



**МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ
ДЛЯ ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ
ЗАЩИТЫ**

Тип статьи: научная, оригинальная

**MATERIALS AND EQUIPMENT
FOR CORROSION PROTECTION**

Articale type: original

<https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2024.111.1-3>

Ингибирующие свойства отвара Melissa officinalis против коррозии низкоуглеродистой стали в сернокислых средах

П.А. Николайчук✉, П.А. Васильев, Ю.А. Енова

Курганский государственный университет,
РФ, 640020, г. Курган, ул. Советская, д. 63, стр. 4

e-mail: pavel.nikolaychuk@kgsu.ru

Аннотация. Рассмотрено использование соединений, экстрагированных из природных источников и отходов пищевой промышленности, в частности – растительного сырья, как перспективного направления поиска ингибиторов коррозии.

Изучено ингибирующее влияние отвара из листьев и цветов Melissa officinalis против коррозии низкоуглеродистой стали Ст3 в среде 0,5 М серной кислоты методами электрохимической поляризации и спектроскопии электрохимического импеданса.

Показано, что добавка 100 мг/л экстракта Melissa officinalis уменьшает скорость коррозии на 15%, а добавка 10 г/л – на 75%. Адсорбция компонентов экстракта на поверхности стали имеет физическую природу, описывается адсорбционной моделью Ленгмюра с хорошим коэффициентом достоверности аппроксимации. Вычисленная энергия Гиббса процесса адсорбции не превышает – 20 кДж/моль. Определенные в работе эффективности ингибирования коррозии низкоуглеродистой стали в среде серной кислоты экстрактом Melissa officinalis сравнимы со значениями эффективностей ингибирования коррозии сталей в соляной кислоте. Отвар Melissa officinalis показал себя как эффективный и экологичный состав для замедления коррозии сталей в кислых средах.

Ключевые слова: *Melissa officinalis*, отвар, ингибирование коррозии в кислых средах, нержавеющая сталь, электрохимическое исследование, спектроскопия электрохимического импеданса, изотерма адсорбции Ленгмюра

Для цитирования: Николайчук П.А., Васильев П.А., Енова Ю.А. Ингибирующие свойства отвара Melissa officinalis против коррозии низкоуглеродистой стали в сернокислых средах // Практика противокоррозионной защиты. – 2024. – Т. 29, № 1. – С. 27-36. <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2024.111.1-3>

Получена 05.09.2023. Принята к публикации 20.11.2023. Опубликована 01.03.2024.

Финансирование. Финансирование работы осуществлялось в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (рег. № проекта 720000Ф.99.1.БН60АА13000).

The Inhibitory Properties of Lemon Balm (*Melissa officinalis*) Boiling Extract on the Corrosion of Mild Steel in Sulphuric Acid Medium

Pavel A. Nikolaychuk✉, Pavel A. Vasilyev, Yulia A. Enova

Kurgan State University,
bld. 4, 63, Sovetskaya st., Kurgan, 640020, Russian Federation

e-mail: pavel.nikolaychuk@kgsu.ru

Abstract. The use of compounds extracted from natural sources and waste from the food industry, in particular plant materials, is considered as a promising direction in the search for corrosion inhibitors.

The inhibitory ability of the boiling extract from the leaves and the flowers of *Melissa officinalis* on the corrosion of mild stainless steel EN Fe37-3FN in 0,5 M sulphuric acid medium investigated using electrochemical methods and EIS.

It was shown that the addition of 100 mg/L of the *Melissa officinalis* extract reduces the corrosion rate by 15%, and that of 10 g/L – by 75%. The adsorption of the extract components on a steel surface follows the Langmuir adsorption model, and the nature of adsorption is mostly physical.

The adsorption of extract components on the steel surface is described by the Langmuir adsorption model with



a good approximation reliability coefficient. The calculated Gibbs energy of the adsorption process does not exceed -20 kJ/mol, which indicates the physical nature of adsorption. The efficiencies of corrosion inhibition of low-carbon steel in sulfuric acid with lemon balm extract, determined in the work, are comparable to the values of its efficiencies of corrosion inhibition of steels in hydrochloric acid.

The *Melissa officinalis* extract shows itself as perspective and environmentally friendly substance for reducing the steel corrosion rate in acidic environments.

Keywords: *Melissa officinalis*, boiling extracts, acid medium corrosion inhibition, stainless steel, electrochemical study, electrochemical impedance spectroscopy, Langmuir adsorption isotherm

For citation: Nikolaychuk, P. A., Vasilyev, P. A., & Enova, Y. A. (2024). The Inhibitory Properties of Lemon Balm (*Melissa officinalis*) Boiling Extract on the Corrosion of Mild Steel in Sulphuric Acid Medium. *Theory and Practice of Corrosion Protection*, 29(1), 27-36. <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2024.111.1-3>

Received September 05, 2023. Accepted for publication November 31, 2023. Published March 01, 2024.

Funding. The work was financed within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project registration number 720000F.99.1.BN60AA13000).

Введение

Использование побочных продуктов промышленных производств [1], лекарственных средств с истекшим сроком годности [2], а также соединений, экстрагированных из природных источников [3, 4], является перспективным направлением поиска ингибиторов кислотной коррозии металлов, и в последнее время всё больше привлекает внимание исследователей. Использование природных соединений снижает затраты на поиск и целенаправленный синтез ингибиторов, кроме того, природные ингибиторы коррозии после использования не загрязняют окружающую среду. Обычно в роли ингибиторов используют экстракты из корней, листьев, цветов, плодов и семян различных растений [5, 6]. Это также открывает путь для повторного использования биомассы и отходов пищевой промышленности [7, 8].

Мелисса лекарственная используется как ароматическое и лекарственное растение и широко культивируется во многих странах мира. Её надземные части (листья и цветы) содержат монотерпены (цитраль, гераниол, нерол, цитронеллол, цитронеллаль) и терпеноиды (линалоол, геранилацетат, мирцен, парацимол, β -кариофилленоксид, β -кариофиллен и др.), фенилпропаноиды (коричная кислота, розмариновая кислота и её этиловый эфир, кофейная кислота, хлорогеновая кислота, п-кумаровая кислота, феруловая кислота, синаповая кислота), флавоноиды (апигенин, космосиин, лютеолин, цинарозид, рамноцитрин, изокверцитрин, рамназин), фенолкарбоновые кислоты (гентизиновая, салициловая, п-гидроксibenзойная, ванилиновая, сирене-

вая, протокатеховая), кумарины, витамины В1, В2, С, β -каротин [9-11]. Известно, что и терпеноиды, и флавоноиды, и кумарины, и некоторые витамины являются перспективными ингибиторами коррозии [12-14]. Ранее [15-17] уже был показан ингибирующий эффект этанольных экстрактов мелиссы лекарственной против коррозии высокоуглеродистых сталей в солянокислых средах. Однако при изучении коррозионных свойств сплавов в кислых средах, наряду с соляной кислотой, в качестве агрессивной среды используется также и серная кислота [14], ингибирующие свойства мелиссы лекарственной в которой ранее исследованы не были. Поэтому в настоящей работе исследуется влияние отвара мелиссы лекарственной на коррозионные свойства стали Ст3 в 0,5 М растворе серной кислоты.

Реактивы и оборудование

Пропан-2-ол (чда) и серная кислота (хч) приобретались у ООО «Ленреактив». Стальные электроды производились из цилиндрических слитков низкоуглеродной стали Ст3 (содержащей не более 0,14% С, 0,3% Ni, Cu, и Cr, 0,05% Si, 0,4% Mn, 0,05% P и 0,04% S). Плоская торцевая поверхность слитка изолировалась эпоксидной смолой, а площадь рабочей поверхности электрода (внешней поверхности цилиндра), погружаемой в раствор, составляла 6,3 см².

Взвешивание образцов проводилось на аналитических весах НТ-224RCE (Vibra) с точностью 0,0001 г. Электрохимические и импедансные исследования проводились при помощи потенциостата-гальваностата Р-45Х с анализатором частотного отклика FRA-24М

(ООО «Electrochemical Instruments»). Для экранирования электрохимической ячейки использовался экранирующий шкаф Ш-3М (ООО «Electrochemical Instruments»). Для приготовления растворов использовалась дистиллированная вода, полученная при помощи аквадистиллятора АЭ-10 (ООО «Ливам»). Для нагрева и перемешивания растворов использовалась магнитная мешалка RET control-visc (IKA). Бумажные фильтры «чёрная лента» с диаметром пор 12 мкм приобретались у ООО «Ареолаб». Использовалась стеклянная лабораторная посуда второго класса точности.

Методики и материалы исследования

Приготовление экстрактов. Надземные части (листья и цветы) дикорастущих растений Melissa лекарственной были собраны в лесу близ города Курган (55°24'25" с. ш., 65°27'26" в. д.) в период цветения растения в начале августа и высушены на воздухе в течение трёх месяцев.

Навеска в 100 г смеси высушенных листьев и цветов растения помещалась в колбу для перегонки, заливалась 1 л дистиллированной воды, нагревалась до кипения и кипятилась с обратным холодильником в течение 3 ч. Полученный отвар охлаждался до комнатной температуры, и твёрдый остаток отфильтровывался через фильтр «чёрная лента».

Аликвота 10 мл отвара помещалась в химический стакан и выпаривалась досуха, определялась масса растворённых соединений и их исходная концентрация в отваре. После этого готовились рабочие растворы водных экстрактов Melissa лекарственной с концентрациями, варьируемыми от 0,2 до 20 г/л, соответствующим разбавлением исходного отвара. Приготовленные растворы разбавлялись равными объёмами 1 M серной кислоты, в результате получались кислотные рабочие растворы экстракта Melissa лекарственной с концентрациями от 0,1 до 10 г/л в 0,5 M H₂SO₄.

Поляризационные измерения. Электроды из стали Ст3 с площадью рабочей поверхности 6,3 см² полировались наждачной бумагой P2500 и обезжиривались пропан-2-олом. Измерения выполнялись в стандартной трёхэлектродной электрохимической ячейке,

состоящей из рабочего электрода (образца стали), вспомогательного графитового электрода и хлоридсеребряного электрода сравнения. Ячейка помещалась в экранирующий шкаф. Потенциал открытой цепи (коррозионный потенциал, $E_{кор}$) записывался в течение 30 мин. Результат показан на рис. 1. Потенциодинамические поляризационные кривые записывались в интервале потенциалов от -500 до +500 мВ относительно измеренного потенциала открытой цепи со скоростью развёртки потенциала 10 мВ/с. Каждый эксперимент повторялся трижды. Полученные поляризационные кривые представлялись в координатах $E(\lg i)$, после чего вычислялись тафельские наклоны анодной (b_a) и катодной (b_k) ветвей кривых, и по их пересечению оценивались коррозионные плотности тока ($i_{кор}$) [14]. Эффективность ингибирования компонентов экстракта определялась из отношения коррозионных плотностей тока в отсутствие (i_0) и присутствии (i) ингибитора: $ЭИ = (i_0 - i) / i_0 \cdot 100\%$ [14]. Результаты показаны на рис. 2 и в табл. 1.

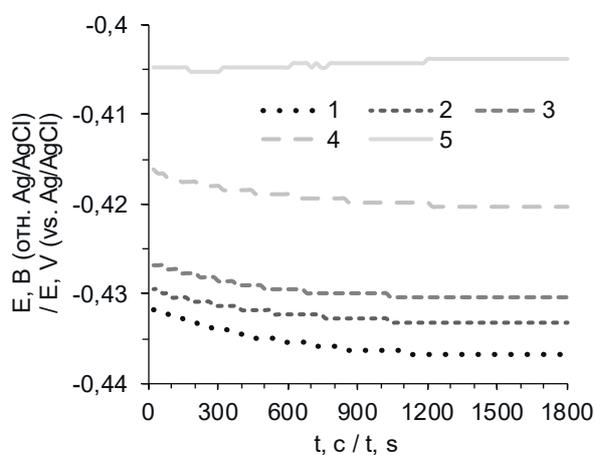


Рис. 1. Потенциал открытой цепи для стального электрода, погружённого в 0,5 M серную кислоту без добавок ингибитора (1) и с добавками экстракта Melissa лекарственной концентрации 100 мг/л (2), 400 мг/л (3), 2 г/л (4) и 10 г/л (5) после 30 мин выдержки

Fig. 1. An open circuit potential for the steel electrode, immersed into 0,5 M sulphuric acid without addition of the inhibitor (1) and with additions of the lemon balm extracts with the concentration of 100 mg/l (2), 400 mg/l (3), 2 g/l (4) and 10 g/l (5) after 30 min of exposure

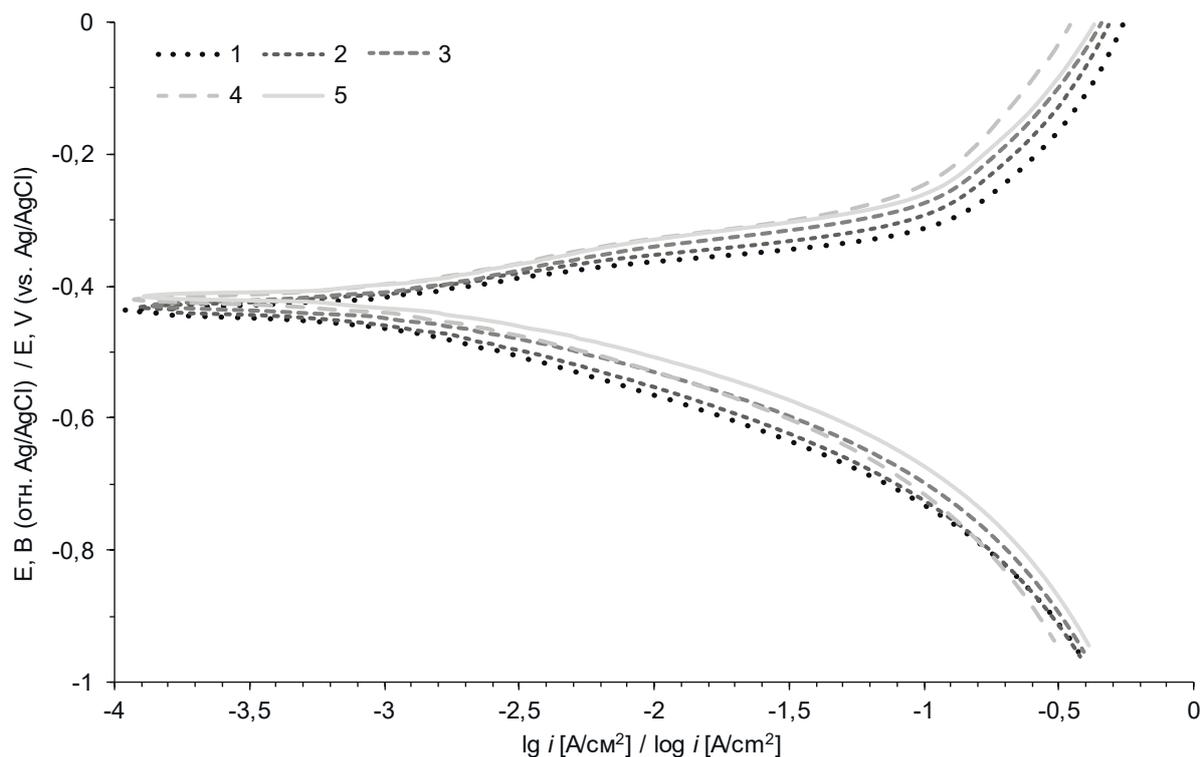


Рис. 2. Поляризационные кривые стали Ст3 в 0,5 М серной кислоте без добавок ингибитора (1) и с добавками экстракта Melissa лекарственной концентрации 100 мг/л (2), 400 мг/л (3), 2 г/л (4) и 10 г/л (5) после 30 минут выдержки

Fig. 2. The polarization curves for the steel EN Fe37-3FN in 0,5 M sulphuric acid without addition of the inhibitor (1) and with additions of the lemon balm extracts with the concentration of 100 mg/l (2), 400 mg/l (3), 2 g/l (4) and 10 g/l (5) after 30 min of exposure

Таблица 1. Результаты электрохимических измерений скорости коррозии

Table 1. The results of the electrochemical measurements of the corrosion rate

c_u , мг/л / c_p , mg/l	$E_{кор}$, мВ / E_{cor} , mV	b_a , мВ/дек / b_a , mV/dec	b_k , мВ/дек / b_c , mV/dec	$i_{кор}$, мА/см ² / i_{cor} , mA/cm ²	ЭИ, % / IE, %
0	- 437	422	- 205	26,7	–
100	- 433	380	- 235	22,0	17,6
400	- 429	332	- 195	17,1	35,7
2000	- 420	271	- 220	11,4	57,3
10000	- 404	149	- 164	5,4	79,7

Измерения методом спектроскопии электрохимического импеданса. Электроды из стали Ст3 с площадью рабочей поверхности 6,3 см² полировались наждачной бумагой Р2500 и обезжиривались пропан-2-олом. Измерения выполнялись в стандартной трёхэлектродной электрохимической ячейке, состоящей из рабочего электрода (образца стали), вспомогательного графитового электрода и хлоридсеребряного электрода сравнения. Потенциал открытой цепи записывался в течение 30 мин. Значения импеданса записывались при измеренном потенциале открытой цепи в интервале частот переменного тока от 1 Гц до 10 кГц с амплитудой колебаний потенциала 10 мВ. Каждый эксперимент повторялся трижды. Полученные результаты представлены в виде амплитудных, фазовых и амплитудно-фазовых частотных характеристик [18]. Оценка параметров импеданса проводилась в рамках упрощённой эквивалентной схемы

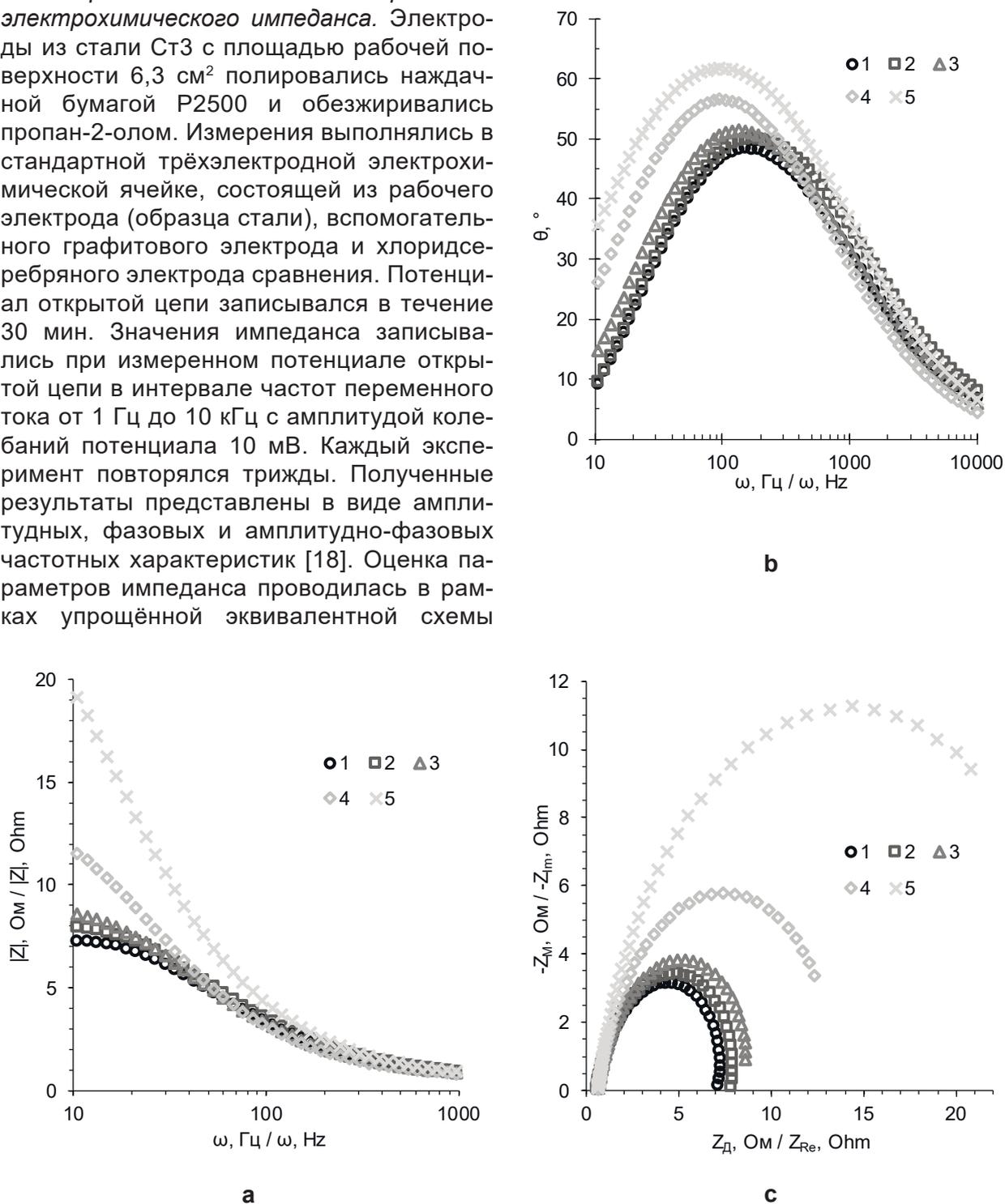


Рис. 3. а) амплитудная, б) фазовая и с) амплитудно-фазовая частотные характеристики стали Ст3 в 0,5 М серной кислоте без добавок ингибитора (1) и с добавками экстракта Melissa лекарственной концентрации 100 мг/л (2), 400 мг/л (3), 2 г/л (4) и 10 г/л (5) после 30 мин выдержки

Fig. 3. a), b) the Bode plot, and c) the Nyquist plot for the steel EN Fe37-3FN in 0,5 M sulphuric acid without addition of the inhibitor (1), and with additions of the lemon balm extracts with the concentration of 100 mg/l (2), 400 mg/l (3), 2 g/l (4) and 10 g/l (5) after 30 min of exposure

Таблица 2. Результаты импедансных измерений скорости коррозии
Table 2. The results of the impedance measurements of the corrosion rate

c_u , мг/л / c_i , mg/l	R_p , Ом / R_s , Ohm	P , мОм ⁻¹ ·с ⁿ / P , mOhm ⁻¹ ·s ⁿ	n	R_{nz} , Ом / R_{ct} , Ohm	ЭИ, % / IE, %
0	0,59	1,22	0,85	8,0	–
100	0,52	1,16	0,85	8,8	9,1
400	0,54	1,24	0,86	9,7	17,5
2000	0,49	1,29	0,87	14	42,9
10000	0,53	1,02	0,84	29	72,4

Рэндлеса [18], содержащей сопротивление раствора R_p , последовательно соединённый с ним элемент постоянной фазы, представляющий двойной электрический слой, комплексное сопротивление которого описывается выражением $1/Z = P \cdot (i \cdot \omega)^n$, где P и n – параметры, ω – частота переменного

тока, и параллельно соединённое с ним сопротивление переноса заряда через пассивирующий слой R_{nz} . Подбор параметров эквивалентной электрической схемы под экспериментальные значения импеданса выполнялся при помощи открытого программного обеспечения EIS Spectrum Analyser [19]. Ингибирующая способность компонентов экстракта определялась из отношения сопротивлений переноса заряда в присутствии (R) и отсутствии (R_0) ингибитора: $ЭИ = (R - R_0)/R \cdot 100\%$ [14]. Результаты показаны на рис. 3 и в табл. 2.

Адсорбционная модель Ленгмюра. Описание адсорбции компонентов экстракта на поверхности электрода выполнено в рамках адсорбционной модели Ленгмюра. Уравнение изотермы адсорбции Ленгмюра линейаризовано в виде $c_u/\theta = 1/K_{adc} + c_u$, где c_u – концентрация раствора экстракта мелиссы лекарственной, г/л, K_{adc} – константа равновесия процесса адсорбции-десорбции, л/г и θ – доля поверхности, покрытой ингибитором, которая принимается равной эффективности ингибирования. Зависимость c_u/θ от c_u представлена на рис. 4 и в табл. 3. Данные обработаны методом наименьших квадратов, и константа равновесия процесса адсорбции-десорбции оценена, как свободный член регрессионного уравнения. Изменение энергии Гиббса процесса адсорбции оценивалось по урав-

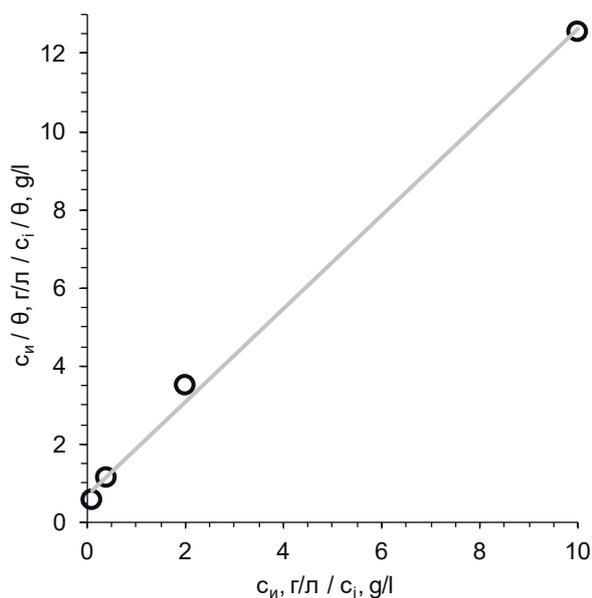


Рис. 4. Зависимость c_u/θ от c_u для адсорбции экстракта мелиссы лекарственной на поверхности стали

Fig. 4. The dependence of c_u/θ on c_u for the adsorption of the lemon balm extract on the steel surface

Таблица 3. Параметры адсорбционной модели Ленгмюра
Table 3. The parameters of the Langmuir adsorption model

$c_u, \text{ г/л}$ / $c_p, \text{ g/l}$	θ	$c_u/\theta, \text{ г/л}$ / $c_l/\theta, \text{ g/l}$	Уравнение регрессии / Regression equation	$K_{\text{адс}}, \text{ л/г}$ / $K_{\text{адс}}, \text{ l/g}$	$\Delta_{\text{адс}} G, \text{ кДж/моль}$ / $\Delta_{\text{адс}} G, \text{ kJ/mol}$
0,1	0,176	0,57	$c_u/\theta = (1,19 \pm 0,04) \cdot c_u + (0,7 \pm 0,2);$ $R^2 = 0,9975$	$1,4 \pm 0,4$	-18 ± 3
0,4	0,357	1,12			
2	0,573	3,49			
10	0,797	12,55			

нению $\Delta_{\text{адс}} G = -RT \ln (K_{\text{адс}} \cdot c_e)$, где $c_e = 10^3 \text{ г/л}$ – концентрация воды в растворах экстрактов. Результаты представлены в табл. 3.

Обсуждение результатов

Результаты электрохимических и импедансных испытаний показывают, что добавление 100 мг компонентов экстракта Melissa лекарственной на каждый литр раствора замедляет электрохимическую коррозию стали Ст3 в 0,5 M растворе серной кислоты на ~15%. Эффективность ингибирования возрастает с увеличением концентрации ингибитора и при добавлении 10 г/л компонентов экстракта достигает ~75%.

Адсорбция компонентов экстракта на поверхности стали описывается адсорбционной моделью Ленгмюра с хорошим коэффициентом достоверности аппроксимации. Вычисленная энергия Гиббса процесса адсорбции не превышает ~ -20 кДж/моль, что свидетельствует о физической природе адсорбции.

Определённые в работе эффективности ингибирования коррозии низкоуглеродистой стали в среде серной кислоты экстрактом Melissa лекарственной сравнимы со значениями его эффективностей ингибирования коррозии сталей в соляной кислоте [15-17].

В сочетании с предыдущими работами, настоящее исследование подтверждает хорошие ингибирующие свойства экстрактов Melissa лекарственной против коррозии сталей в кислых средах, хотя эффективность ингибирования будет сильно зависеть от состава среды и температуры [20]. Добавка экстрактов Melissa лекарственной в

коррозионную среду может использоваться при защите оборудования от коррозии в травильных участках производств по обработке металлов, гальванических цехах, а также входить в состав средств для удаления продуктов коррозии со стальных поверхностей [21, 22].

Выводы

Методами электрохимической поляризации и спектроскопии исследовано ингибирующее влияние компонентов отвара Melissa лекарственной на коррозию стали Ст3 в среде 0,5 M серной кислоты. Показано, что ингибирующая эффективность возрастает с увеличением концентрации компонентов экстракта в растворе, и составляет ~15% при концентрации 100 мг/л, и ~75% при концентрации 10 г/л. Показано, что адсорбция компонентов экстракта на поверхности стали подчиняется адсорбционной модели Ленгмюра. Отвар Melissa лекарственной обладает хорошими ингибирующими свойствами против коррозии низкоуглеродистых сталей в кислых средах.

Литература

1. Абдуллаев Т. А. Ингибитор коррозии на основе отходов производства // Практика противокоррозионной защиты, 1999. – № 1(11). – С. 24-28.
2. Брыксина В. А., Цыганкова Л. Е., АLEXINA О. В., Курьято Н. А. Противокоррозионная защита стали дротаверином в 0,5 M растворе H_2SO_4 // Практика противокоррозионной защиты. – 2023. – Т. 28, № 2. – С. 7-16. doi: 10.31615/j.corros.prot.2023.108.2-1



3. Chigondo M. et al. Recent natural corrosion inhibitors for mild steel: an overview // Journal of Chemistry, 2016. – Art. 6208937. doi: 10.1155/2016/6208937
4. Raja P. B., Sethuraman M. G. Natural products as corrosion inhibitor for metals in corrosive media—a review // Materials letters, 2008. – Vol. 62, No 1. – P. 113-116. doi: 10.1016/j.matlet.2007.04.079
5. Verma C. et al. An overview on plant extracts as environmental sustainable and green corrosion inhibitors for metals and alloys in aggressive corrosive media // Journal of molecular liquids, 2018. – Vol. 266. – P. 577-590. doi: 10.1016/j.molliq.2018.06.110
6. Miralrio A., Espinoza Vázquez A. Plant extracts as green corrosion inhibitors for different metal surfaces and corrosive media: a review // Processes, 2020. – Vol. 8, No 8. – Art. 942. doi: 10.3390/pr8080942
7. Yadav M. et al. A review on biomass-derived materials and their applications as corrosion inhibitors, catalysts, food and drug delivery agents // Current Research in Green and Sustainable Chemistry. – 2021. – Vol. 4. – Art. 100153. doi: 10.1016/j.crgsc.2021.100153
8. Цыганкова Л. Е. и др. Коррозия и защита стали композициями на базе рапсового масла в атмосфере с повышенной концентрацией SO_2 // Практика противокоррозионной защиты. – 2013. – № 1(67). С. 33-37.
9. Dastmalchi K et al. Chemical composition and in vitro antioxidative activity of a lemon balm (*Melissa officinalis* L.) extract // LWT-Food Science and Technology. – 2008. – Vol. 41, № 3. – P. 391-400. doi: 10.1016/j.lwt.2007.03.007
10. Miraj S., Rafieian-Kopaei, Kiani S. *Melissa officinalis* L: A Review study with an antioxidant prospective // Journal of evidence-based complementary & alternative medicine. – 2017. – Vol. 22, № 3. – P. 385-394. doi: 10.1177/2156587216663433
11. Petrisor G. et al. *Melissa officinalis*: Composition, pharmacological effects and derived release systems—A review // International Journal of Molecular Sciences. – 2022. – Vol. 23, № 7. – Art. 3591. doi: 10.3390/ijms23073591
12. Bhardwaj N., Sharma P., Kumar V. Phytochemicals as steel corrosion inhibitor: an insight into mechanism // Corrosion Reviews. – 2021. – Vol. 39, № 1. – P. 27-41. doi: 10.1515/corrrev-2020-0046
13. Popoola L. T. Organic green corrosion inhibitors (OGCIs): a critical review // Corrosion Reviews. – 2019. – Vol. 37, № 2. – P. 71-102. doi: 10.1515/corrrev-2018-0058
14. Kadhim A et al. Corrosion inhibitors. A review // International Journal of Corrosion and Scale Inhibition. – 2021. – Vol. 10, № 1. – P. 54-67. doi: 10.17675/2305-6894-2021-10-1-3
15. Nahle A. et al. Evaluation of *Melissa officinalis* extract and oil as eco-friendly corrosion inhibitor for carbon steel in acidic chloride solutions // Oriental Journal of Chemistry. – 2016. – Vol. 32, No 4. – P. 1909-1921. doi: 10.13005/ojc/320417
16. Fouda A. S., El-Mgeed A. A., El-Salam S. A. *Melissa officinalis* aqueous plant extract as eco-friendly corrosion inhibitor for carbon steel in aqueous solutions. Der Pharma Chemica. – 2015. – Vol. 7, № 7. – P. 27-38.
17. El-Etre A. Y., Megahed H. E., Refaat S. M. Carbon steel corrosion in HCl in the presence of aqueous extract of *Melissa Officinalis*. Journal of Basic and Environmental Sciences. – 2015. – Vol. 5. – P. 52-62.
18. Yuan X. Z. et al. EIS equivalent circuits // Electrochemical Impedance Spectroscopy in PEM Fuel Cells: Fundamentals and Applications. – Berlin: Springer. – 2010. – P. 139-192. doi: 10.1007/978-1-84882-846-9_4
19. Bondarenko A. S, Ragoisha G. A. Inverse problem in potentiodynamic electrochemical impedance spectroscopy // Progress in Chemometrics Research. – New York: Nova Science Publishers. – 2005. – P. 89-102. – The software is available online at <http://www.abc.chemistry.bsu.by/vi/analyser/>.
20. Киченко А. Б., Кушнаренко В. М. О некорректности точных значений оценки защитного действия ингибиторов коррозии // Практика противокоррозионной защиты. – 2005. – № 4(38). – С. 17-22.
21. Harvey T. J., Walsh F. C., Nahlé A. H. A review of inhibitors for the corrosion of transition metals in aqueous acids // Journal of Molecular Liquids. – 2018. – Vol. 266. – P. 160-175. doi: 10.1016/j.molliq.2018.06.014
22. Goyal M. et al. Organic corrosion inhibitors for industrial cleaning of ferrous and non-ferrous metals in acidic solutions: A review // Journal of Molecular Liquids. – 2018. – Vol. 256. – P. 565-573. doi: <https://doi.org/10.1016/j>



molliq.2018.02.045

References

1. Abdullaev, T. A. (1999). Inhibitor corrosion on the basis of waste products. *Theory and Practice of Corrosion Protection*, 1(11), 24-28. (in Russ.)
2. Bryksina, V. A., Tsygankova, L. E., Alekhina, O. V., & Kur'yato, N. A. (2023). Anticorrosive protection of steel with drotaverine in 0.5 M H₂SO₄ solution. *Theory and Practice of Corrosion Protection*, 28(2), 7-16. doi: 10.31615/j.corros.prot.2023.108.2-1 (in Russ.)
3. Chigondo, M. et al (2016). Recent natural corrosion inhibitors for mild steel: an overview. *Journal of Chemistry*, 6208937. doi: 10.1155/2016/6208937
4. Raja, P. B., Sethuraman, M. G (2008). Natural products as corrosion inhibitor for metals in corrosive media-a review. *Materials letters*, 62(1), 113-116. doi: 10.1016/j.matlet.2007.04.079
5. Verma, C. et al (2018). An overview on plant extracts as environmental sustainable and green corrosion inhibitors for metals and alloys in aggressive corrosive media. *Journal of molecular liquids*, 266, 577-590. doi: 10.1016/j.molliq.2018.06.110
6. Miralrio, A., Espinoza Vázquez, A (2020). Plant extracts as green corrosion inhibitors for different metal surfaces and corrosive media: a review. *Processes*, 8(8), 942. doi: 10.3390/pr8080942
7. Yadav, M. et al (2021). A review on biomass-derived materials and their applications as corrosion inhibitors, catalysts, food and drug delivery agents. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 4, 100153. doi: 10.1016/j.crgsc.2021.100153
8. Tsygankova, L. E. et al (2013). Corrosion and protection of steel by compositions on base of colza oil with atmosphere with heightened SO₂ concentration. *Theory and Practice of Corrosion Protection*, 1(67), 33-37. (in Russ.)
9. Dastmalchi, K et al (2008). Chemical composition and in vitro antioxidative activity of a lemon balm (*Melissa officinalis* L.) extract. *LWT-Food Science and Technology*, 41(3), 391-400. doi: 10.1016/j.lwt.2007.03.007
10. Miraj, S., Rafieian-Kopaei, Kiani, S. (2017). *Melissa officinalis* L: A Review study with an antioxidant prospective. *Journal of evidence-based complementary & alternative medicine*, 22(3), 385-394. doi: 10.1177/2156587216663433
11. Petrisor, G et al. (2022). *Melissa officinalis*: Composition, pharmacological effects and derived release systems-A review. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(7), 3591. doi: 10.3390/ijms23073591
12. Bhardwaj, N., Sharma, P., Kumar, V. (2021). Phytochemicals as steel corrosion inhibitor: an insight into mechanism. *Corrosion Reviews*, 39(1), 27-41. doi: 10.1515/correv-2020-0046
13. Popoola, L. T. (2019). Organic green corrosion inhibitors (OGCIs): a critical review. *Corrosion Reviews*, 37(2), 71-102. doi: 10.1515/correv-2018-0058
14. Kadhim, A et al (2021). Corrosion inhibitors. A review. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 10(1), 54-67. doi: 10.17675/2305-6894-2021-10-1-3
15. Nahle, A., et al (2016). Evaluation of *Melissa officinalis* extract and oil as eco-friendly corrosion inhibitor for carbon steel in acidic chloride solutions. *Oriental Journal of Chemistry*, 32(4), 1909-1921. doi: 10.13005/ojc/320417
16. Fouda, A. S., El-Mgeed, A. A., & El-Salam, S. A. (2015). *Melissa officinalis* aqueous plant extract as eco-friendly corrosion inhibitor for carbon steel in aqueous solutions. *Der Pharma Chemica*, 7(7), 27-38.
17. El-Etre, A. Y., Megahed, H. E., & Refaat, S. M. (2015). Carbon steel corrosion in HCl in the presence of aqueous extract of *Melissa Officinalis*. *Journal of Basic and Environmental Sciences*, 5, 52-62.
18. Yuan, X. Z. et al (2010). EIS equivalent circuits. *Electrochemical Impedance Spectroscopy in PEM Fuel Cells: Fundamentals and Applications*. Berlin: Springer, pp. 139-192. doi: 10.1007/978-1-84882-846-9_4
19. Bondarenko, A. S, Ragoisha, G. A (2005). Inverse problem in potentiodynamic electrochemical impedance spectroscopy. *Progress in Chemometrics Research*; New York: Nova Science Publishers, pp. 89-102 (the software is available online at <http://www.abc.chemistry.bsu.by/vi/analyser/>)
20. Kichenko, A. B., Kushnarenko, V. M. (2005). Regarding the inaccuracy of the exact values of corrosion inhibitors protective effect. *Theory and Practice of Corrosion Protection*, 4(38), 17-22. (in Russ.)
21. Harvey, T. J., Walsh, F. C., & Nahlé, A. H. (2018). A review of inhibitors for the



corrosion of transition metals in aqueous acids. *Journal of Molecular Liquids*, 266, 160-175. doi: 10.1016/j.molliq.2018.06.014

22. Goyal, M. et al (2018). Organic corrosion

inhibitors for industrial cleaning of ferrous and non-ferrous metals in acidic solutions: A review. *Journal of Molecular Liquids*, 256, 565-573. doi: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.02.045>

Информация об авторах

Николайчук Павел Анатольевич, м.н.с., научно-исследовательская лаборатория «Перспективные материалы для промышленности и биомедицины», Курганский государственный университет (КГУ), г. Курган, Российская Федерация

Васильев Павел Андреевич, м.н.с., научно-исследовательская лаборатория «Перспективные материалы для промышленности и биомедицины», КГУ, г. Курган, Российская Федерация

Енова Юлия Андреевна, м.н.с., научно-исследовательская лаборатория «Перспективные материалы для промышленности и биомедицины», КГУ, г. Курган, Российская Федерация

Information about authors

Pavel A. Nikolaychuk, junior scientist, research laboratory "Advanced materials for industry and biomedicine", Kurgan State University (KSU), Kurgan, Russian Federation

Pavel A. Vasilyev, junior scientist, research laboratory "Advanced materials for industry and biomedicine", KSU, Kurgan, Russian Federation

Yulia A. Enova, junior scientist, research laboratory "Advanced materials for industry and biomedicine", KSU, Kurgan, Russian Federation

В.И. Вигдорович, Л.Е. Цыганкова

Ингибирование сероводородной и углекислотной коррозии металлов. Универсализм ингибиторов

Объем издания: 15,25 п.л. (253 стр.)

Стоимость 600 рублей

В монографии обобщены литературные данные и результаты многолетних исследований, выполненных под руководством авторов по вопросам ингибирования коррозии углеродистой стали в сероводородных и углекислотных средах. Значительное внимание уделено разработке критериев защитной эффективности ингибиторов, особенностям кинетики и механизма разрушения стали в присутствии H_2S и CO_2 в слабокислых и близких к нейтральным минерализованным средам. Анализируется действие большого количества промышленных ингибиторов и лабораторных образцов, в том числе на основе имидазолинов, алифатических, циклических и оксиэтилированных аминов. Рассматривается их защитная эффективность, влияние на кинетику электродных реакций, бактерицидные свойства, и интегральная токсикологическая характеристика, торможение твердофазной диффузии водорода и воздействие на сохраняемость механических свойств стали в сероводородных и углекислотных средах и при совместном присутствии H_2S и CO_2 .