors for steel in sulphuric acid, *Chem. Pap.*, 2016, 70, 1131–1143 doi: [10.1515/chempap-2016-0055](https://doi.org/10.1515/chempap-2016-0055)

14. S.A. Adzor and B.O. Udaye, Corrosion Inhibitive Effects of Coconot (*Cocus Nucifera* Linn) Water for Mild Steel in Acidic Medium, *Eur. J. Mater. Sci.*, 2016, 3, 1–12.
15. A. Khadraoui, A. Khelifa, H. Bautomi, Y. Karzazi, B. Hammouti and S.S. Al-Deyab, The Oil from *Mentha Rotundifolia* as Green Inhibitor of Carbon Steel Corrosion in Hydrochloric Acid, *Chem. Eng. Commun.*, 2016, 203, 270–277 doi: [10.1080/00986445.2014.993469](https://doi.org/10.1080/00986445.2014.993469)
16. E. Dharmaraj, C. Paragathiswaran, P. Govinthan, P.A. Sahayaraj, A.J. Amalraj and V. Dharmalingam, Corrosion Inhibition of Mild Steel by Plant Extracts in Acid Media, *Int. J. Nano. Corr. Sci. Engg.*, 2017, 4, 106–120.
17. H. Louis, J. Japari, A. Sadia, M. Philip and A. Bamanga, Photochemical screening and corrosion inhibition of *Poupartia birrea* back extracts as a potential green inhibitor for mild steel in 0.5 M H₂O₄ medium, *World News Nat. Sci.*, 2017, 10, 95–100.
18. M. Rana, S. Joshi and J. Bahattaraj, Extract of different plants Nepalese origin as Green Corrosion Inhibitor for Mild Steel in 0.5 M NaCl Solution, *Asian J. Chem.*, 2017, 29, 1130–1134. doi: [10.14233/ajchem.2017.20449](https://doi.org/10.14233/ajchem.2017.20449)
19. N.B. Iroha and M.A. Chidiebere, Evaluation of the Inhibitive effect of *Annona Muricata*. L Leaves Extract on Low-Carbon Steel Corrosion in Acidic Media, *Int. J. Mater. Chem.*, 2017, 7, 47–54.
20. R. Haldhar, D. Prasad and A. Saxena, *Myristica fragrans* extract as an eco-friendly corrosion inhibitor for mild steel in 0.5 M H₂SO₄ solution, *J. Environ. Chem. Eng.*, 2018, 6, 2290–2301 doi: [10.1016/j.jece.2018.03.023](https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.03.023)
21. R. Haldhar, D. Prasad and A. Saxena, *Armoracia rusticana* as sustainable and ecofriendly corrosion inhibitor for mild steel in 0.5 M sulphuric acid: experimental and theoretical investigations, *J. Environ. Chem. Eng.*, 2018, 8, 5230–5238 doi: [10.1016/j.jece.2018.08.025](https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.08.025)
22. N.H.Z. Leena, Hukuman, A.R.Biju and M.Jisha, Studies on Methanolic Extract of *Lepidagathis keralensis* as Green Corrosion Inhibitor for Mild Steel in 1M HCl, *J. Electrochem. Sci. Technol.*, 2019, 10, 231–243 doi: [10.5229/JECST.2019.10.2.231](https://doi.org/10.5229/JECST.2019.10.2.231)
23. Y. Fang, B. Suganthan and R.P. Ramasamy, Electrochemical characterization of aromatic corrosion inhibitors from plant extracts, *J. Electroanal. Chem.*, 2019, 840, 74–83. doi: [10.1016/j.jelechem.2019.03.052](https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2019.03.052)
24. A. Zaher, A. Chaouiki and M. Ouhssine, Inhibition of Mild Steel Corrosion in 1 M Hydrochloric Acid Medium by the Methanolic extract of *Ammi visnaga* L. Sam Seeds, *Int. J. Corros.*, 2020, 9764206 doi: [10.1155/2020/9764206](https://doi.org/10.1155/2020/9764206)
25. K.V. Thomas, K.J. Thomas, P.V. Rapheal, A.S. Sabu, K. Ragi and R. Johnson, *Tinospora cordifolia* extract as an environmentally benign green corrosion inhibitor in acid media: electrochemical, surface morphological, quantum chemical, and statical investigations, *Mater. Today Sustain.*, 2021, 13, 100076 doi: [10.1016/j.mtsust.2021.100076](https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2021.100076)
26. M.E.H.N. Tehrani, P. Ghahremani, M. Ramezanzadeh, G. Bahlakeh and B. Ramezanzadeh, Theoretical and experimental assessment of a green corrosion inhibitor extracted from *Malva sylvestris*, *J. Environ. Chem. Eng.*, 2021, 9, 105256 doi: [10.1016/j.jece.2021.105256](https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105256)

27. M. Abdallah, M. Alfakeer, M. Alshareef, H. Hawsawi, S.S. Al-Juaid, R.S. Abdelhameed and M. Sobhi, Natural Sweet Almond Oil as an Effective Green Inhibitor for Aluminum Corrosion in Sulfuric Acid Medium, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 2022, 17, 220949 doi: [10.20964/2022.09.18](https://doi.org/10.20964/2022.09.18)
28. M.R. Rathod, S.K. Rajappa, R.I. Minagalaver, B.M. Praveen, B.K. Devendra and A.A. Kittur, Investigation of African mangosteen leaves extract as an environmentfriendly inhibitor for low carbon steel in H₂SO₄, *Inorg. Chem. Commun.*, 2022 140, 109488 doi: [10.1016/j.inoche.2022.109488](https://doi.org/10.1016/j.inoche.2022.109488)
29. O.A. Hatem, Computational and Experimental evaluation of Inhibition Potential of a New Ecologically Friendly Inhibitor Leaves of Date Palm (*Phoenix dactylifera* L.) for Aluminium Corrosion in an acidic Media, *Int. J. Corros.*, 2022, 5953561 doi: [10.1155/2022/5953561](https://doi.org/10.1155/2022/5953561)
30. G.K. Shamnamol, J. Sam and M.J. Jaya, Experimental and theoretical evidence for effective corrosion mitigation in mild steel using *Garcinia gummi-gutta* leaf extract, *Anti-Corros. Methods Mater.*, 2022, 69, 540–549 doi: [10.1108/ACMM-03-2022-2630](https://doi.org/10.1108/ACMM-03-2022-2630)
31. J.R.T. Hernandez, E.D.A. Meraz and E.F. Corvo Perez, *Tradescantia spathacea*: New green corrosion inhibitor for SAE 1010 steel in acid medium, *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, 2023, 12, 61–83 doi: [10.17675/2305-6894-2023-12-1-4](https://doi.org/10.17675/2305-6894-2023-12-1-4)
32. X. Wang, Q. Zhang, H. Jiang, Y. Gu, X. Li and L-l. Xu, *Pueraria lobata* leaf extract as green corrosion inhibitor for low carbon steel in 1.0 M HCl solution, *Res. Chem. Intermed.*, 2021, 47, 1051–1069 doi: [10.1007/s11164-020-04316-3](https://doi.org/10.1007/s11164-020-04316-3)
33. J.S. Chauhan, Anticorrosion behaviour of *Zenthoxylum alatum* Extract in Acidic Media, *Asian J. Chem.*, 2009, 21, 1975–1978.
34. U.K. Garg, V. Kumpawat, R. Chauhan and R.K. Tak, Corrosion inhibition of copper by natural occuring plant *Acacia senegal*, *J. Ind. Chem. Soc.*, 2011, 88, 513–519
35. R.D. Syarif and S.P. Suryadarma, Utilization of Natural Tannin Extract for Copper Corrosion Inhibitor in Hydrochloric Solution, *Chem. Mater. Res.*, 2015, 7, 76–80
36. M. Shabani-Nooshabadi, S.F. Hereiny and Y. Jafari, Green Approach to Corrosion Inhibition of Copper by the Extract *Calligonum comosum* in Strong Acid Medium, *Metal. Mater. Trans. A*, 2015, 46, 293–299
37. K.W. Swami, D. Sharma and S. Kumar, Corrosion inhibition of copper by acid of *Tecomella undulata*, *Int. J. Chem. Sci*, 2013, 11, 1457–1463.
38. J.S. Chauhan, and D.K. Gupta, The anti-corrosive characteristic of Betalains (*Bougainvillea* flower extract), *Elixir Corrosion & Dye*, 2015, 80, 30781–30784
39. A. Sharma, A. Varshney and S. Varshney, *Sesum indicum* Oil as a Potential Inhibitor for the Corrosion of Copper in Acidic Environment, *Orient. J. Chem.*, 2016, 32, 2769–2775 doi: [10.13005/ojc/320551](https://doi.org/10.13005/ojc/320551)
40. B. M.Maibulangu, M.B. Ibrahim and L.K. Akinola, Inhibitory Effect of African Pumpkin (*Momordica balsamina* Linn) Leaf Extract on copper corrosion in acidic media, *J. App. Sci. Environ. Manage*, 2017, 21, 1067–1071 doi: [10.4314/jasem.v21i6.12](https://doi.org/10.4314/jasem.v21i6.12)

41. P.S. Pratihari and J. Rawat, Corrosion Inhibition of Copper Metal by Prosopis Cineraria Leaves as Green Corrosion Inhibitor in Acidic Medium, *Int. J. Res. Appl. Sci. Engg. Tech.*, 2017, 5, 2412–2421.
42. R.K. Ahmed and S. Zhang, Bee pollen extract as an eco-friendly corrosion inhibitor for pure copper in hydrochloric acid, *J. Mol. Liq.*, 2020 316, 113849 doi: [10.1016/j.molliq.2020.113840](https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113840)
43. A. Jmiami, B. El-Ibrahimi, A. Tara, M. Chadili, S.El- Issami, O. Jbara, A. Khallaayoun and L. Bazzi, Application of Zizyphus Lotuse-pulp of Jujube extract as green and promising corrosion inhibitor for copper in acidic medium, *J. Mol. Liq.*, 2018, 268, 102–113 doi: [10.1016/j.molliq.2018.06.091](https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.06.091)
44. A. Büyüksağis and M. Dilek, The use of Papever somniferum L Plant Extract as Corrosion Inhibitor, *Prot. Met. Phy. Chem. Surf.*, 2019, 55, 1182–1194 doi: [10.1134/S2070205119060042](https://doi.org/10.1134/S2070205119060042)
45. a. A. Samontha and K. Lugsanangarm, Corrosion Inhibition and adsorption mechanism of Eugenol on Copper in HCl Medium, *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.*, 2019, 55, 187–194 doi: [10.1134/S2070205119010192](https://doi.org/10.1134/S2070205119010192); b. A. Samontha and N. Jitsamak, Effect of temperature on Inhibition efficiency of Eugenol for Copper Corrosion, *Life Sci. Environ. J.*, 2019, 20, 165–171
46. A. Jmiai, A. Tara, S. El-Issami, M. Hilali, O. Jbara and L. Bazzi, A new trend in corrosion protection of copper in acidic medium by using Jujube shell extract as an effective green and environmentally safe corrosion inhibitor: Experimental, quantum chemistry approach and Monte Carlo simulation study, *J. Mol. Liq.*, 2021, 332, 114509 doi: [10.1016/j.molliq.2020.114509](https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114509)
47. R. Ahmed and S. Zhang, Alchemilla Vulgaris Extract as Green Inhibitor of Copper Corrosion in Hydrochloric Acid, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 2019, 14, 10657–10669 doi: [10.20964/2019.11.43](https://doi.org/10.20964/2019.11.43)
48. M. Shabani-Nooshabadi, F.S. Hoseiny and Y. Jafari, Corrosion Inhibition of Copper by Ephedra sarcocarpa Plant Extract as Green Corrosion Inhibitor in Strong Acid Medium, *Anal. Bioanal. Electrochem.*, 2014, 6, no. 3, 341–354
49. M.A. Deyab, Egyptian licorice extract as a green corrosion inhibitor for copper in hydrochloric acid solution, *J. Ind. Eng. Chem.*, 2015, 22, 384–389 doi: [10.1016/j.jiec.2014.07.036](https://doi.org/10.1016/j.jiec.2014.07.036)
50. a. H. Kalada and A.O. James, The inhibitive effect of Aloe vera Barbadensis Gel on copper in Hydrochloric acid medium, *J. Emerging Trends Eng. Appl. Sci.*, 2014, 5, 24–49; b. K. Hart and A.O. James, Corrosion Inhibition of Copper in Hydrochloric Acid and Tetraoxosulphate (VI) Acid Solutions Using Aloe Vera Barbadensis Gel, *Br. J. Appl. Sci. Technol.*, 2014, 4, 4052–4065.
51. S. Yadav and A. Sharma, Effect of temperature on protective propensity of Acacia nilotica on acid corrosion of copper, *Rev. Res.*, 2013, 2, 1–15

52. a. A.M. Shah, A.A. Rahim, S. Yahya, PB. Raja and S.A. Hamid, Acid corrosion inhibition of copper by mangrove tannin, *Pigm. Resin Technol.*, 2011, 40, 118–122 doi: [10.1108/03699421111113783](https://doi.org/10.1108/03699421111113783); b. A.M. Shah, A.A. Rahim, S.A. Hamid and S. Yahya, Green Inhibitors for Copper Corrosion by Mangrove Tannin, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 2013, 8, 2140–2153.
53. S. Yadav, G. Chaudhary and A. Sharma, Green approach to corrosion inhibition of aluminium and copper by Ziziphus mauritiana fruit extract in hydrochloric acid solution, *Int. J. Chem. Tech. Res.*, 2013, 5, 1815–1823.
54. S. Yadav, A. Sharma, G. Chaudhary, Monika and A. Sharma, Inhibitive and adsorption properties of Ethanolic Extract of fruit Azadirachta indica on the corrosion of copper in HCl, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2014, 3, 16127–16136 doi: [10.15680/IJIRSET.2014.0309048](https://doi.org/10.15680/IJIRSET.2014.0309048)
55. L. Cai, Q. Fu, R. Shi, Y. Tang, Yi-Tao Long, Xiao-Peng He, Y. Jin, G. Liu, Guo-Rang Chen and K. Chen, Purgent Copper Surface Resists Acid Corrosion in Strong HCl Solutions, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2013, 53, 64–69. doi: [10.1021/ie402609g](https://doi.org/10.1021/ie402609g)
56. P. Deivanayagam, I. Malarvizhi and S. Selvaraj, Wrightia tinctoria leaves extract as effective corrosion inhibitor on copper in acid environment, *Int. J. Chem. Pharm. Anal.*, 2016, 3, 969
57. R.S. Oguike, O. Oni1, A.U. Barambu, D. Balarak, Ch.U. Okeke, L.S. Momoh, S. Onimisi, W.J. Nwada and T. Buba, Computational Stimulation and Experimental Study on Corrosion Inhibition Qualities of Emilia sonchifolia Leaf Extract for Copper (CU131729) in Hydrochloric Acid, *Comput. Chem.*, 2021, 09, 18–36 doi: [10.4236/cc.2021.91002](https://doi.org/10.4236/cc.2021.91002)
58. P.S. Pratihari, M.P.S. Verma and A. Sharma, Capparis decidua seeds: potential green inhibitor to combat acid corrosion of copper, *Rasayan J. Chem.*, 2015, 8, 411–421
59. A. Bright, M.R. Maragatham, I.M. Vizhi, K.Dr. Kalirajan and S.Dr. Selvaraj, Corrosion Inhibition of Pure Copper Using Pisonia Grandis Leaves Extract in Acid Environment, *Int. J. Curr. Res.*, 2015, 7, 20566–20573.
60. M.S. Rani and C. Subha, Adsorption and Inhibitive Properties of Coccinia Grandis Fruit Extract as Green Corrosion Inhibitor for Copper in acid Media, *J. Emerging Trends Eng. Appl. Sci.*, 2019, 9, 63–73
61. N. Kavitha, J. Ravichandran and A.M. Urugesh, An Eco-friendly Leucas Aspera Leaves Extract Inhibitor for Copper Corrosion in Hydrochloric Acid Medium, *J. Bio- and TriboCorros.*, 2020, 6, 103 doi: [10.1007/s40735-020-00400-8](https://doi.org/10.1007/s40735-020-00400-8)
62. R.H. Ahmed and S.Zhang, Atriplex leucoclada extract: A promising eco-friendly anticorrosive agent for copper in aqueous media, *J. Ind. Eng. Chem.*, 2021, 99, 334–343 doi: [10.1016/j.jiec.2021.04.042](https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.04.042)
63. S. Kathiravan, S. Jathi, G. Ayyannan, J. Ravichandran and G. Raja, Inhibitory action of aqueous Ruellia Tuberosa L leaves extract on the corrosion of copper in HCl solution, *J. Ind. Chem. Soc.*, 2021, 98, 100207 doi: [10.1016/j.jics.2021.100207](https://doi.org/10.1016/j.jics.2021.100207)

64. O.A. Odunlami, O.S. Fayomi, I.O. Elendu and J.O. Ojediran, Zea Mays surfactant as corrosion inhibition of Copper and its Electrochemical Assessment in hot Acidic Solution for Chemo-Mechanical Application, *Mater. Sci Forum*, 2022, 1050, 81–91 doi: [10.4028/www.scientific.net/MSF.1050.81](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1050.81)
65. A. Diab and S.M. Abd El-Haleem, Corrosion Inhibition of copper in Acidic Solution by using a Natural Product as Henna (*Lawsonia inermis* L) Extract, *Egypt. J. Chem.*, 2022, 65, 103–111.
66. F. Kaya, R. Solmaz and İ.H. Geçibesler, The Use of Rheum Ribes (ıřgın) Extracts for Copper Protection in Acidic Media, *Türk Doęa ve Fen Dergisi*, 2022, 11, 94–101 (in Turkish) doi: [10.46810/tdfd.1166367](https://doi.org/10.46810/tdfd.1166367)
67. R. Thivagaran, N. Salim and N.H. Abu Bakar, Ethanolic Mangifera Indica Leaves Extract as Green Corrosion Inhibitor, *J. Adv. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.*, 2023, 29, 228–234 doi: [10.37934/araset.29.3.228234](https://doi.org/10.37934/araset.29.3.228234)
68. a. T.V. Sangeetha and M. Fredimoses, Inhibition of Mild Copper Metal Corrosion in HNO₃ Medium by Acid Extract of Azadirachta Indica seed, *E-J. Chem.*, 2011, 8, 135952 doi: [10.1155/2011/135952](https://doi.org/10.1155/2011/135952); b. K.K. Patel and R.T. Vashi, Azadirachta Indica Extract as Corrosion Inhibitor for Copper in Nitric Acid Medium, *Res. J. Chem. Sci.*, 2015, 5, 59–66; c. L. Mitu, R. Rubavathi, M. Subramani, T. Linda and S. Balakumar, Azadirachta indica Leaf as a Corrosion Inhibitor for Copper in Nitric Acid, *Rev. Chim*, 2019, 70, 581–584 doi: [10.37358/RC.19.2.6960](https://doi.org/10.37358/RC.19.2.6960)
69. N. Ogborna, C.M. Matthew and D.O. Okechukwu, Inhibition of copper corrosion by acid extracts of Gnetum africana and Musa acuminate peel, *Int. J. Multidiscip. Sci. Eng.*, 2011, 2, 5–9
70. S. Houbani, M. Essahli and A. Lamiri, Inhibition of Copper Corrosion in 2 M HNO₃ by the Essential Oil of Tyme Morocco, *Port. Electrochim. Acta*, 2013, 31, 221–233 doi: [10.4152/pea.201304221](https://doi.org/10.4152/pea.201304221)
71. A.S. Fouda, K. Shalabi and A.A. Idress, Thymus Vulgarise Extract as Nontoxic Corrosion Inhibitor for Copper and α -Brass in 1 M HNO₃ Solutions, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 2014, 9, 5126–5154
72. S. Houbairi, A. Lamiri and M. Essahli, Oil Ricinus communis for Copper in 2 M Nitric Acid Solution, *Int. J. Eng. Res. Sci. Technol.*, 2014, 3, 698–707
73. A.S. Fouda, Y.M. Abdallah, G.Y. Elawady and R.M. Ahmed, Zygophyllum coccineum L Extract as green corrosion inhibitor for copper in 1M HNO₃ solutions, *Int. J. Adv. Res.*, 2014, 2, 517–531.
74. S. Fouda, K. Shalabi and A.A. Idress, Ceratonia siliqua extract as a green corrosion inhibitor for copper and brass in nitric acid solutions, *Green Chem. Lett. Rev.*, 2015, 8, 17–29 doi: [10.1080/17518253.2015.1073797](https://doi.org/10.1080/17518253.2015.1073797)
75. R.M. Younis, H.M. Hassan, R.A. Mansour and A.M. El-desoky, Corrosion Inhibition of Carapichea Ipecacuanha Extract (CIE) on Copper in 1 M HNO₃ Solution, *Int. J. Sci. Eng. Res.*, 2015, 6, 761–770

76. Y.M. Abdallah and K. Shalabi, Comprehensive study of the Behavior of Copper Inhibition in 1 M HNO₃ by Euphorbia Helioscopia linn. Extract as Green inhibitor, *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.*, 2015, 51, 275–284 doi: [10.1134/S2070205115020021](https://doi.org/10.1134/S2070205115020021)
77. A.M. Eeldesoky, A.S. Fouda, G.E. Bekheit and N.S. Elsheikh, Adsorption and Corrosion Inhibition of Alkanna Tincotria Extract (ATE) on Copper in 1 M HNO₃ Solution, *Int. J. Adv. Res.*, 2015, 3, 991–1007
78. Y.M. Abdallah, G.Y. Elawady and R.M. Ahmed, Electrochemical study on the effectively of Hyoscyamus muticus extract as a green inhibitor for corrosion of copper in 1 M HNO₃, *J. Mater. Environ. Sci.*, 2014, 5, 1519–1531
79. Savita, P. Mourya, N. Chaubey, V.K. Singh and M.M.S. Singh, Eco-Friendly Inhibitors for Copper Corrosion in Nitric Acid: Experimental and Theoretical Evaluation, *Metal. Mater. Trans. B*, 2015, 47, 47–57 doi: [10.1007/s11663-015-0488-6](https://doi.org/10.1007/s11663-015-0488-6)
80. N.C. Savita, M. Punita, V.K. Singh and M.M. Singh, Fruit extract as green inhibitor for copper corrosion in Nitric acid solution, *Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Tech*, 2015, 4, 4545–4553
81. B. Aicha, H. Mustapha, B. Lahcen, E. Souad and Z. Hanene, Study of Copper Corrosion Inhibition by the Mineralization of the Red Alga Gellidium in Nitric Acid Investigated by Chemical and Spectroscopic Techniques, *Amer. J. Innov. Res. Appl. Sci.*, 2018, 7, 159–168
82. V. Kouakcu, P.M. Niamien, A.J. Yapo, S. Diaby and A. Trokourey, Experimental and DFT Studies on the behavior of Caffeine as Effective Corrosion inhibitor of Copper in 1M HNO₃, *Orbital: Electro. J. Chem.*, 2016, 8, 66–79. doi: [10.17807/orbital.v8i2.804](https://doi.org/10.17807/orbital.v8i2.804)
83. A.S. Fouda, A.E. Mohamed and M.A. Khalid, Trigonella stellate extract as corrosion inhibitor for copper in 1M HNO₃ solution, *J. Chem. Pharm. Res.* 2016, 8, 86–98
84. S. Savita, P. Mourya, N. Chaubey, S. Kumar, V.K. Singh and M. M. Singh, Strychnos nuxvomica, Piper longum and Mucuna pruriens seed extracts as eco-friendly corrosion inhibitors for copper in nitric acid, *RSC Adv*, 2016, 6, 95644–95655. doi: [10.1039/c6ra16481a](https://doi.org/10.1039/c6ra16481a)
85. F.Z. Al-Wediar, M.A. Qudah and G.M. Al-Mazaideh, Corrosion Inhibition of Copper by Capparis spinosa L. extract in Strong acid Medium: Experimental and Density Functional Theory, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 2017, 12, 4664–4676. doi: [10.20964/2017.06.47](https://doi.org/10.20964/2017.06.47)
86. A.S. Fouda, S.H. Etaiw, D.M.A. El-Aziz and O.A. Elbaz, Synergistic effect of barium chloride on corrosion inhibition of copper by aqueous extract of lupine seeds in nitric acid, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 2017, 12, 5934–5950. doi: [10.20964/2017.07.08](https://doi.org/10.20964/2017.07.08)
87. A.S. Fouda, A.A. Aal and E.A. Haleem, Calotropis Procera Extract (CPE) as Corrosion Inhibitor for Copper in Nitric Acid Medium, *Bull. Fac. Sci., Zagazig Univ.*, 2017, 39, 204–227
88. A.S. Fouda, M.A. Elmorsi and B.S. Abou-Elmagd, Adsorption and inhibitive properties of Methanol extract of Euphorbia heterophylla for the corrosion of copper in 0.5 M nitric acid solutions, *Pol. J. Chem. Technol.*, 2017, 19, 95–103. doi: [10.1515/pjct-2017-0014](https://doi.org/10.1515/pjct-2017-0014)

89. A.S. Fouda and E.A. Haleem, Berry Leaves Extract as Green Effective Corrosion Inhibitor for Cu in Nitric Acid Solutions, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2018, **54**, 498–507
90. A.S. Fouda and H.M. Elabbasy, Corrosion Inhibition Effect of Methanol Extract of Nerium Oleander on Copper in Nitric Acid Solutions, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 2019, **14**, 6884–6901. doi: [10.20964/2019.07.31](https://doi.org/10.20964/2019.07.31)
91. M.M. Motavea, A. El-Hossiany and A.S. Fouda, Corrosion Control of Copper in Nitric Acid Solution Using Chenopodium Extract, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 2019, **14**, 1372–1387. doi: [10.20964/2019.02.29](https://doi.org/10.20964/2019.02.29)
92. H.M. Elabbasy, Investigation of Withania somnifera Extract as Corrosion Inhibitor for Copper in Nitric Acid Solutions, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 2019, **14**, 5355–5372. doi: [10.20964/2019.06.23](https://doi.org/10.20964/2019.06.23)
93. S.Y. Al-Nami and A.S. Fouda, Corrosion Inhibition Effect and Adsorption Activities of methanolic myrrh extract for Cu in 2 M HNO₃, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 2020, **15**, 1187–1205. doi: [10.20964/2020.02.23](https://doi.org/10.20964/2020.02.23)
94. A.A. Idress and A.S. Fouda, Investigation of the inhibition of copper and α -brass corrosion in nitric acid solutions by Pistacia atlantica extract, *The Third Int. Conf. Basic Sci. & Their Appl.*, June 2019, Omar Al-Mukhtar Univ, El-Beida-Libya. <https://doi.org/10.53555/eijas.v6i2.97>
95. a. O.C. Nkuzinna, M.C. Menkiti, O.D. Onukwuli, G.O. Mbah, B.I. Okolo, M.C. Egbujor and R.M. Government, Application of Factorial Design of Experiment for Optimization of Inhibition Effect of Acid Extract of Gnetum africana on Copper Corrosion, *Nat. Resour.*, 2014, **5**, 299–307. doi: [10.4236/nr.2014.57028](https://doi.org/10.4236/nr.2014.57028); b. J. Saka, O.N. Ahmed and A.S. Adekunle, On the use of factorial experiments for optimizing inhibition effect of acid extract of Gnetum Africana on copper corrosion, *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, 2020, **9**, no. 1, 284–299. doi: [10.17675/2305-6894-2020-9-1-18](https://doi.org/10.17675/2305-6894-2020-9-1-18)
96. Abd El-Aziz Fouda, Abd-El Moneim, M. Ahmed, S.M. El-Danier and S.E. Badr, Fagonia arabica extract as a save-environment green corrosion inhibitor for Cu in HNO₃, *J. Chin. Chem. Soc.*, 2021, **68**, 1445–1455. doi: [10.1002/jccs.202000571](https://doi.org/10.1002/jccs.202000571)
97. M.I. El-Tantawy, H.S. Gadow, I.G. Rashed, Abd El-Aziz and S. Fouda, Inhibition of Copper Corrosion by Rice Straw Extract in 2 M Solution of Nitric Acid, *Biointerface Res. App. Chem.*, 2022, **12**, 83–104. doi: [10.33263/BRIAC121.083104](https://doi.org/10.33263/BRIAC121.083104)
98. a. I. Kusumaningrum, R. Soenoko, E. Siswanto and F. Gapsari, Investigation of Artocarpus Heterophyllus peel extract as non –toxic corrosion inhibitor for pure copper protection in nitric acid, *Case Stud. Chem. Environ. Eng.*, 2022, **6**, 100223. doi: [10.1016/j.cscee.2022.100223](https://doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100223); b. J. He, Q. Xu, Q. Li, R. Marzouki and W. Li, Insight into the corrosion inhibition property of Artocarpus heterophyllus Lam leaves extract, *J. Ind. Eng. Chem.*, 2021, **102**, 260–270. doi: [10.1016/j.jiec.2021.07.007](https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.07.007)
99. M.F.A.de Alencar, R. da S.G. Alves, J.L. Cardoso and M.J.S. Maura, Evaluation of Sapindus saponaria L extract as an acid medium corrosion inhibitor, *Materia*, 2022, **27**. doi: [10.1590/S1517-707620220002.1378](https://doi.org/10.1590/S1517-707620220002.1378)

100. B.A. Al Jahdaly, Rosmarinus officinalis extract as eco- friendly corrosion inhibitor for copper in 1 M nitric acid solution: Experimental and theoretical studies, *Arabian J. Chem.*, 2023, **16**, 104411. doi: [10.1016/j.arabjc.2022.104411](https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.104411)
101. N.S.M. Ramadan and Z.W. Ahmed, Effect of garlic extract as corrosion inhibitor for copper in acidic medium, *Eurasian Chem. Commun.*, 2023, **5**, 28–36. doi: [10.22034/ecc.2023.348732.1493](https://doi.org/10.22034/ecc.2023.348732.1493)
102. A. El-Asri, M.M. Rguiti, A. Jmiai, R. Oukhrib, H. Bourzi, Y. Lin and S. El Issami, Carissa macrocarpa extract (ECM) as a new efficient and ecologically friendly corrosion inhibitor for copper in nitric acid: Experimental and theoretical approach, *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, 2023, **142**, 104633.

Abstract

One of the corrosion prevention methods is to add chemical compounds called inhibitors in corrosive environments. Inhibitors can be inorganic or organic compounds. However, these compounds are dangerous for human health and environment because of their toxicity effects. In addition to obtain them is difficult and expensive. For this reason, corrosion inhibitors that are non-toxic, biocompatible, not harmful to human health and the environment, and which can be obtained easily and cheaply, are the subject of many researches in recent years. Scientists have focused on a new class of inhibitors such as plant extracts, fruit and vegetable extracts and essential oils. Plant extracts are the most studied class of these inhibitors, called green inhibitors. The protection effects of plant extracts are due to the adsorption of their molecules on the metal surface. They provide the metal with a protective film by blocking the active sites. The formation of film provides the metal surface with a physical barrier from corrosive media, and supplies protection effects from corrosive attacks. Copper is noble metal and as a result of this property, it shows to resist against to corrosion. However, certain conditions can cause corrosion on copper, such as polluted air, oxidizing acids, oxidizing heavy metal salts, sulfur ammonia and some sulfur and ammonia compounds. Therefore, the investigation of copper corrosion is significant. In this review, studies are summarized with plant extracts, which have an inhibitory effect on the corrosion of copper.

Keywords: *corrosion, copper, inhibitor, plant extracts*