

ХИМИЯ
CHEMISTRYУДК 620.193.27
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2026-70-2-126-134>Поступило в редакцию 16.06.2025
Received 16.06.2025**М. А. Осипенко¹, И. И. Курило¹, академик А. Р. Цыганов²**¹*Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь
ул. Свердлова, 13а, 220006, Минск, Республика Беларусь*²*Международный институт управления и предпринимательства, Минск, Республика Беларусь
ул. Славинского, 1/3, 220086, Минск, Республика Беларусь***ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ДИНАМИЧЕСКОЙ ИМПЕДАНСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ
ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ИЗОТЕРМ АДсорбЦИИ МОЛИБДАТ-ИОНОВ
НА ПОВЕРХНОСТИ СПЛАВА МАГНИЯ**

Аннотация. Методом динамической электрохимической импедансной спектроскопии изучено коррозионное поведение сплава магния AZ31 в 0,05 моль/дм³ растворе хлорида натрия в присутствии молибдата натрия, который вводили в коррозионную среду постепенно с постоянной скоростью до итоговой концентрации 50 ммоль/дм³. Полученные в данных условиях параметры многосинусоидального импедансного мониторинга соответствовали мгновенной концентрации ингибитора в конкретный момент времени, что позволило установить зависимость рассчитанных значений защитного эффекта от концентрации молибдат-ионов в растворе. На основе предположения, что полное заполнение поверхности ингибитором дает 100 %-ное снижение скорости коррозии, а, следовательно, значения степени заполнения поверхности соответствуют защитному эффекту ингибитора, построены кривые адсорбции молибдат-ионов на поверхности сплава магния AZ31 в разных феноменологических моделях адсорбции: Ленгмюра, Темкина, Флори–Хаггинса и Фрумкина.

Ключевые слова: сплавы магния, молибдат натрия, ингибитор коррозии, динамическая электрохимическая импедансная спектроскопия, защитный эффект, изотерма адсорбции

Для цитирования. Осипенко, М. А. Применение метода динамической импедансной спектроскопии для построения изотерм адсорбции молибдат-ионов на поверхности сплава магния / М. А. Осипенко, И. И. Курило, А. Р. Цыганов // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2026. – Т. 70, № 2. – С. 126–134. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2026-70-2-126-134>

Maria A. Osipenko¹, Irina I. Kurilo¹, Academician Aliaksandr R. Tsyhanau²¹*Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus
13a, Sverdlov Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus*²*International Institute of Management and Entrepreneurship, Minsk, Republic of Belarus
1/3, Slavinsky Str., 220086, Minsk, Republic of Belarus***APPLICATION OF DYNAMIC IMPEDANCE SPECTROSCOPY FOR CONSTRUCTION
OF ADSORPTION ISOTHERMS OF MOLYBDATE IONS ON MAGNESIUM ALLOY**

Abstract. Dynamic electrochemical impedance spectroscopy was used to examine the corrosion behavior of AZ31 magnesium alloy in 0.05 mol/dm³ sodium chloride solution containing Na₂MoO₄ inhibitor, which was gradually added to the solution up to the concentration of 50 mmol/dm³. The parameters of multisinusoidal impedance monitoring obtained under these conditions corresponded to the instantaneous concentration of the inhibitor at a specific point in time. This made it possible to establish the dependence of the calculated values of the protective effect on the concentration of molybdate ions in the solution. Based on the assumption that complete coverage of the surface by the inhibitor provides 100 % reduction of the corrosion rate and the surface degree coverage corresponds to the protective effect of the inhibitor, the adsorption curves of molybdate ions on the surface of AZ31 magnesium alloy were constructed utilizing Langmuir, Temkin, Flory–Huggins, and Frumkin adsorption models.

Keywords: magnesium alloy, sodium molybdate, corrosion inhibitor, dynamic electrochemical impedance spectroscopy, inhibition efficiency, adsorption isotherm

For citation. Osipenko M. A., Kurilo I. I., Tsyhanau A. R. Application of dynamic impedance spectroscopy for construction of adsorption isotherms of molybdate ions on magnesium alloy. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2026, vol. 70, no. 2, pp. 126–134 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2026-70-2-126-134>

Введение. Важной задачей физической химии является установление механизмов протекания химических процессов и выявление природы факторов, оказывающих наиболее существенное влияние на их кинетику. Одной из основных стадий механизма ингибирования электрохимической коррозии металлов и сплавов является адсорбция. Адсорбция ингибитора на поверхности защищаемого металла осложнена протекающими химическими и электрохимическими процессами, поэтому в настоящее время для ее изучения активно используют ряд электрохимических методов исследований, в частности, электрохимическую импедансную спектроскопию (ЭИС). В общем случае для измерения импеданса исследуемая электрохимическая система должна соответствовать трем основным принципам: линейности, причинности и стационарности [1]. В условиях реального эксперимента достижение последнего условия практически невозможно. Это приводит к получению спектров электрохимического импеданса с низким соотношением сигнал/шум в области низких частот и сопровождается значительной погрешностью измерений. В последнее время в электрохимических исследованиях все чаще вместо классической ЭИС используют метод динамической электрохимической импедансной спектроскопии (ДЭИС), который позволяет практически мгновенно регистрировать спектры импеданса в достаточно широком диапазоне частот и проводить мониторинг процессов коррозии в нестационарных системах при изменении токовой нагрузки, времени контакта образца с коррозионной средой, ее состава и температуры [2]. Анализ спектров ДЭИС позволяет оценить одну из основных характеристик ингибиторов коррозии – степень заполнения поверхности защищаемого металла θ в зависимости от концентрации ингибитора в растворе. Определение этого параметра основывается на предположении, что полное заполнение поверхности ингибитором дает 100 %-ное снижение скорости коррозии, а следовательно, значения θ соответствует защитному эффекту ингибитора IE [3–5].

Цель работы – изучение возможности использования метода ДЭИС для построения изотерм адсорбции молибдата натрия на сплаве магния AZ31 в 0,05 М растворе NaCl в разных феноменологических моделях адсорбции.

Выбор объектов исследований обусловлен, прежде всего, интенсивно возрастающими объемами получения и промышленного использования сплавов магния. Магний является самым легким конструкционным материалом, характеризуется высокими значениями удельной прочности и теплоемкости, хорошей обрабатываемостью, способностью поглощать энергию удара и вибрационных колебаний, биосовместимостью. Благодаря своим уникальным свойствам сплавы магния востребованы в авиационной, ракетно-космической, автомобильной, химической, нефтехимической промышленности, в приборостроении и медицине. Наиболее широкое промышленное применение получили алюмосодержащие магниевые сплавы серии AZ (система Mg–Al–Zn). Легирование сплавов магния алюминием и цинком способствует увеличению их коррозионной устойчивости, прочности и улучшению ряда физико-механических свойств. Однако даже для систем Mg–Al–Zn коррозионная устойчивость не удовлетворяет промышленным запросам. Основной стратегией повышения коррозионной устойчивости этих материалов, наряду с легированием, является химическая или электрохимическая модификация поверхности. В мировой практике в составах ингибиторов, пигментов, конверсионных и анодно-оксидных покрытий, предназначенных для антикоррозионной защиты магния и его сплавов, длительное время использовали отличающиеся токсичностью и канцерогенностью соединения Cr(VI). Альтернативой хроматам являются близкие им по строению соединения оксоанионов переходных металлов, таких как молибдаты, которые наряду с экологической безопасностью обладают эффектом «самозалечивания» при механических повреждениях покрытий.

Материалы и методы исследования. Для исследований использовали образцы магниевых сплавов AZ31, номинальный элементный состав которого представлен следующим образом, мас. %: 3 % Al, 1 % Zn, 0,3 % Mn и Mg – остальное.

Подготовка образцов магниевых сплавов, размеры которых составляли $10 \times 10 \times 1$ мм, включала полирование поверхности в среде изопропанола с последовательным использованием наждачной бумаги P250, P500, P800 и P1200 на горизонтальном шлифовально-полировальном станке Struers Labopol 60 (Struers Ltd.) до финального размера зерна ~ 10 мкм; очистку в ультразвуковой ванне (STEGLER 3DT) в течение 10 мин в среде изопропанола для удаления с поверхности образцов абразива и загрязнений; сушку.

Коррозионные исследования проводили с использованием потенциостата/гальваностата Biologic, соединенного с измерительной платой PXI-4464 для генерации сигнала переменного тока и платой PXI-6124 для сигнала переменного/постоянного тока (шасси PXIe-1073). Спектры динамического электрохимического импеданса снимали в течение 1000 с в диапазоне частот от 22000 до 0,7 Гц с 10 точками на декаду частоты; частота дискретизации составляла 128 кГц. Исследования проводили в растворе хлорида натрия с концентрацией 0,05 моль/дм³ без и в присутствии молибдата натрия, который вводили в коррозионную среду постепенно с постоянной скоростью до итоговой концентрации 50 ммоль/дм³.

Результаты и их обсуждение. На рис. 1 представлены спектры ДЭИС сплавов AZ31 в виде диаграмм Найквиста, полученные в течение 1000 с в 0,05 М растворе NaCl (рис. 1, *a*), а также в 0,05 М растворе NaCl, содержащем молибдат натрия (рис. 1, *b*).

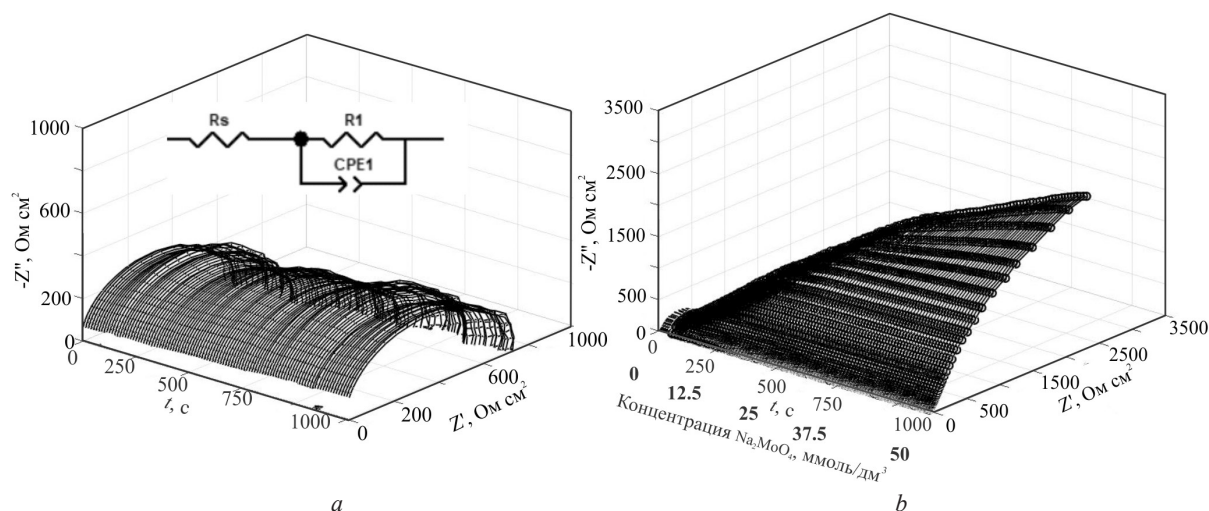
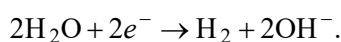
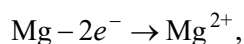


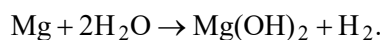
Рис. 1. Спектры ДЭИС в виде диаграмм Найквиста сплавов магния AZ31 в 0,05 моль/дм³ NaCl (*a*) и в 0,05 моль/дм³ NaCl, содержащем 0–50 ммоль/дм³ Na₂MoO₄ (*b*)

Fig. 1. Nyquist DEIS plots in 0.05 mol/dm³ NaCl (*a*) and with 0–50 mmol/dm³ addition of Na₂MoO₄ (*b*)

В растворе NaCl для исследуемого образца наблюдаются незначительные колебания радиусов спектров импеданса во времени. Это объясняется тем, что коррозия магния протекает с водородной деполяризацией [6; 7]:

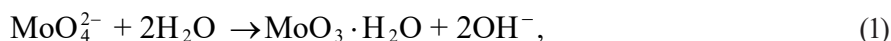


Суммарное уравнение

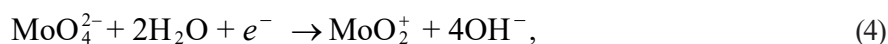
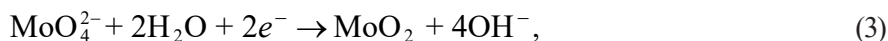


При увеличении времени экспозиции образца в коррозионной среде резкого уменьшения радиусов спектров для этой системы не наблюдалось, что может свидетельствовать о быстром формировании на поверхности плотного слоя продуктов коррозии, наличие которого препятствует активной ионизации компонентов магниевых сплавов.

Введение в коррозионную среду первых порций ингибитора Na_2MoO_4 приводит к резкому возрастанию радиусов спектров импеданса, а последующее постепенное увеличение в растворе концентрации молибдат-ионов – к монотонному возрастанию радиусов годографов импеданса. Наблюдаемые эффекты могут свидетельствовать о практически мгновенной адсорбции молибдат-ионов на поверхности магниевых сплавов, сопровождающейся образованием защитных пленок. Формирование на поверхности магниевых сплавов защитных молибденсодержащих слоев можно описать следующими процессами. Известно, что молибдат натрия хорошо растворим в водном растворе NaCl и диссоциирует с образованием иона MoO_4^{2-} . Образующийся молибдат-ион может подвергаться гидролизу и/или вступать в реакцию димеризации с образованием димолибдат-аниона [8]:



Кроме того, при контакте раствора с магниевой подложкой возможно протекание ряда окислительно-восстановительных процессов, сопровождающихся образованием соединений молибдена в более низких степенях окисления:



а также образованием поликомплексных соединений молибдена (V, VI) переменного состава, известных как молибденовая синь [9]:



На всех приведенных диаграммах Найквиста (рис. 1) можно выделить одну временную константу емкостной природы. Для интерпретации полученных данных была использована представленная на вставке к рис. 1 эквивалентная схема, где: R_s – сопротивление электролита; R_1 – сопротивление, характеризующее поверхность образца, покрытую слоем ингибитора и/или продуктов коррозии; CPE1 – элемент постоянной фазы, характеризующий емкостный отклик поверхностной пленки, образованной на магниевом электроде. Динамика значений сопротивления переноса заряда R_1 , рассчитанных по результатам подбора параметров эквивалентной схемы, представлена на рис. 2, а.

Анализ полученных результатов показал, что при экспозиции сплава магния в растворе NaCl в течение 1000 с значение R_1 практически остается постоянным и составляет около $670 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$. В свою очередь, постепенное введение в систему Na_2MoO_4 уже при концентрации 5 ммоль/дм^3 ($\approx 100 \text{ с}$) приводит к резкому увеличению значений сопротивления R_1 . После экспозиции образца в растворе в течение 1000 с, когда концентрация ингибитора достигает 50 ммоль/дм^3 , значение R_1 составляет $8904 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$.

Поскольку скорость подачи ингибитора в коррозионную среду постоянна, полученные параметры многосинусоидального импедансного мониторинга можно отнести к мгновенной концентрации ингибитора в исследуемых средах в конкретный момент времени. Следовательно, эффективность ингибирования (IE) также можно оценить по данным ДЭИС по формуле

$$IE, \% = \frac{1/R_{1,i} - 1/R_{1,i}^0}{1/R_{1,i}},$$

где $R_{1,i}^0$, $R_{1,i}$ – сопротивление в i -й момент времени в растворе без ингибитора и при его наличии соответственно.

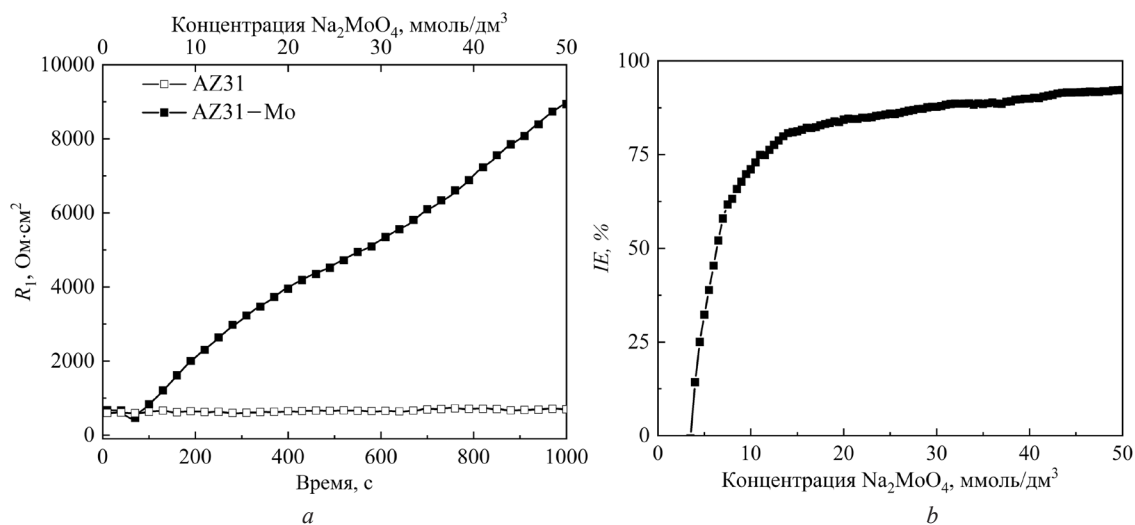


Рис. 2. Динамика значений сопротивления R_1 , характеризующего покрытую слоем ингибитора и/или продуктов коррозии поверхность образца сплава магния AZ31 (a), и защитный эффект молибдата натрия (b).

Открытые маркеры соответствуют данным, полученным в $0,05 \text{ моль}/\text{дм}^3 \text{ NaCl}$, а закрашенные – в $0,05 \text{ моль}/\text{дм}^3 \text{ NaCl}$, содержащем $0\text{--}50 \text{ ммоль}/\text{дм}^3 \text{ Na}_2\text{MoO}_4$

Fig. 2. Time dependence of the resistance of the oxide/hydroxide surface layer or protective film R_1 (a) and inhibition efficiency (b) depending on the concentration of Na_2MoO_4 . Open markers correspond to the results that were obtained in $0.05 \text{ mol}/\text{dm}^3 \text{ NaCl}$, filled markers correspond to the results that were obtained in $0.05 \text{ mol}/\text{dm}^3 \text{ NaCl}$ containing $0\text{--}50 \text{ mmol}/\text{dm}^3 \text{ Na}_2\text{MoO}_4$

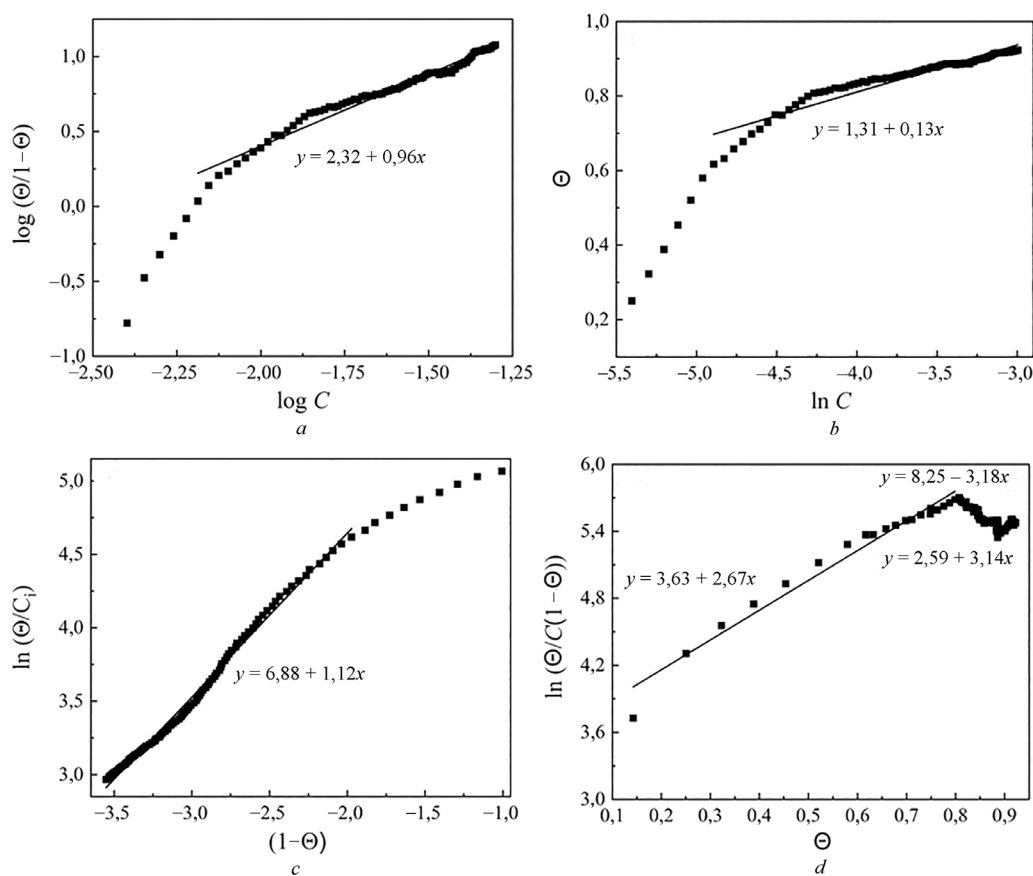


Рис. 3. Изотермы адсорбции Ленгмюра (a), Темкина (b), Флори–Хаггинса (c) и Фрумкина (d) для сплава магния AZ31 в $0,05 \text{ моль}/\text{дм}^3$ растворе хлорида натрия, содержащем $0\text{--}50 \text{ ммоль}/\text{дм}^3 \text{ Na}_2\text{MoO}_4$

Fig. 3. Langmuir (a), Temkin (b), Flory–Huggins (c) and Frumkin (d) adsorption isotherms for AZ31 magnesium alloy in $0.05 \text{ mol}/\text{dm}^3 \text{ NaCl}$ with $0\text{--}50 \text{ mmol}/\text{dm}^3$ addition of Na_2MoO_4

Рассчитанные значения защитного эффекта в зависимости от концентрации ингибитора в 0,05 моль/дм³ растворе NaCl приведены на рис. 2, *b*. Установлено, что защитный эффект экспоненциально увеличивается при низких концентрациях ингибитора, а после достижения ≈ 15 ммоль/дм³ Na₂MoO₄ значения *IE* остаются практически постоянными и составляют ≈ 82 %.

Учитывая, что значения степени заполнения поверхности сплава магния AZ31 молибдат-ионами θ соответствуют защитному эффекту ингибитора *IE*, рассчитанному по данным ДЭИС (рис. 2), были построены изотермы адсорбции Ленгмюра, Темкина, Фрумкина и Флори–Хаггинса, которые представлены на рис. 3 [10–12].

В расчетах принималось, что для мономолекулярного слоя изотерма адсорбции Ленгмюра не учитывает взаимодействие между частицами ингибитора в адсорбированном состоянии на поверхности металла и зависит от степени заполнения поверхности электрода ингибитором θ в соответствии с формулой

$$K_{\text{ads}} C_i = \frac{\theta}{1-\theta},$$

$$\log K_{\text{ads}} + \log C_i = \log \left(\frac{\theta}{1-\theta} \right),$$

где K_{ads} – константа адсорбции; C_i – текущая концентрация ингибитора, моль/дм³.

При построении изотермы адсорбции Темкина предполагалось, что адсорбция частиц ингибитора происходит на энергетически выгодных участках поверхности металла и может быть выражена формулой

$$K_{\text{ads}} C_i = \exp(f \theta),$$

$$\frac{1}{f} \ln K_{\text{ads}} + \frac{1}{f} \ln C_i = \theta,$$

где f – константа Темкина, характеризующая энергетическую неоднородность поверхности металла.

Изотерма адсорбции Флори–Хаггинса учитывает количество молекул воды (x), замещенных одним ионом ингибитора в двойном электрическом слое на границе раздела металл–раствор, и может быть выражена формулой

$$K_{\text{ads}} C_i = \frac{\theta}{(1-\theta)^x},$$

$$\ln \frac{\theta}{C_i} = \ln K_{\text{ads}} + x \ln(1-\theta).$$

Изотерма адсорбции Фрумкина, учитывающая взаимодействие между частицами ингибитора, адсорбированными на границе раздела металл–раствор, может быть выражена формулой

$$K_{\text{ads}} C_i = \left(\frac{\theta}{1-\theta} \right) \exp(f_F \theta),$$

$$\ln \frac{\theta}{C_i(1-\theta)} = \ln K_{\text{ads}} + \alpha_F \theta,$$

где f_F – константа Фрумкина, характеризующая энергию взаимодействия между адсорбированными частицами ингибитора ($f_F = -2\alpha_F$).

Изотермы адсорбции молибдат-ионов на поверхности образцов исследуемого сплава магния, построенные в координатах линейной формы соответствующих уравнений, а также рассчитанные на их основе параметры процессов адсорбции для различных моделей представлены на рис. 3 и в таблице.

Параметры процесса адсорбции молибдат-ионов на поверхности сплава AZ31 по данным изотерм адсорбции

Parameters of the adsorption of molybdate ions on the surface of AZ31 alloy base on adsorption isotherms

Изотерма адсорбции Adsorption isotherm	Диапазон концентраций Na ₂ MoO ₄ , ммоль/дм ³ Concentration range of Na ₂ MoO ₄ , mmol/dm ³	Уравнение Equation	Коэффициент детерминации Coefficient of determination	Соответствующие параметры в уравнениях изотерм The corresponding parameters in the isotherm equations
Ленгмюра	7–50	$y = 2,32 + 0,96x$	0,970	
Темкина	7–50	$y = 1,31 + 0,13x$	0,915	$f = 7,69$
Флори–Хаггинса	7–50	$y = 6,88 + 1,12x$	0,994	$x = 1,12$
Фрумкина	4–15	$y = 3,63 + 2,67x$	0,968	$\alpha_F = 1,33$
	15–40	$y = 8,25 - 3,18x$	0,872	$\alpha_F = -1,59$
	40–50	$y = 2,59 + 3,14x$	0,662	$\alpha_F = 1,57$

Линеаризация изотерм в координатах, соответствующих моделям Ленгмюра, Темкина, Флори–Хаггинса, наблюдается в диапазоне концентраций ингибитора от 7 до 50 ммоль/дм³. Анализ рассчитанных значений коэффициента детерминации (R^2) для линейных участков рассматриваемых моделей показал, что значения R^2 для изотерм адсорбции Ленгмюра и Темкина составляют 0,970 и 0,915 соответственно. Для модели Фрумкина на изотерме присутствуют три линейных участка с различными угловыми коэффициентами. Первый линейный участок модели Фрумкина, наблюдаемый в области концентраций Na₂MoO₄ 4–15 ммоль/дм³, также характеризуется достаточно высоким значением коэффициента детерминации ($R^2 = 0,968$). Однако наиболее достоверно полученные результаты описываются моделью Флори–Хаггинса ($R^2 = 0,994$). Поэтому для расчета термодинамических параметров и описания процесса адсорбции молибдат-ионов на поверхности сплава магния AZ31 целесообразно использовать значение константы адсорбции, полученное из анализа изотермы этого типа.

Анализ изотермы Флори–Хаггинса позволил установить, что значение параметра x , учитывающего количество молекул воды, замещенных одним ионом ингибитора, составляет 1,12, т. е. на границе раздела фаз металл–раствор одна молекула воды была замещена 1,12 молибдат-ионами. Параметр α_F , полученный для изотермы Фрумкина, показал, что в диапазоне исследуемых концентраций Na₂MoO₄ для их минимальных (4–15 ммоль/дм³) и максимальных (40–50 ммоль/дм³) значений между адсорбированными ионами ингибитора присутствуют силы притяжения, а для растворов с промежуточными концентрациями молибдата (15–40 ммоль/дм³) – силы отталкивания. Значение полученного параметра Темкина (f), характеризующего неоднородность поверхности сплава, составило 7,69. Это свидетельствует о том, что на разных участках поверхности значения энергии связи между ионами ингибитора и входящими в состав сплава магнием атомами существенно различаются.

Изменение энергии Гиббса процесса адсорбции молибдат-ионов на поверхности магниевого сплава с использованием значения K_{ads} , полученного из анализа изотермы Флори–Хаггинса, было рассчитано по уравнению [13]

$$\Delta G_{298}^0 = -RT \ln(K_{ads} C_{H_2O}),$$

где C_{H_2O} – молярная концентрация воды (55,5 моль/дм³); R – универсальная газовая постоянная (8,314 Дж/(моль·К)); T – температура (298 К).

Согласно проведенным расчетам, значение ΔG_{298}^0 составило –27,0 кДж/моль, что свидетельствует о самопроизвольном протекании адсорбции молибдат-ионов на поверхности магниевого сплава. Как правило, значения $\Delta G_{298}^0 \geq -20$ кДж/моль характеризуют процесс физической адсорбции, а более отрицательные, чем –40 кДж/моль – хемосорбции. Анализ полученных данных показал, что на поверхности образцов протекает смешанная физико-химическая адсорбция, обусловленная как электростатическим взаимодействием между молибдат-ионами и катодными участками гетерогенной поверхности магниевого сплава, так и протеканием химических реакций в соответствии с уравнениями (1)–(5).

Заклучение. Таким образом, проведенные исследования показали, что метод динамической электрохимической импедансной спектроскопии может быть использован для анализа процессов адсорбции ингибиторов коррозии на поверхности защищаемого металла. Анализ спектров ДЭИС позволяет рассчитать защитный эффект ингибитора в зависимости от его содержания в коррозионной среде и по полученным данным оценить степень заполнения поверхности. Изотермы адсорбции, построенные по результатам ДЭИС сплава магния AZ31 в 0,05 М растворах хлорида натрия, содержащих 7–50 ммоль/дм³ Na₂MoO₄, показали, что закономерности квазиравновесной адсорбции ингибитора наиболее достоверно количественно описываются в рамках модели адсорбции Флори–Хаггинса.

Благодарности. Исследования выполнены при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект X24MB-008), а также ГПНИ «Химические процессы и технологии», задание 3.

Acknowledgements. This work was supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (grant no. X24MB-008), and State Program of Scientific Investigations “Chemical processes and technologies”, task 3.

Список использованных источников

1. Solomon, M. M. Carboxymethyl cellulose/silver nanoparticles composite: synthesis, characterization and application as a benign corrosion inhibitor for St37 steel in 15 % H₂SO₄ medium / M. M. Solomon, H. Gerengi, S. A. Umoren // *ACS Applied Materials & Interfaces*. – 2017. – Vol. 9, N 7. – P. 6376–6389. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b14153>
2. Understanding the corrosion behavior of the AZ91D alloy in simulated body fluid through the use of dynamic EIS / H. Gerengi, M. Cabrini, M. M. Solomon, E. Kaya // *ACS Omega*. – 2022. – Vol. 7, N 14. – P. 11929–11938. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c00066>
3. Wysocka, J. Evaluation of citric acid corrosion inhibition efficiency and passivation kinetics for aluminium alloys in alkaline media by means of dynamic impedance monitoring / J. Wysocka, S. Krakowiak, J. Ryl // *Electrochimica Acta*. – 2017. – Vol. 258. – P. 1463–1475. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.12.017>
4. Understanding the origin of high corrosion inhibition efficiency of bee products towards aluminium alloys in alkaline environments / J. Ryl, J. Wysocka, M. Cieslik [et al.] // *Electrochimica Acta*. – 2019. – Vol. 304. – P. 263–274. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.03.012>
5. Carboxylic acids as efficient corrosion inhibitors of aluminium alloys in alkaline media / J. Wysocka, M. Cieslik, S. Krakowiak, J. Ryl // *Electrochimica Acta*. – 2018. – Vol. 289. – P. 175–192. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.08.070>
6. Aqueous molybdate provides effective corrosion inhibition of WE43 magnesium alloy in sodium chloride solutions / D. S. Kharitonov, M. Zimowska, J. Ryl [et al.] // *Corrosion Science*. – 2021. – Vol. 190. – Art. 109664. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109664>
7. Exploring mechanism of corrosion inhibition of WE43 and AZ31 alloys by aqueous molybdate in Hank’s solution by multisine impedimetric monitoring / M. A. Osipenko, J. Karczewski, M. Dominów [et al.] // *Corrosion Science*. – 2024. – Vol. 231. – Art. 111979. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2024.111979>
8. Inhibitive effect of sodium molybdate on corrosion of AZ31 magnesium alloy in chloride solutions / M. A. Osipenko, D. S. Kharytonau, A. A. Kasach [et al.] // *Electrochimica Acta*. – 2022. – Vol. 414. – Art. 140175. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2022.140175>
9. The molybdenum blue reaction for the determination of orthophosphate revisited: Opening the black box / E. A. Nagul, I. D. McKelvie, P. Worsfold, S. D. Kolev // *Analytica Chimica Acta*. – 2015. – Vol. 890. – P. 60–82. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2015.07.030>
10. Kern, P. Adsorption of an organic corrosion inhibitor on iron and gold studied with a rotating EQCM / P. Kern, D. Landolt // *Journal of the Electrochemical Society*. – 2001. – Vol. 148, N 6 – Art. B228. <https://doi.org/10.1149/1.1369367>
11. Kokalj, A. On the use of the Langmuir and other adsorption isotherms in corrosion inhibition / A. Kokalj // *Corrosion Science*. – 2023. – Vol. 217. – Art. 111112. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2023.111112>
12. On the evaluation of metal-corrosion inhibitor interactions by adsorption isotherms / C. G. Vasilcsin, M. V. Putz, A. Kellenberger, M. L. Dan // *Journal of Molecular Structure*. – 2023. – Vol. 1286. – Art. 135643. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2023.135643>
13. Dhar, H. P. On the form of adsorption isotherms for substitutional adsorption of molecules of different sizes / H. P. Dhar, B. E. Conway, K. M. Joshi // *Electrochimica Acta*. – 1973. – Vol. 18, N 11. – P. 789–798. [https://doi.org/10.1016/0013-4686\(73\)85030-3](https://doi.org/10.1016/0013-4686(73)85030-3)

References

1. Solomon M. M., Gerengi H., Umoren S. A. Carboxymethyl cellulose/silver nanoparticles composite: synthesis, characterization and application as a benign corrosion inhibitor for St37 steel in 15 % H₂SO₄ medium. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, vol. 9, no. 7, pp. 6376–6389. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b14153>
2. Gerengi H., Cabrini M., Solomon M. M., Kaya E. Understanding the corrosion behavior of the AZ91D alloy in simulated body fluid through the use of dynamic EIS. *ACS Omega*, 2022, vol. 7, no. 14, pp. 11929–11938. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c00066>

3. Wysocka J., Krakowiak S., Ryl J. Evaluation of citric acid corrosion inhibition efficiency and passivation kinetics for aluminium alloys in alkaline media by means of dynamic impedance monitoring. *Electrochimica Acta*, 2017, vol. 258, pp. 1463–1475. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.12.017>
4. Ryl J., Wysocka J., Cieslik M., Gerengi H., Ossowski T., Krakowiak S., Niedzialkowski P. Understanding the origin of high corrosion inhibition efficiency of bee products towards aluminium alloys in alkaline environments. *Electrochimica Acta*, 2019, vol. 304, pp. 263–274. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.03.012>
5. Wysocka J., Cieslik M., Krakowiak S., Ryl J. Carboxylic acids as efficient corrosion inhibitors of aluminium alloys in alkaline media. *Electrochimica Acta*, 2018, vol. 289, pp. 175–192. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.08.070>
6. Kharitonov D. S., Zimowska M., Ryl J., Zieliński A., Osipenko M. A., Adamiec J., Wrzesińska A., Claesson P. M., Kurilo I. I. Aqueous molybdate provides effective corrosion inhibition of WE43 magnesium alloy in sodium chloride solutions. *Corrosion Science*, 2021, vol. 190, art. 109664. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109664>
7. Osipenko M. A., Karczewski J., Dominów M., Prześniak-Welenc M., Gurgul J., Kurilo I. I., Ryl J., Kharytonau D. S. Exploring mechanism of corrosion inhibition of WE43 and AZ31 alloys by aqueous molybdate in Hank's solution by multisine impedimetric monitoring. *Corrosion Science*, 2024, vol. 231, art. 111979. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2024.111979>
8. Osipenko M. A., Kharytonau D. S., Kasach A. A., Ryl J., Adamiec J., Kurilo I. I. Inhibitive effect of sodium molybdate on corrosion of AZ31 magnesium alloy in chloride solutions. *Electrochimica Acta*, 2022, vol. 414, art. 140175. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2022.140175>
9. Nagul E. A., McKelvie I. D., Worsfold P., Kolev S. D. The molybdenum blue reaction for the determination of orthophosphate revisited: Opening the black box. *Analytica Chimica Acta*, 2015, vol. 890, pp. 60–82. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2015.07.030>
10. Kern P., Landolt D. Adsorption of an organic corrosion inhibitor on iron and gold studied with a rotating EQCM. *Journal of the Electrochemical Society*, 2001, vol. 148, no. 6, art. B228. <https://doi.org/10.1149/1.1369367>
11. Kokalj A. On the use of the Langmuir and other adsorption isotherms in corrosion inhibition. *Corrosion Science*, 2023, vol. 217, art. 111112. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2023.111112>
12. Vaszilcsin C. G., Putz M. V., Kellenberger A., Dan M. L. On the evaluation of metal-corrosion inhibitor interactions by adsorption isotherms. *Journal of Molecular Structure*, 2023, vol. 1286, art. 135643. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2023.135643>
13. Dhar H. P., Conway B. E., Joshi K. M. On the form of adsorption isotherms for substitutional adsorption of molecules of different sizes. *Electrochimica Acta*, 1973, vol. 18, no. 11, pp. 789–798. [https://doi.org/10.1016/0013-4686\(73\)85030-3](https://doi.org/10.1016/0013-4686(73)85030-3)

Информация об авторах

Осипенко Мария Александровна – инженер. E-mail: osipenko@belstu.by.

Курило Ирина Иосифовна – канд. хим. наук, доцент, заведующий кафедрой. E-mail: kurilo@belstu.by.

Цыганов Александр Риммович – академик, д-р с.-х. наук, канд. хим. наук, профессор, ректор. E-mail: imb@imb.by.

Information about the authors

Osipenko Maria A. – Engineer. E-mail: osipenko@belstu.by.

Kurilo Irina I. – Ph. D. (Chemistry), Associate Professor, Head of the Department. E-mail: kurilo@belstu.by.

Tsyhanau Aliaksandr R. – Academician, D. Sc. (Agrarian), Ph. D. (Chemistry), Professor, Rector. E-mail: imb@imb.by.