

УДК 620.197.3

ОЦІНКА ПРОТИКОРОЗІЙНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСТРАКТУ ВИЧАВОК АБРИКОСА В НЕЙТРАЛЬНОМУ ВОДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

В. І. ВОРОБІЙОВА, О. Е. ЧИГИРИНЕЦЬ, Ю. Ф. ФАТЄЄВ

*Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"*

Як новий екологічно безпечний інгібітор корозії сталі в нейтральному водному середовищі досліджено екстракт вичавок абрикоса (ЕВА). Встановлено, що ефективність його протикорозійного захисту у 0,5 М розчині NaCl зростає з підвищенням концентрації ЕВА та часу експозиції. Масометричними та електрохімічними методами виявлено, що плівка на поверхні сталі формується поступово з часом (~48 h), її товщина – понад 800 nm. Морфологію захисної плівки вивчено методами растрової електронної та атомно-силової мікроскопії. Хімічний склад досліджено методом ІЧ-спектроскопії.

Ключові слова: *корозія, сталь, "зелені" інгібітори, ізопропанольний екстракт, вичавки абрикоса.*

An apricot pomace extract (APE) has been studied as a novel and eco-friendly inhibitor of steel corrosion in sodium chloride solution. It has been found that the effectiveness of corrosion protection of steel in the 0.5 M NaCl solution with APE increases with its concentration and immersion time. Gravimetric measurements and electrochemical methods show that the process of film formation on the steel surface has a prolonged character (~48 h), the thickness of the protective film is more than 800 nm. The morphology of the protective film is investigated by scanning electron microscopy and atomic force microscopy (AFM). The chemical composition of the protective film is investigated by FT-IR spectroscopy.

Keywords: *corrosion, steel, "green" inhibitor, isopropanol extract, apricot pomace.*

Вступ. Однією із ключових у розвитку сучасної галузі хімічного опору матеріалів та захисту металів від корозії є концепція екологізації та впровадження "зелених" технологій [1–4]. Тому пріоритетний напрямок досліджень у світі – розвиток інноваційних, енерго- та ресурсозберігальних методів вилучення "зелених" (фітохімічних) сполук з відходів харчової промисловості або перероблення рослинної сировини та одержання засобів протикорозійного захисту на їх основі [1–10]. З іншого боку, проблематичною є селективність протикорозійної дії традиційних інгібіторів корозії у певному корозивному середовищі (нейтральному, кислому, лужному або в умовах атмосферної корозії), що обумовлено найчастіше використанням хімічно синтезованих індивідуальних сполук або двох/трьох компонентних сумішей з урахуванням особливостей механізму корозійної дії в агресивному середовищі. Водночас відходи харчової (рослинної промисловості) є джерелом суміші органічних сполук різних класів (поліфенольні сполуки, альдегіди, кетони, монотерпенові сполуки тощо), що за цілеспрямованого вибору розчинника (системи розчинників) може забезпечити мультифункціональність протикорозійного захисту у різних корозивних середовищах. Останнім часом увага науковців зосереджена на "зелених" інгібіторах та на оцінці їх поліфункціональної дії [1, 11–14].

Нижче досліджено перспективність валоризації відходів плодово-ягідної промисловості – вичавки абрикоса для розроблення засобів протикорозійного захисту. Вивчено компонентний склад екстракту вичавок абрикоса (ЕВА)[15] та встановлено його ефективність. Методом газової хромато-мас-спектрометрії виявлено, що в його складі домінують альдегіди, кетони, терпенові спирти, моно-терпенові феноли та естери. Досліджено також інгібувальну дію ізопропанольного ЕВА як легкого інгібітора атмосферної корозії сталі [16]. Особливістю протикорозійної дії екстрактивних компонентів рослинного екстракту є тривалий період формування захисної плівки. Проте механізм підвищення її ефективності недостатньо зрозумілий. Тому досліджували механізм формування в часі захисної плівки в нейтральному водному розчині ізопропанольного ЕВА.

Методика випробування. ЕВА готували шляхом екстрагування подрібненої сировини в апараті Сокслета ізопропіловим спиртом. Компонентний склад екстракту детально вивчений [15, 16]. Його протикорозійну ефективність в корозивному водному середовищі оцінювали масометричним методом за ГОСТ 9.502-82, використовуючи сталь марки Ст3 (ДСТУ 2651:2005). Корозивним середовищем слугував водний розчин 0,5 М NaCl. Ефективність інгібувальної дії визначали, розраховуючи ступінь захисту від корозії та ступінь заповнення поверхні інгібітором [1–4]. Кінетику формування захисної плівки досліджували двома методами. Спочатку неперервно встановлювали під час експерименту швидкість корозії трьох давачів ДК-1, підключених до системи автоматизованого корозійного моніторингу (САКМ-1) [17]. Швидкість корозії за методом поляризаційного опору вимірювали корозиметром СІК-3, що працює за гальваностатичним принципом. В ньому реалізовано двоступінчастий метод вимірювання, що дає можливість визначати швидкість корозії за значних електродних ємностей на електродах давача [18].

Далі для вивчення кінетики формування плівки знімали циклічні вольтамперограми (ЦВА) на поверхні скловуглецевого електрода (щоб нівелювати вплив поверхні металу на формування захисного шару органічних сполук екстракту) [19]. Вольтамперометричні дослідження виконували, застосовуючи потенціостат ІР-Pro з програмним забезпеченням, за триелектродною схемою. Робочим був скловуглецевий електрод (glassy carbon), запресований у фторопласт із площею робочої поверхні 0,0228 см², електродом порівняння – насичений хлоридсрібний, допоміжним – платиновий. Перед початком експерименту скловуглецевий електрод витримували у 0,5 М розчині NaCl, а потім – у розчині з ЕВА. Вольтамперограми знімали до і після введення в розчин екстракту з витримкою електрода 5 min, а також 48 та 120 h.

Морфологію поверхні зразків металу без плівки та після її формування в корозивному розчині із ЕВА вивчали на електронному мікроскопі FEIE-SEM XL 30 (детектування вторинних електронів) та атомно-силовому NT-MDT Solver P47-PRO [20].

Хімічні перетворення в екстракті та в плівці адсорбованих органічних сполук спостерігали за ІЧ-спектрами ЕВА та спектрами віддзеркалення від поверхні зразка. Перші знімали ІЧ-Фур'є-спектрометром Jasco FT/IR-4000. Умови дослідження такі: діапазон реєстрації спектра 4000...400 см⁻¹; роздільна здатність 4 см⁻¹; кількість сканів – автоматично; швидкість сканування 1 mm/s; режим сканування – у прохідному світлі; детектор – TGS. ІЧ-спектри віддзеркалення від поверхні зразка, заздалегідь експонованого у корозивному розчині з ЕВА, реєстрували ІЧ-Фур'є-спектрометром фірми Perkin Elmer у діапазоні 4000...630 см⁻¹, використовуючи приставку ППВВ (порушеного повного внутрішнього відбивання).

Результати та їх обговорення. Пришвидшені корозійні випробування засвідчили, що ЕВА захищає сталь від корозії у нейтральному водному середовищі

(див. таблицю). Ступінь захисту залежить як від тривалості випробувань, так і концентрації екстракту та знаходиться в межах 25,8...94,6%, що дає можливість рекомендувати його для захисту сталі в цих умовах.

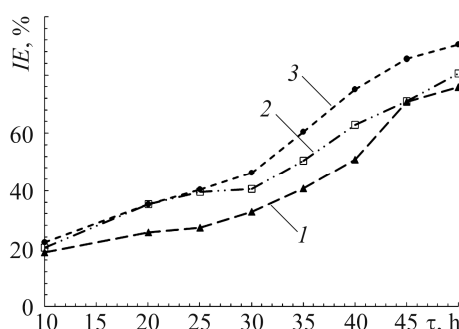
Ступінь захисту (IE , %) та ступінь заповнення (θ , %) поверхні сталі Ст3 інгібітором залежно від концентрації у 0,5 М NaCl, $t = 25^\circ\text{C}$, $\tau = 624$ h

Концентрація інгібітора, ppm	IE	θ
	%	
0	–	–
50	25,8	0,258
100	58,9	0,589
150	68,9	0,689
200	72,5	0,725
250	74,2	0,742
300	78,9	0,789
400	80,1	0,801
500	94,6	0,946

Аналіз літератури та результати досліджень вказують, що протикорозійна ефективність “зелених” інгібіторів, як правило, з часом зростає, однак, для деяких екстрактів можливе і зменшення [5–7, 21, 17]. Тому вивчали ступінь захисту сталевих зразків у корозивному розчині залежно від часу витримки, в тому числі за одночасного впливу різних концентрацій інгібітора (рис. 1). Отримані значення ступеня захисту (за гравіметричним методом) знаходяться в межах 20...90% і залежать від тривалості експозиції зразків. Ступінь захисту ЕВА сталі Ст3 у перші 15 h випробувань невисокий і становить ~40%. Зі збільшенням часу експозиції до 48...50 h швидкість її корозії в середовищі знижується, при цьому ступінь захисту сягає близько 90% за концентрації інгібітора 500 ppm. Тому формування захисного шару можна умовно поділити на два етапи: перший, який триває 1...30 h і другий – 40...48 h.

Рис. 1. Залежність ефективності інгібування IE від часу експозиції τ сталі Ст3 в 0,5 М розчині NaCl за різної концентрації: 1 – 200 ppm; 2 – 400; 3 – 500.

Fig. 1. Dependence of the inhibition efficiency IE on the exposure time τ of mild Ст3 steel in 0.5 M NaCl solution for different concentrations: 1 – 200 ppm; 2 – 400; 3 – 500.



Оскільки з підвищенням концентрації інгібітора протикорозійна ефективність у нейтральному водному середовищі суттєво не збільшується, то для подальших досліджень використовували найефективнішу концентрацію екстракту 500 ppm. Дослідження кінетики формування захисної плівки методом поляризаційного опору (рис. 2) свідчать, що інгібувальні властивості ЕВА з часом посилюються. Тому однозначно можна стверджувати, що швидкість корозії у вказаних інгібованих розчинах визначає також і час формування плівки на поверхні металу.

Припускали, що для розчину ЕВА необхідним періодом формування плівки є час експозиції від ~12 до 40 h, який відносять до основного етапу, коли підвищується ефективність захисної дії. Подібну закономірність спостерігали і під час використання інших екстрактів, зокрема екстракту вичавок ріпаку – інгібітора сталі у водогінній воді [18], екстрактів відходів переробки винограду [7, 22], вичавок абрикоса та їх основних компонентів – як летких інгібіторів атмосферної корозії сталі [16]. Проте механізм цього ефекту є поки що незрозумілий.

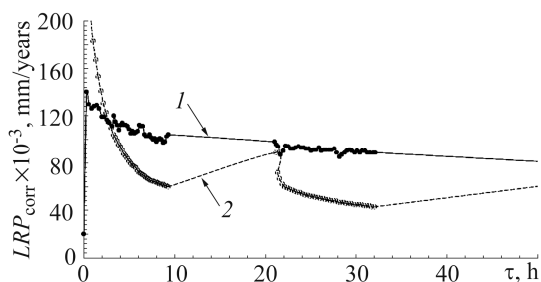


Рис. 2. Залежність миттєвої швидкості корозії LRP від експозиції τ сталі Ст3 в 0,5 М розчині NaCl (1) та з 500 ppm екстракту вичавок абрикоса (2).

Fig. 2 Dependence of corrosion rate LRP on the exposure τ of St3 steel in 0.5 M NaCl solution (1) and with 500 ppm of apricot pomace extract (APE) (2).

Враховуючи, що адсорбційна плівка складається з великої кількості різноманітних органічних сполук, вважали, що посилення її захисної дії може бути результатом переходу цих сполук з адсорбційного стану в адсорбційно-полімеризаційний внаслідок взаємодії складників плівки з утворенням димерного полімеризаційного шару на поверхні та/або у розчині. Підвищити ефективність можуть також менш розчинні комплексні сполуки, сформовані під час взаємодії катіонів Fe^{2+} з органічними сполуками. Вірогідним є окиснення органічних сполук після їх адсорбції у розчині за впливу атмосферного кисню, або кисню, розчиненого у воді. Отже, узагальнюючи сказане, цей тривалий період змін у плівці компонентів рослинних екстрактів можна вважати етапом її трансформації з ефектом стабілізації захисної дії, що і обумовлює формування в часі захисного шару з поліпшеними захисними властивостями.

Щоб дослідити механізм трансформації (окиснення) ЕВА під час формування захисної плівки у корозивному середовищі, знімали ЦВА на скловуглецевому електроді (рис. 3).

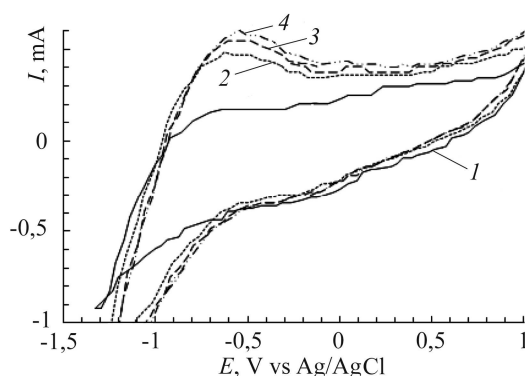


Рис. 3. Циклічні вольтамперограми, зняті в 0,5 М розчині NaCl (1) та після додавання ЕВА і експонуванням 5 min (2); 48 (3) та 120 (4) h на скловуглецевому електроді за швидкості розгортання потенціалу 50 mV/s.

Fig. 3. Cyclic voltammograms obtained in 0.5 M NaCl (1) solution and after addition of APE and exposure for 5 min (2); 48 (3) та 120 (4) h on a glassy carbon electrode at a rate of potential sweeping 50 mV/s.

Скловуглецевий електрод нівелює вплив поверхні металу на формування захисного шару органічних сполук екстракту та дає можливість підтвердити їх хімічне перетворення у розчині впродовж 48 h. Як видно з поданих ЦВА, при $E = 1,1$ V фоновий струм у 0,5 розчині NaCl не перевищує 0,421 mA, а при $E = -0,5$ V значно менший і становить 0,17 mA. Для кожного з досліджуваних розчинів, що

містили ЕВА, на катодній гілці ЦВА спостерігали різке зростання струму за потенціалів, позитивніших від $-0,7$ V, що вказує на окиснення органічних сполук екстракту. Окиснення необоротне, про що свідчить відсутність сходинок на катодних гілках вольтамперограм. Слід відмітити, що найбільше значення струму ($0,61$ mA) виявили на електроді, заздалегідь експонованому 48 h у розчині з ЕВА. Зі збільшенням часу експонування електрода до 120 h струм зменшується і його значення нижче проти зафіксованого для зразка, експонованого 5 min. Отже, саме після 48 h у розчині ЕВА, вірогідно, відбувається часткова трансформація компонентного складу, що пояснюють можливими окисними та ізомерними перетвореннями органічних сполук [22], які за подальшої адсорбції на поверхні сталі мають вищі інгібувальні характеристики. Відомо також [23–25], що компоненти рослинних екстрактів у водних розчинах (монотерпенові феноли, терпенові спирти тощо) нестабільні та можуть змінюватися внаслідок хімічного окиснення киснем повітря або іншими сполуками, що містяться в екстракті. При цьому процес може відбуватись за різними механізмами.

Отже, саме часткова зміна компонентного складу рослинного екстракту, в тому числі внаслідок самочинного окиснення власних органічних сполук, і є найвірогіднішою причиною підвищення з часом ефективності захисної дії плівок, сформованих на основі сполук рослинних інгібіторів корозії, що корелює з результатами ЦВА. Для повнішого дослідження механізму та причин утворення захисної плівки з поліпшеними захисними властивостями на поверхні сталі Ст3, зняли ІЧ-спектри поглинання рослинного екстракту (рис. 4, крива 1) та відбивання плівки (крива 2), сформованої на поверхні після 48 h витримки у корозивному розчині із ЕВА.

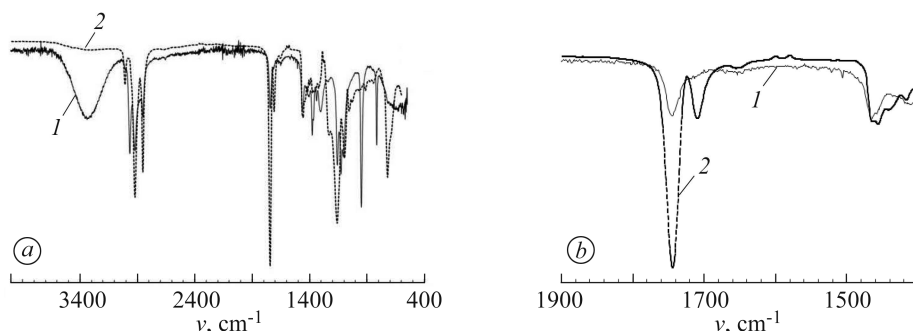


Рис. 4. ІЧ-спектри поглинання ізопропанольного ЕВА (1) та відбивання (2) на поверхні сталі Ст3, експонованої 48 h у корозивному розчині з ЕВА (концентрація 500 ppm). ІЧ-спектри у діапазоні $400\text{...}3900$ cm^{-1} (a) та деталізовані у діапазоні $1400\text{...}1900$ cm^{-1} (b).

Fig. 4. IR-absorption of 2-propyl APE (1) and reflection (2) on the surface of steel Ст3, exposed to the APE for 48 h (concentration 500 ppm) in corrosive environment. The IR-spectra in the range $400\text{...}3900$ cm^{-1} (a) and detailed in the range $1400\text{...}1900$ cm^{-1} (b).

Характерно, що результати ІЧ-спектрального аналізу поверхні сталі після 48 h формування захисної плівки підтверджують утворення нових сполук та їх адсорбцію, про що свідчать нові піки утримання в діапазоні довжин хвилі $1750\text{...}1700$ cm^{-1} , що притаманні ν ($\text{C}=\text{C}$) групам та можуть відповідати продуктам окисного та ізомерного перетворення компонентів рослинного екстракту або продуктів їх полімеризації [24, 25]. Встановили, що компоненти ЕВА (тимол, карвакрол) здатні необоротно окиснюватись за різними механізмами: як з утворенням фенокисильного радикала з подальшою димеризацією і полімеризацією [24] (рис. 5a), так і з формуванням відповідних *o*- та *n*-хінонів (рис. 5b) [25].

Кверцетин, що міститься в екстракті у великій кількості, також легко окиснюється у водних розчинах (рис. 6). Під час дослідження механізму формування

захисної плівки екстракту вичавок винограду та його основних сполук (2-фенілацетальдегід та гексаналь) також виявили складніший адсорбційно-полімеризаційний механізм протикорозійної дії.

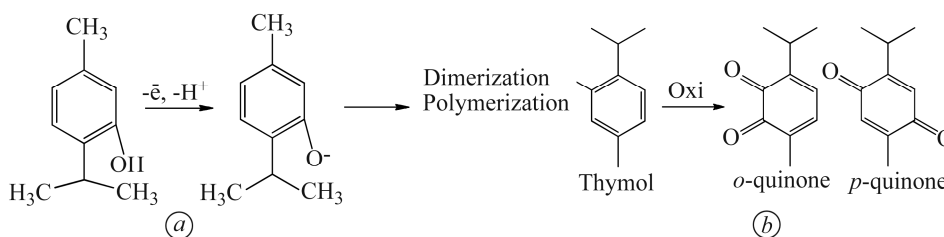


Рис. 5. Схема механізму окиснення монотерпенових фенолів на прикладі тимолу [24, 25].

Fig. 5. Scheme of the oxidation mechanism of monoterpene phenols on the example of the thymol [24, 25].

Для оцінки морфології поверхні плівки, що формується на сталі під час експонування у корозивному розчині з ЕВА, використали методи растрової електронної (SEM) (рис. 7) та атомно-силової мікроскопії (АСМ) (рис. 8). Встановили, що тривалість утворення впливає на морфологію захисної плівки (рис. 7): після 48 h вона щільніша та гладша.

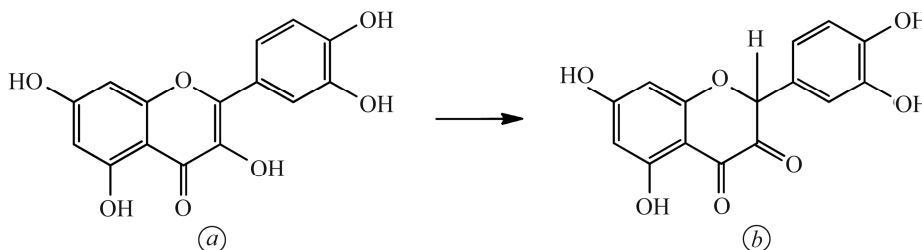


Рис. 6. Схема механізму окиснення кверцетину [24]:
(a – кверцетин; b – продукт окиснення).

Fig. 6. Scheme of the oxidation mechanism of quercetin [24]:
(a – quercetin; b – product of oxidation).

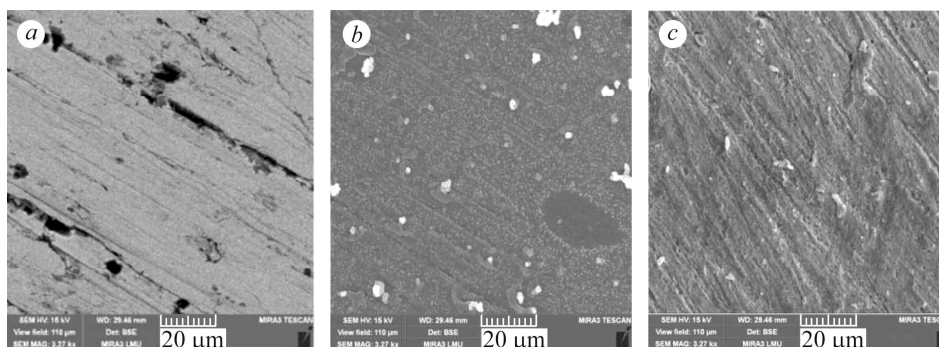


Рис. 7. Морфологія поверхні зразків сталі (SEM): a – після механічного оброблення; b, c – після 12 та 48 h витримки в 0,5 М розчині NaCl з ЕВА (концентрація 500 ppm).

Fig. 7. Morphology of the surface of the steel samples (SEM): a – after mechanical treatment; b, c – after 12 and 48 h of exposure to 0.5 M NaCl solution with APE (concentration 500 ppm).

Аналізуючи зразки з плівками за допомогою атомно-силового мікроскопа, встановили, що після їх витримки у корозивному середовищі 12 та 48 h на поверхні сталі утворюється захисна плівка товщиною понад 680 та 820 nm відповідно.

но. Враховуючи топографію поверхні плівок органічних сполук рослинного екстракту та їх товщину, результати вольтамперометричних досліджень на скловуглецевому електроді та пришвидшених корозійних випробувань, можна стверджувати, що в основі механізму їх формування – низка складних процесів.

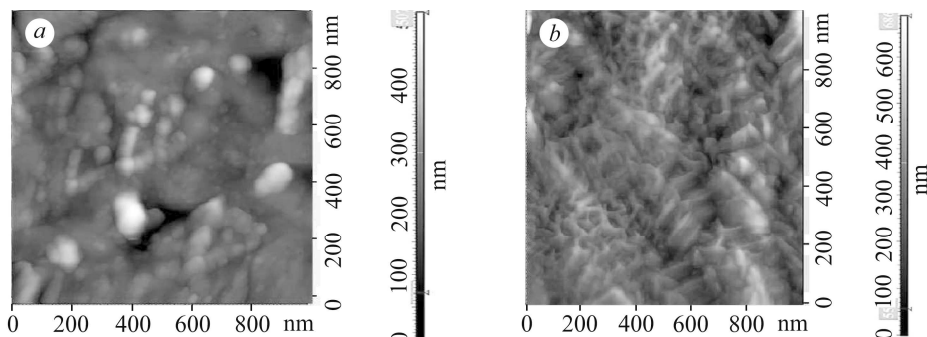


Рис. 8. АСМ зображення ділянки поверхні сталі після 12 (а) та 48 (б) h витримки в 0.5 М розчині NaCl з екстрактом вичавок абрикоса (концентрація 500 ppm).

Fig. 8. AFM image of the steel surface after 12 (a) and 48 (b) h exposure to 0.5 M NaCl solution with the APE (concentration 500 ppm).

Вірогідніші тут процеси адсорбції впродовж 40...48 h продуктів самочинного хімічного перетворення компонентів рослинного екстракту, здатних утворювати досить товстий (~800 nm) адсорбційно-полімеризаційний шар з поліпшеними інгібувальними властивостями.

ВИСНОВКИ

Ізопропанольний екстракт вичавок абрикоса забезпечує протикорозійний захист сталі Ст3 з нейтральному водному середовищі на рівні 94%. Встановлено, що ефективність захисту ним у воді зростає зі збільшенням концентрації та часу експозиції. Максимальний захисний ефект досягається за експозиції сталі в інгібованому корозивному середовищі не менше 48 h з формуванням плівки товщиною ~800 nm. Досліджуваний інгібітор корозії є плівкоутворювальним, механізм його захисної дії – адсорбційно-полімеризаційний.

1. *Green corrosion inhibition of mild steel by aqueous Allium sativum extract in 3.5% NaCl / S. Devikala, P. Kamaraj, M. Arthanareeswari, B. Milin Patel // Mat. Today: Proc. – 2019. – 14, Part 2. – P. 580–589.*
2. *Evaluation of Ginkgo leaf extract as an eco-friendly corrosion inhibitor of X70 steel in HCl solution / Y. Qianga, S. Zhanga, B. Tana, and S. Chen // Corr. Sci. – 2018. – 133, № 1. – P. 6–16. doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.01.008>*
3. *Inhibition effect of bamboo leaves' extract on steel and zinc in citric acid solution / X. H. Li, S. D. Deng, X. G. Xie, and H. Fu // Corr. Sci. – 2014. – 87. – P. 15–26.*
4. *Singh A., Singh V. K., and Quraishi M. A. Aqueous extract of kalmegh (Andrographis paniculata) leaves as green inhibitor for mild steel in hydrochloric acid solution // Int. J. of Corr. – 2010. – P. 1–10. doi: <https://doi.org/10.1155/2010/275983>*
5. *Self-assembled monoterpene phenol as vapor phase atmospheric corrosion inhibitor of carbon steel / V. Vorobyova, O. Chygyrynets', M. Skiba, and I. Kurmakova // Int. J. Corr. and Scale Inhib. – 2017. – 6, № 4. – P. 485–503.*
6. *Vorobyova V., Chygyrynets O., and Skiba M. 4-hydroxy-3-methoxybenzaldehyde as a volatile inhibitor on the atmospheric corrosion of carbon steel // J. of Chem. Techn. and Metallurgy. – 2018. – 53, № 2. – P. 336–345.*
7. *A comprehensive study of grape pomace extract and its active components as effective vapour phase corrosion inhibitor of mild steel / V. Vorobyova, O. Chygyrynets', M. Skiba, T. Zhuk, I. Kurmakova, and O. Bondar // Int. J. Corr. and Scale Inhib. – 2018. – 7, № 2. – P. 185–202.*

8. Воробйова В. І., Чигиринець О. Е., Василькевич О. І. Механізм формування на сталі захисної плівки леткими сполуками шроту ріпаку // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2014. – **50**, № 5. – С. 91–101.
9. Vorob'iova V., Chyhyrynets' O., and Vasylyk'evych O. Mechanism of formation of the protective films on steel by volatile compounds of rapeseed cake // Materials Science. – 2015. – **50**, № 5. – P. 726–735. doi: <https://doi.org/10.1007/s11003-015-9778-z>
10. Вивчення механізму дії ізопропанольного екстракту шроту ріпаку на атмосферну корозію міді / О. Е. Чигиринець, Ю. Ф. Фатєєв, В. І. Воробйова, М. І. Скиба // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2015. – **51**, № 5. – С. 48–55.
(Study of the mechanism of action of the isopropanol extract of rapeseed oil cake on the atmospheric corrosion of copper / O. E. Chyhyrynets, Y. F. Fateev, V. I. Vorobiova, M. I. Skiba // Materials Science. – 2016. – **51**, № 5. – P. 644–651. doi: <https://doi.org/10.1007/s11003-016-9886-4>.)
11. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 08.11.2017 №820-р “Про схвалення Національної стратегії управління відходами в Україні до 2030 року”.
12. El-Etre A. Y., Abdallah M., and El-Tantawy Z. E. Corrosion inhibition of some metals using Lawsonia extract // Corr. Sci. – 2005. – **47**. – P. 385–395.
13. Abd-El-Khalek D. E., Abd-El-Nabeyb B. A., and Abdel-Gaber A. M. Evaluation of nicotiana leaves extract as corrosion inhibitor for steel in acidic and neutral chloride solutions // Port. Electrochim. Acta. – 2012. – **30**. – P. 247–259.
14. Cysteine as a green corrosion inhibitor for Cu37Zn brass in neutral and weakly alkaline sulphate solutions / M. B. Radovanović, M. B. Petrović, A. T. Simonović, S. M. Milić, M. M. Antonijević // Environ Sci Pollut Res. – 2013. – **20**. – P. 4370–4381. doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-012-1088-5>.
15. Khaled M. I. Evaluation of cysteine as environmentally friendly corrosion inhibitor for copper in neutral and acidic chloride solutions // Electrochim. Acta. – 2007. – **52**, № 28. – P. 7811–7819. doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2007.02.053>
16. Determination of the chemical composition of the extract of apricot pomace (*Prunus armeniaca* L.) / V. Vorobyova, A. Shakun, O. Chygyrynets', M. Skiba // Chemistry & Chemical Techn. – 2019. – **13**, № 3. – P. 391–398.
17. Vorobyova V. and Skiba M. Apricot cake extract as corrosion inhibitor of steel: chemical composition and anti-corrosion properties // Chemistry J. of Moldova. – 2019 – **14**, № 1. – P. 77–87. doi: <http://dx.doi.org/10.19261/cjm.2018.525>
18. Relationship between the inhibition and antioxidant properties of the plant and biomass wastes extracts – A Review / V. I. Vorobyova, M. I. Skiba, A. S. Shakun, and S. V. Nahirniak // Int. J. Corr. Scale Inhib. – 2019. – **8**, № 2. – P. 150–178.
19. Vasylyev G. and Vorobiova V. Rape grist extract (*Brassica napus*) as a green corrosion inhibitor for water systems // Mat. Today. Proc. – 2019. – **6**, № 2. – P. 178–186. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.092>.
20. Fang Y., Suganthan B., and Ramasamy R. P. Electrochemical characterization of aromatic corrosion inhibitors from plant extracts // J. of Electroanalytical Chemistry. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2019.03.052>
21. WSXM: A software for scanning probe microscopy and a tool for nanotechnology / I. Horcas, R. Fernandez, J. M. Gomez-Rodriguez, J. Colchero, J. Gomez-Herrero, and A. M. Baro // Review of Scientific Instruments. – 2007. – **78**. – P. 013705. doi: <https://doi.org/10.1063/1.2432410>
22. Vorobyova V., Chygyrynets' O., and Skiba M. Experimental and theoretical investigations of anti-corrosive properties of thymol // Chemistry and Chemical Techn. – 2019. – **13**, № 2. – P. 261–268. doi: <https://doi.org/10.23939/chcht13.02.261>
23. A study pomaces of grapes extract as eco-friendly vapor phase corrosion inhibitor / V. Vorobyova, O. Chygyrynets', M. Skiba, I. Trus, and S. Frolenkova // Chemistry and Chemical Techn. – 2018. – **12**, № 3. – P. 410–418. doi: <https://doi.org/10.23939/chcht12.03.410>
24. Гуцина С. В., Косман В. М., Зенкевич И. Г. Кинетические закономерности окисления кверцетина кислородом воздуха в водных растворах // Тез. докл. Междунар. конф. “Химия соединений с кратными углерод-углеродными связями”. – СПб., 2008. – С. 149–150.
25. Bin Y., Kensuke A., and Fumiyo K. Electrochemical behaviors of quercetin and kaempferol in neutral buffer solution // Analit. Sci. – 2001. – **17**. – P. 987–989.
26. Ziyatdinova G. K. and Budnikov H. C. Evaluation of the antioxidant properties of spices by cyclic voltammetry // Журн. аналит. химии. – 2014. – **69**, № 10. – P. 1086–1093.

Одержано 21.08.2019