

Определение коррозионных характеристик в координатах Нейквиста при защите поверхности стали латексами

© А.А. Яковлева, Е.А. Анциферов, С.В. Садловский

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель – исследование коррозионного процесса на образцах стали Ст3, защищенных латексным покрытием 69Б-2к, выпускаемым ООО «Капител» (г. Иркутск). В исследованиях применялся метод электрохимической импедансной спектроскопии образцов стали с нанесенным трехкратно покрытием из латекса с помощью потенциостата-гальваностата PGSTAT302+FRA2, оснащенного программным обеспечением NOVA 1.8. Коррозионные исследования проводили при термостатировании ($25 \pm 0,2^\circ\text{C}$) рабочего пространства. Для определения скорости коррозии были проведены гравиметрические испытания с фиксированием изменений массы образцов за контролируемый промежуток времени (до 10 ч). В качестве электролита использовали 3% раствор хлорида натрия. Показано, что для описания механизма коррозионного процесса в большинстве случаев приемлемым оказывается использование эквивалентной электрохимической схемы с элементами Варбурга и Cotangent Hyperbolic, моделирующей протекание реакции на границе электрод-электролит. По результатам визуальных, гравиметрических и электрохимических исследований показано, что для поверхности стали Ст3 с покрытием из латекса 69Б-2к длительное время импеданс почти не изменяется. Очевидно, что поверхностный процесс связан с лимитирующей стадией диффузии растворителя через защитный слой. При этом электрохимически определенная скорость коррозии невелика и составила $\sim 0,164$ мм/год (для контрольных образцов – 0,75 мм/год). Таким образом, проведенные исследования подтвердили достаточно высокие защитные качества латекса 69Б-2к. Коррозионные показатели латекса связаны с его составом, компоненты которого не только обладают хорошими адгезионными качествами, но и активны по отношению к другим взаимодействиям, таким как химические взаимодействия компонентов между собой и с кристаллитами на поверхности металлов. По результатам экспериментальных исследований разработана эквивалентная электрическая схема. Модельный расчет, проведенный на ее основе, позволяет описывать экспериментальную кривую в координатах Нейквиста практически полностью.

Ключевые слова: коррозия, механизм, импеданс, эквивалентная схема, антикоррозионное покрытие, латекс

Для цитирования: Яковлева А.А., Анциферов Е.А., Садловский С.В. Определение коррозионных характеристик в координатах Нейквиста при защите поверхности стали латексами. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 4. С. 519–527. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-519-527>

Determination of corrosion characteristics of steel protected by a latex coating in Nyquist coordinates

Ariadna A. Yakovleva, Evgeniy A. Antsiferov, Sergey V. Sadlovsky

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: This paper investigates the corrosion process of steel St3 protected by latex coating 69B-2k produced by Kapitel Ltd (Irkutsk). Electrochemical impedance spectroscopy of steel samples with a threefold latex coating was carried out by a PGSTAT302 + FRA2 potentiostat-galvanostat equipped with NOVA 1.8. Corrosion studies were carried out under thermostating ($25 \pm 0.2^\circ\text{C}$) of the working environment. The corrosion rate was determined by gravimetric tests with the recording of mass changes over a controlled period of time (up to 10 h). A 3% sodium chloride solution was used as the electrolyte. In most cases, the mechanism of the corrosion process can be reliably described by an equivalent electrochemical circuit with Warburg and Cotangent Hyperbolic elements, which simulates the reaction at the electrode-electrolyte interface. According to the conducted visual, gravimetric and electrochemical studies of the St3 steel surface protected with the 69B-2k latex coating, the impedance remains almost unchanged for a prolonged period of time. It is obvious that the surface process is associated with the limiting stage of solvent diffusion through the protective layer. Thus, the electrochemically determined corrosion rate was low and amounted to ~ 0.164 mm/year (for reference samples – 0.75 mm / year). Our studies confirmed high protective qualities of latex 69B-2k. The corrosion properties of the coating under study are related to its composition, the components of which not only exhibit good adhesion, but are also active with respect to other interactions, including chemical interactions of the components with each other and with metal sur-

face crystallites. The model calculation of the process, carried out using the developed equivalent electrochemical circuit, describes experimental curves in Nyquist coordinates almost comprehensively.

Keyword: corrosion, mechanism, impedance, equivalent circuit, corrosion resistant coating, latex

For citation: Yakovleva AA, Antsiferov EA, Sadlovsky SV. Determination of corrosion characteristics of steel protected by a latex coating in Nyquist coordinates. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(4):519–527. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-519-527>

ВВЕДЕНИЕ

Коррозионные явления на поверхности стальных конструкций настолько масштабны и разнообразны по своим проявлениям, что до настоящего времени продолжают активно разрабатываться всевозможные приемы защиты и противодействия им. Существенный интерес материаловедения связан с антикоррозионной защитой стальных поверхностей покрытиями на основе органических связующих [1–3].

Представляемая работа относится к разработке технологии и созданию специализированных полимерных покрытий, а также к необходимости детального изучения механизма взаимодействия покрытия с металлической основой, оценке свойств защитных пленок, их устойчивости во времени и решению других вопросов, связанных с этим. Цель работы состоит в исследовании коррозионного процесса на стали Ст3, защищенной латексным покрытием 69Б-2к, выпускаемым ООО «Капиталь» (г. Иркутск).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При проведении коррозионных исследований использовали стальной стержень длиной около 7 см и диаметром 5 мм, вставленный в стеклянную трубку большего диаметра и залитый эпоксидной смолой. Для крепления к прибору на одном конце стержня выполнена резьба. Другая торцевая сторона стержня была зачищена на точильном станке до металла и являлась именно той поверхностью, на которой проводили коррозионные испытания. Рабочая поверхность была отполирована алмазной пастой до зеркального состояния и обезжирена спиртом. Затем образец погружали в ультразвуковую ванну на 5 мин, дополнительно обезжиривали изопропиловым спиртом и выдерживали в сушильном шкафу около 10 мин при температуре 40°C. Формирование на рабочей поверхности

защитной пленки производили трехкратным нанесением латекса микродозатором с высушиванием предыдущего слоя на воздухе.

В качестве защитной пленки был испытан латекс 69Б-2к, основой его состава является смесь стирол-акриловых латексов, полученных методом радикальной эмульсионной полимеризации сополимеров акриловой кислоты и бутилакрилата, в качестве эмульгаторов использованы сульфонал и неонол – добавки, способствующие повышению антикоррозионных свойств покрытий.

В каждой серии опытов использовали как минимум три образца, что позволяло усреднять результаты взвешивания и отслеживать динамику взаимодействия образца со средой.

После коррозионных исследований образцы промывали дистиллированной водой, высушивали до постоянной массы в сушильном шкафу при температуре 40°C и взвешивали. Взвешивание образца до начала и в конце опыта позволяет проконтролировать достоверность полученных результатов и дает сведения о массе прородированного за время эксперимента металла. Результаты такого гравиметрического анализа позволяют оценивать скорость коррозии.

Основным методом исследования был метод электрохимической импедансной спектроскопии (ЭИС). Метод ЭИС относится к неразрушающим методам изучения механизма коррозии и основан на экспериментальном определении импеданса электрохимической системы [4–7], он позволяет определять скорости и механизмы поверхностных процессов на основе электрохимических характеристик (плотности тока, перенапряжения, мнимой и действительной составляющих сопротивления). В основе анализа результатов лежит их сравнение с известными моделями эквивалентных электрических цепей, отражающими свойства стандартов (комбинации сопротив-

лений, емкостей и индуктивностей). Несмотря на известные преимущества данного метода исследования, имеются работы, в которых авторы отмечают в качестве недостатка метода невозможность однозначного выбора эквивалентной схемы [8]. Авторами предложена собственная упрощенная эквивалентная схема, позволяющая удовлетворительно моделировать коррозионное поведение стали Ст10 в растворе NH_4Cl с концентрацией 0.5 моль/дм^3 .

Действительно, известно большое количество сложных эквивалентных схем, дающих удовлетворительное совпадение при моделировании конкретных электрохимических систем [9–19]. На начальных этапах исследования коррозионных закономерностей, очевидно, удобнее рассматривать те несколько базисных теоретических схем, которые оперируют простыми элементами (сопротивление, емкость, индуктивность), соединенными по 2–3 элемента в простые (последовательные или параллельные) цепи.

В нашей работе электрохимические характеристики коррозии получены на приборе потенциостат-гальваностат PGSTAT302+ +FRA2 фирмы «AutoLab» с программным обеспечением NOVA 1.8. Система PGSTAT302+ +FRA2 позволяет проводить измерение импеданса в диапазоне от 1 МОм до 100 ГОм и получать исследуемые точки на графиках каждые 100 нс, что важно для анализа результатов коррозионных исследований.

В работе была использована классическая трехэлектродная ячейка, которая состоит из рабочего электрода (исследуемый стальной стержень), хлорсеребряного электрода сравнения и вспомогательного платинового электрода. Сама ячейка представляет конусную стеклянную емкость с рубашкой для термостатирования и специальной крышкой. Перед экспериментом ячейку заполняли электролитом. В качестве электро-

лита использовали 3% раствор хлорида натрия, что соответствует ГОСТам для изучения коррозионных процессов (ГОСТ Р 9.907¹, ГОСТ 9.908², ГОСТ 9.08³). Коррозионные исследования проводили при поддерживаемой термостатом температуре $25 \pm 0,2^\circ\text{C}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Принцип измерения импеданса заключается в том, что на электрохимическую систему, находящуюся в равновесии, оказывают воздействие малым сигналом и измеряют отклик системы. Если к электрохимической системе приложить переменный ток, то через систему будет идти ток синусоидальной формы, имеющий такие характеристики, как сдвиг фаз φ (разница фаз тока и напряжения) и ω – угловая частота.

Импеданс Z (полное комплексное сопротивление в системе, по которой протекает переменный ток) в любой момент времени t может быть представлен как

$$Z = Z_0 \cos \varphi + Z_0 \sin \varphi \cdot \text{ctg}(\omega t),$$

где Z_0 – некоторая постоянная для данных амплитудных значений величина.

Чаше уравнение для импеданса имеет более простой вид, при получении которого использована формула Эйлера: $e^{j\alpha} = \cos \alpha + j \sin \alpha$ для некоторого угла α , а также другие представления о комплексных величинах [7]:

$$Z = Z' - jZ'',$$

где Z' и Z'' – активная и реактивная составляющие импеданса; j – мнимая единица ($j = \sqrt{-1}$).

Графическое представление импеданса в осях $Z' - Z''$ (координатах Нейквиста) является одним из важных этапов коррозионных

¹ГОСТ Р 9.907. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы, сплавы, покрытия металлические. Методы удаления продуктов коррозии после коррозионных испытаний. Введ. 01.01.2009. М.: Стандартинформ, 2009.

²ГОСТ 9.908. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости. Введ. 01.01.87. М.: ИПК Изд-во стандартов, 1999.

³ГОСТ 9.008–82. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. М.: Изд-во госстандартов, 1982.

исследований. Координаты Найквиста – комплексная омическая плоскость – на оси абсцисс представляют действительную составляющую Z' , на оси ординат – мнимую составляющую сопротивления Z'' .

Использование спектроскопии электрохимического импеданса для описания поверхностных явлений основано на проведении сравнения величин $Z_{расч}$ и $Z_{теор}$ и получении численных параметров изучаемого процесса. Теоретическое рассмотрение и создание физической, а затем математической модели для $Z_{теор}$ обычно проводят параллельно с конструированием электрической эквивалентной схемы из простейших элементов (сопротивлений, индуктивностей и емкостей), определенных в эксперименте для $Z_{расч}$ [4, 5]. На рис. 1 представлены результаты испытаний (годографы импеданса): слева показана развертка процесса во времени, справа –

один из годографов импеданса, на котором демонстрируется анализ получаемых закономерностей.

При анализе полученных данных было просмотрено множество моделей эквивалентных цепей из базы данных, но найти такую модель, которая полностью соответствовала бы изучаемым режимам, не удалось.

За основу принята простая модель ячейки с диффузионными затруднениями, в которой сопротивление металлического электрода и ионного проводника (электролита) являются чисто омическими R , а на межфазной границе возникает двойной электрический слой, имеющий емкость C . Моделирование проводили с использованием лестничной схемы с элементом Варбурга с учетом протекания изменений на границе электрод-электролит (рис. 2). Однако оказалось, что такая модель подходит не ко всей части годографа, а только к участку, лежащему левее минимума.

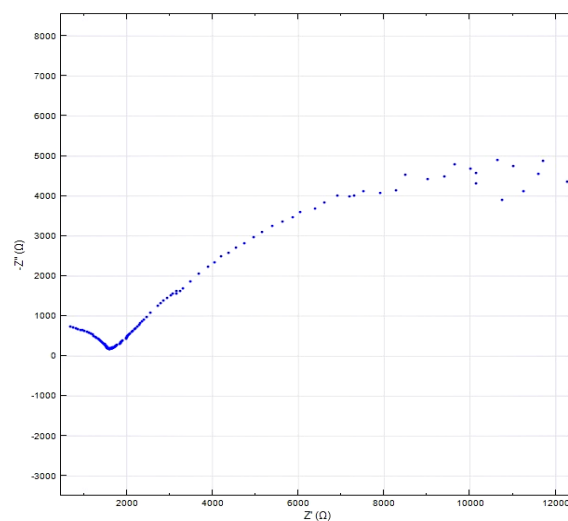
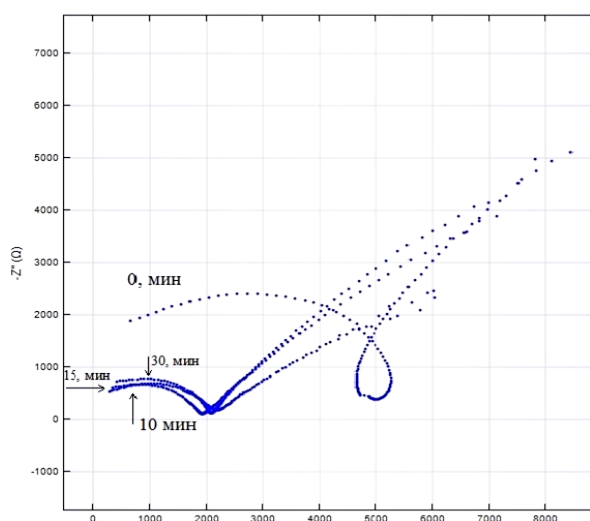


Рис. 1. Диаграмма Найквиста для электрода, покрытого стирол-акриловым латексом 69Б-2к
Fig. 1. Nyquist diagram for an electrode coated with styrene-acrylic latex 69B-2k

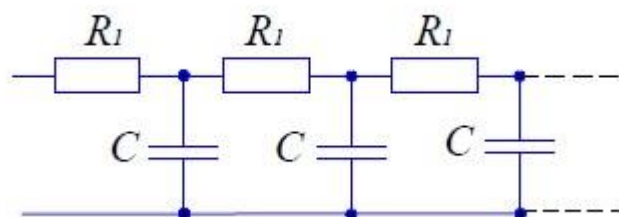


Рис. 2. Исходная схема элемента для моделирования [4]
Fig. 2. Initial diagram of the element for modeling [4]

По рис. 1 видно, что первоначально сопротивление в исследуемой системе большое, пленка «работает» и затрудняет проникновение воды и ионов электролита через ее поры. Однако уже к $Z' = 2000$ Ом и далее к $Z' \rightarrow 8000$ Ом (в области низких частот) разброс точек на графике все более усиливается и превращается почти в хаотический. Это может свидетельствовать о каких-либо электрических наводках извне. Прежде всего, такие наводки для данной зоны электрохимической цепи связаны с активизацией диффузионных процессов – явлениями пробоя пленки. На наш взгляд, данная ситуация на эквивалентной схеме может быть представлена следующим образом (рис. 3).

Представленная на рис. 3 схема соответствует импедансу цепи, состоящей из последовательно действующих процессов: активного сопротивления R_0 , характеризующего перенос заряда, и импеданса Варбурга:

$$Z_W = (1 - j) \frac{W}{\sqrt{\omega}},$$

характеризующего диффузионный процесс (W – постоянная Варбурга).

Сам импеданс Варбурга, в свою очередь, фактически отвечает последовательному соединению активного сопротивления R и ем-

кости C , которые зависят от частоты, меняясь пропорционально величине $(\sqrt{\omega})^{-1}$.

Анализ литературных данных с расшифровкой эквивалентных электрических схем свидетельствует, что выбранная нами схема отвечает окислительно-восстановительной реакции, протекающей без специфической адсорбции [20, 21]. При условии, когда составляющие импеданса Варбурга существенно отличаются друг от друга, показано, что независимо от частоты ток может опережать напряжение по фазе [22].

Результаты экспериментов показывают, что такое опережение тока по фазе от напряжения составляет 45° – важный нюанс при интерпретации результатов, который был учтен при получении теоретического графика (рис. 4 а).

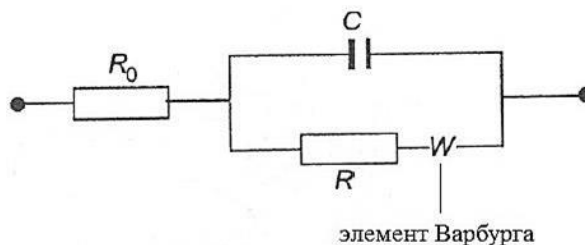
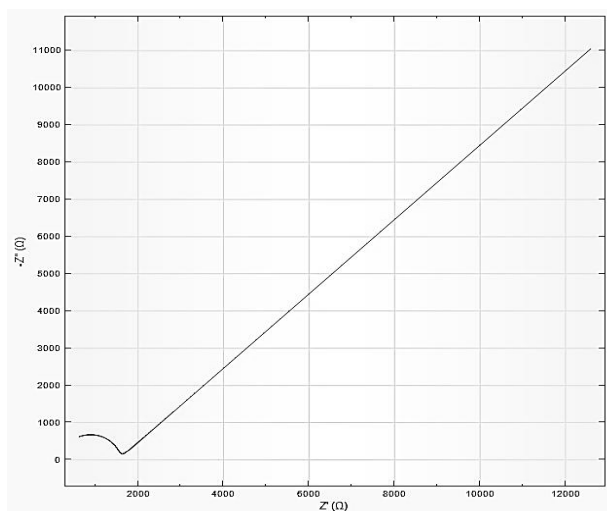
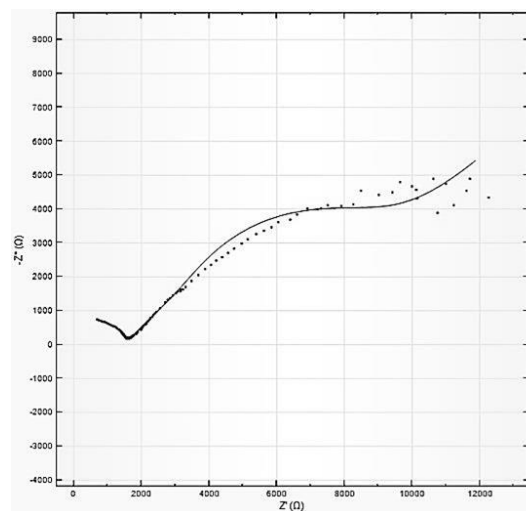


Рис. 3. Эквивалентная схема с элементом Варбурга
Fig. 3. Equivalent circuit with Warburg element



a



b

Рис. 4. Теоретическая диаграмма Найквиста: а – рассчитанная; б – с добавлением элемента Cotangent Hyperbolic и наложением на практическую

Fig. 4. Theoretical Nyquist diagram: a – calculated; b – with the added Cotangent Hyperbolic element and superimposed on the practical one

Для большей сходимости теоретического и практического спектров импеданса был использован элемент под названием Cotangent Hyperbolic (котангентный гиперболический), который описывает уравнение, связывающее константы импеданса Z_0 и адмиттанса Y_0 :

$$Z_0 = \frac{1}{Y_0 \sqrt{j\omega}} \tanh(B \sqrt{j\omega}),$$

где B – константа [4, 5].

Добавленный элемент Cotangent Hyperbolic обычно встречается в коррозионных средах, где наблюдается полубесконечная диффузия, описываемая законами Фика [23, 24]. Эквивалентная электрохимическая схема приобретает более гибкий вид. Будучи наложенной на экспериментальную кривую, она демонстрирует хорошее совпадение (см. рис. 4 б) и может быть использована для описания процессов на границе электрод-электролит.

На рис. 5 представлена соответствующая эквивалентная электрохимическая схема, где также указаны численные значения некоторых простейших элементов (сопротивлений, емкостей и констант адмиттанса), которые были использованы при расчете математической модели.

Без импеданса Варбурга и сопротивления переноса заряда невозможно было бы описать процессы на покрытых латексами поверхностях, имеющих, очевидно, поврежденные участки. Об этом свидетельствует значение средней скорости, определенное по ЭИС и составляющее 0,16357 мм/год.

Для поверхности стали Ст3 с латексным покрытием импеданс длительное время почти не изменяется, потому что поверхностный процесс по своей природе однозначен и связан с лимитирующей стадией диффузии

агрессивного растворителя через защитный слой.

В результате гравиметрических испытаний были рассчитаны изменения масс по известной начальной массе образцов m_0 и их массе m_1 после выдерживания в коррозионной среде в течение 10 ч и определено среднее значение из двух параллельных замеров по выражению: $\frac{m_1 - m_0}{m_0} \cdot 100$.

Для покрытых латексом 69Б-2к образцов оно составило 0,0096%.

Снижение массы образцов в ходе исследований дает возможность определения скорости коррозии [25–27].

Средняя скорость коррозии защищенных образцов составила 0,166, в то время как для контрольных образцов – 0,75 мм/год. Эти данные подтверждают достаточно высокие защитные качества латекса 69Б-2к.

На наш взгляд, коррозионные показатели латекса связаны с его составом, компоненты которого не только обладают хорошими адгезионными качествами, но и активны по отношению к другим взаимодействиям, таким как химические взаимодействия компонентов между собой и с кристаллитами на поверхности металлов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Примененный в настоящей работе подход позволяет провести анализ коррозионного процесса на поверхности стали Ст3, защищенной латексным покрытием. По результатам экспериментальных исследований разработана эквивалентная электрическая схема. Схема учитывает несколько конструкций: активное сопротивление, отвечающее за перенос заряда через границу электрод – электролит, а также сопротивления и емкости в элементах Варбурга и Cotangent Hyperbolic,

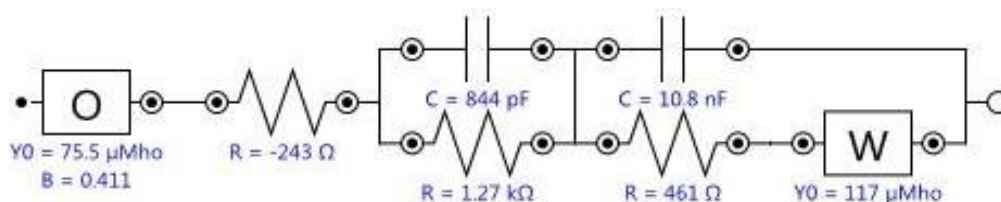


Рис. 5. Эквивалентная схема с элементом Cotangent Hyperbolic
Fig. 5. Equivalent circuit with the Cotangent Hyperbolic element

связанные с замедленностью диффузии электрохимически активных веществ. Модельный расчет, проведенный на ее основе,

позволяет описывать экспериментальную кривую в координатах Нейквиста практически полностью.

Список литературы

1. Шинкарева Е.В., Кошевар В.Д. Антикоррозионная грунтовка на основе водной эпоксидной эмульсии и углеродных наночастиц // Журнал прикладной химии. 2016. Т. 89. № 1. С. 68–76.
2. Смирнов М.А., Соколова М.П., Дмитриев И.Ю., Власова Е.Н., Розова Е.Ю., Ельашевич Г.К. Барьерные свойства и структура неорганических слоев на границе раздела полианилин-сталь // Журнал прикладной химии. 2015. Т. 88. № 7. С. 1007–1082.
3. Яковлева А.А., Анциферов Е.А., Гусева Е.А., Садловский С.В. Влияние защитного покрытия на основе органического связующего на коррозионную устойчивость стали // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2019. Т. 9. № 4. С. 600–611. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2019-9-4-600-611>
4. Стойнов З.Б., Графов Б.М., Саввова-Стойнова Б.С., Елкин В.В. Электрохимический импеданс. М.: Изд-во «Наука», 1991. 336 с.
5. Barsoukov E., Macdonald J.R. Impedance spectroscopy: theory, experiment, and applications / eds. E. Barsoukov, J.R. Macdonald. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2005. 608 p.
6. Kelly R.G., Scully J.R., Shoesmith D.W., Buchheit R.G. Electrochemical techniques in corrosion science and engineering. New York; Basel: Marcel Dekker, 2002.
7. Orazem M.E. Electrochemical impedance spectroscopy. Gainesville, Florida: Department of Chemical Engineering University of Florida, 2008. 525 p.
8. Секушин Н.А. Способ представления экспериментальных данных по импеданс спектроскопии // Электрохимия. 2009. Т. 45. № 11. С. 1403–1408.
9. Секушин Н.А. Эквивалентная схема импеданса Варбурга // Электрохимия. 2009. Т. 45. № 7. С. 889–894.
10. Рыбалка К.В., Бекетаева Л.А., Давыдов А.Д. Оценка скорости коррозии стали AISI 1016 анализом поляризационных кривых и методом измерения омического сопротивления // Электрохимия. 2021. Т. 57. № 1. С. 19–24. <https://doi.org/10.31857/S0424857021010096>
11. Вольфович Ю.М. Электрохимические суперконденсаторы (обзор) // Электрохимия. 2021. Т. 57. № 4. С. 197–238. <https://doi.org/10.31857/S0424857021040101>
12. Ключев А.П., Андреев В.Н., Давыдов А.Д., Графов Б.М. Исследование влияния ингибитора на коррозионное поведение стали методом шумовой спектроскопии Чебышева и методом спектроскопии электрохимического импеданса // Электрохимия. 2020. Т. 56. № 12. С. 1131–1137. <https://doi.org/10.31857/S0424857020120099>
13. Чулкин П.В., Рагойша Г.А., Стрельцов Е.А. Исследование электрохимической коррозии и защиты платины в концентрированных растворах хлоридов щелочных металлов методом потенциодинамической наногравиметрии // Электрохимия. 2017. Т. 53. № 1. С. 3–10. <https://doi.org/10.7868/s0424857017010042>
14. Тран М.Т.Т., Триболле Б., Вивьер В., Оразем М.Е. Импеданс реакций, контролируемых массопереносом // Электрохимия. 2017. Т. 53. № 9. С. 1046–1055. <https://doi.org/10.7868/S0424857017090055>
15. Вэй Ё.-Ж., Сиа Д.-Х., Сон Ш.-Ж. Обнаружение коррозионного растрескивания в нержавеющей стали 304 NG в подкисленном растворе NaCl с использованием электрохимических шумов, теории хаоса и вейлвет-анализа // Электрохимия. 2016. Т. 52. № 6. С. 627–642. <https://doi.org/10.7868/S0424857016060128>
16. Григорян Н.С., Абрашов А.А., Ваграмян Т.А., Костюк А.Г. Пассивация черных и цветных металлов в растворе на основе сложных эфиров галловой кислоты // Химия и технология органических веществ. 2017. № 4. С. 55–63.
17. Costa J.S., Agnoli R.D., Ferreira J.Z. Corrosion behavior of a conversion coating based on zirconium and colorants on galvanized steel by electrodeposition // Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração. 2015. Vol. 12. No. 2. P. 167–175. <https://doi.org/10.4322/2176-1523.0852>
18. Katsounaros I., Cherevko S., Zeradjanin A.R., Mayrhofer K.J.J. Oxygen electrochemistry as a cornerstone for sustainable energy conversion // Angewandte Chemie. 2014. Vol. 53. Iss. 1. P. 102–121. <https://doi.org/10.1002/anie.201306588>
19. Gotti G., Evrard D., Fajerberg K., Gros P. Oxygen reduction reaction features in neutral media on glassy carbon electrode functionalized by chemically prepared gold nanoparticles // Journal of Solid State Electrochemistry. 2016. Vol. 20. No. 6. P. 1539–1550. <https://doi.org/10.1007/s10008-016-3159-x>
20. Щербakov В.В., Артемкина Ю.М., Ермаков В.И. Диэлектрические характеристики воды и электропроводность водных растворов электролитов // Электрохимия. 2017. Т. 53. № 12. С. 1479–1486. <https://doi.org/10.7868/S0424857017120015>
21. Xia Da-Hai, Behnamian Ya. Electrochemical noise: a review of experimental setup, instrumentation and DC removal // Russian Journal of Electrochemistry. 2015. Vol. 51. Iss. 7. P. 593–601. <https://doi.org/10.1134/S1023193515070071>
22. Breimesser M., Ritter S., Seifert H.P., Suter T., Virtanen S. Development of time-frequency analysis in electrochemical noise for detection of pitting corrosion // Corrosion. The Journal of Science & Engineering. 2019. Vol. 75. Iss. 2. P. 183–191. <https://doi.org/10.5006/2900>
23. Ньюман Дж. Вязкий подслои // Электрохимия. 2020. Т. 56. № 3. С. 282–288. <https://doi.org/10.31857/S0424857020030093>
24. Мартемьянов С.А. Статистическая теория турбулентного массопереноса в электрохимических системах // Электрохимия. 2017. Т. 53. № 10. С. 1212–1224.

<https://doi.org/10.7868/S0424857017100024>

25. Ehsani A., Mahjani M.G., Hosseini M., Safari R., Moshrefi R., Shiri H.M. Evaluation of thymus vulgaris plant extract an eco-friendly corrosion inhibitor for stainless steel 304 in acidic solution by mean of electrochemical impedance spectroscopy, electrochemical noise analysis and density functional theory // *Journal Colloid and Interface Science*. 2017. Vol. 490. P. 444–451.

<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2016.11.048>

26. Luo Bing, Xia Da-Hai. Characterization of pH effect on

corrosion resistance of nuclear steam generator tubing alloy by in-situ scanning electrochemical microscopy // *Acta Physico-Chimica Sinica*. 2014. Vol. 30. No. 1. P. 59–66. <https://doi.org/10.3866/PKU.WHXB201311221>

27. Hermoso-Diaz I.A., Gonzalez-Rodriguez J.G., Uru-churu-Chavarin J. Use of EIS and electrochemical noise fractal analysis to study *Salvia hispanica* as green corrosion inhibitor for carbon steel // *International Journal of Electrochemical Science*. 2016. Vol. 11. P. 4253–4266. <https://doi.org/10.20964/2016.06.47>

References

1. Shinkareva EV, Koshevar VD. Anticorrosion primer based on aqueous epoxy emulsion and carbon nanoparticles. *Zhurnal prikladnoj himii = Russian Journal of Applied Chemistry*. 2016;89(1):68–76. (In Russ.)

2. Smirnov MA, Sokolova MP, Dmitriev IYu, Vlasova EN, Rozova EYu, El'yashevich GK. Barrier properties and structure of inorganic layers at polyaniline-steel interface. *Zhurnal prikladnoj himii = Russian Journal of Applied Chemistry*. 2015;88(7):1007–1082. (In Russ.)

3. Yakovleva AA, Antsiferov EA, Guseva EA, Sadlovsky SV. Effect of an organic binder protective coating on the corrosion resistance of steel. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2019;9(4):600–611. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2019-9-4-600-611>

4. Stoinov ZB, Grafov BM, Savvova-Stoinova BS, Elkin VV. *Electrochemical impedance*. Moscow: Nauka; 1991, 336 p. (In Russ.)

5. Barsoukov E, Macdonald JR. *Impedance spectroscopy: theory, experiment, and applications* / eds. E Barsoukov, JR Macdonald. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons; 2005, 608 p.

6. Kelly RG, Scully JR, Shoesmith DW, Buchheit RG. *Electrochemical techniques in corrosion science and engineering*. New York; Basel: Marcel Dekker; 2002.

7. Orazem ME. *Electrochemical impedance spectroscopy*. Gainesville, Florida: Department of Chemical Engineering University of Florida; 2008, 525 p.

8. Sekushin NA. Method of presentation of experimental data in impedance spectroscopy. *Elektrokhimiya = Russian Journal of Electrochemistry*. 2009;45(11):1403–1408. (In Russ.)

9. Sekushin NA. Equivalent circuit of Warburg impedance. *Elektrokhimiya = Russian Journal of Electrochemistry*. 2009;45(7):889–894. (In Russ.)

10. Rybalka KV, Beketaeva LA, Davydov AD. Estimation of corrosion rate of AISI 1016 steel by the analysis of polarization curves and using the method of measuring Ohmic resistance. *Elektrokhimiya = Russian Journal of Electrochemistry*. 2021;57(1):19–24. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0424857021010096>

11. Volkovich YuM. Electrochemical supercapacitors. *Elektrokhimiya = Russian Journal of Electrochemistry*. 2021;57(40):197–238. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0424857021040101>

12. Klyuev AL, Andreev VN, Davydov AD, Grafov BM. Study of the effect of inhibitor on the corrosion behavior of steel using Chebyshev noise spectroscopy and electro-

chemical impedance spectroscopy. *Elektrokhimiya = Russian Journal of Electrochemistry*. 2020;56(12):1131–1137. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0424857020120099>

13. Chulkin PV, Ragoisha GA, Streltsov EA. Platinum electrochemical corrosion and protection in concentrated alkali metal chloride solutions investigated by potentiodynamic nanogravimetry. *Elektrokhimiya = Russian Journal of Electrochemistry*. 2017;53(1):3–10. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/s0424857017010042>

14. Tran MTT, Tribollet B, Vivier V, Orazem ME. On the impedance response of reactions influenced by mass transfer. *Elektrokhimiya = Russian Journal of Electrochemistry*. 2017;53(9):1046–1055. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0424857017090055>

15. Wei Yong-Jia, Xia Da-Hai, Song Shi-Zhe. Detection of SCC of 304 NG stainless steel in an acidic NaCl solution using electrochemical noise based on chaos and wavelet analysis. *Elektrokhimiya = Russian Journal of Electrochemistry*. 2016;52(6):627–642. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0424857016060128>

16. Grigoryan NS, Abrashov AA, Vagramyan TA, Kostyuk AG. Chromate-free passivation of ferrous and nonferrous metals in solution on the basis of esters of gallic acid. 2017;4:55–63. *Khimiya i tekhnologiya organicheskikh veshchestv = Chemistry and Technology of Organic Substances*. (In Russ.)

17. Costa JS, Agnoli RD, Ferreira JZ. Corrosion behavior of a conversion coating based on zirconium and colorants on galvanized steel by electrodeposition. *Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração*. 2015;12(2):167–175. <https://doi.org/10.4322/2176-1523.0852>

18. Katsounaros I, Cherevko S, Zeradjian AR, Mayrhofer KJJ. Oxygen electrochemistry as a cornerstone for sustainable energy conversion. *Angewandte Chemie*. 2014;53(1):102–121.

<https://doi.org/10.1002/anie.201306588>

19. Gotti G, Evrard D, Fajerweg K, Gros P. Oxygen reduction reaction features in neutral media on glassy carbon electrode functionalized by chemically prepared gold nanoparticles. *Journal of Solid State Electrochemistry*. 2016;20(6):1539–1550. <https://doi.org/10.1007/s10008-016-3159-x>

20. Shcherbakov VV, Ermakov VI, Artemkina YM. Dielectric characteristics of water and electric conductivity of aqueous electrolytes. *Elektrokhimiya = Russian Journal of Electrochemistry*. 2017;53(12):1479–1486. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0424857017120015>

21. Xia Da-Hai, Behnamian Ya. Electrochemical noise: a review of experimental setup, instrumentation and

DC removal. *Russian Journal of Electrochemistry*. 2015;51(7):593–601.

<https://doi.org/10.1134/S1023193515070071>

22. Breimesser M, Ritter S, Seifert HP, Suter T, Virtanen S. Development of time-frequency analysis in electrochemical noise for detection of pitting corrosion. *Corrosion. The Journal of Science & Engineering*. 2019;75(2):183–191. <https://doi.org/10.5006/2900>

23. Newman J. Viscous sublayer. *Elektrokhimiya = Russian Journal of Electrochemistry*. 2020;56(3):282–288. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0424857020030093>

24. Martemianov SA. Statistical theory of turbulent mass transfer in electrochemical systems. *Elektrokhimiya = Russian Journal of Electrochemistry*. 2017;53(10):1212–1224. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0424857017100024>

25. Ehsani A, Mahjani MG, Hosseini M, Safari R, Moshrefi R, Shiri H.M. Evaluation of thymus vulgaris

plant extract an eco-friendly corrosion inhibitor for stainless steel 304 in acidic solution by mean of electrochemical impedance spectroscopy, electrochemical noise analysis and density functional theory. *Journal Colloid and Interface Science*. 2017;490:444–451. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2016.11.048>

26. Luo Bing, Xia Da-Hai. Characterization of pH effect on corrosion resistance of nuclear steam generator tubing alloy by in-situ scanning electrochemical microscopy. *Acta Physico-Chimica Sinica*. 2014;30(1):59–66. <https://doi.org/10.3866/PKU.WHXB201311221>

27. Hermoso-Diaz IA, Gonzalez-Rodriguez JG, Uruchuru-Chavarin J. Use of EIS and electrochemical noise fractal analysis to study *Salvia hispanica* as green corrosion inhibitor for carbon steel. *International Journal of Electrochemical Science*. 2016;11:4253–4266. <https://doi.org/10.20964/2016.06.47>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Яковлева Ариадна Алексеевна,

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры химии и пищевой технологии им. профессора В.В. Тутуриной, Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия; ✉ e-mail: ayakovistu@mail.ru

Анциферов Евгений Александрович,

кандидат химических наук, доцент, директор Института высоких технологий, Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия; e-mail: antsiferov@istu.edu

Садловский Сергей Владимирович,

аспирант, Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия; e-mail: vip.sadlovskiy@mail.ru

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 09.06.2021; одобрена после рецензирования 23.07.2021; принята к публикации 16.08.2021.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ariadna A. Yakovleva,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Chemistry and Food Technology named after the Professor V.V. Tuturina, Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia; ✉ e-mail: ayakovistu@mail.ru

Evgeniy A. Antsiferov,

Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor, Director of the School of High Technologies, School of High Technologies, Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia; e-mail: antsiferov@istu.edu

Sergey V. Sadlovsky,

Postgraduate student, Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia; e-mail: vip.sadlovskiy@mail.ru

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 09.06.2021; approved after reviewing 23.07.2021; accepted for publication 16.08.2021.