Тип статьи: научная
УДК 620.193
DOI: 10.35887/2305-2538-2023-1-133-146

К ОЦЕНКЕ ИНГИБИТОРНОЙ ЗАЩИТЫ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ И ОБОРУДОВАНИЯ

Лариса Геннадьевна Князева [1], Андрей Валерьевич Дорохов [2], Николай Алексеевич Курьято[3]
[1,2,3]Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве, г. Тамбов, Россия
[1]Knyazeva27@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3232-2210
[2]dorokhov.andryusha@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1778-457X
[3]cska-sparta@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-1319-7370

Автор ответственный за переписку: Князева Лариса Геннадьевна, Knyazeva27@mail.ru
Corresponding author: Larisa Knyazeva, Knyazeva27@mail.ru

Реферат. *Рассмотрены возможные критерии эффективности ингибиторной защиты сельскохозяйственной техники и оборудования: интегральные и дифференциальные; количественные, полуколичественные, качественные; обобщенная количественная оценка на основе весомости каждого из видов разрушений; массовые, глубинные, объемные; технико-экономические; эколого-токсилогические и др. Отмечено, что каждый из критериев в отдельности не всегда однозначен в конкретных условиях, что может привести к субъективной оценке целесообразности использования тех или иных ингибиторов коррозии (ИК).Выделены как перспективные электрохимические методы оценки эффективности ингибиторной защиты, что связано со стремлением исследователей к сокращению времени коррозионных испытаний. В качестве примера рассмотрено исследование системы металл — защитное покрытие — электролит методом поляризационного сопротивления с оценкой вклада каждой составляющей. Исследовали композиции на основе трансформаторного ТКп, индустриального И-20А, моторного М10Г$_2$к, свежего и отработанного (ММО) и комбинированных ИК CortecVpCI-368 и Cortec VpCI-369. Покрытия на стали предварительно формировались в течение суток. Сравнение результатов по защитной эффективности композиций в И-20А с полученными также методом поляризационных кривых и гравиметрическими методами в 0,5М растворе NaCl и в термовлагокамере Г-4 показало качественно подобные результаты, что свидетельствует о достоверности результатов, полученных методом поляризационного сопротивления. Максимальная защитная эффективность наблюдается для композиций на основе ММО с концентрацией ИК 3 -10 масс. % в ММО.*

Ключевые слова: *коррозия, сельскохозяйственная техника, критерии, эффективность, ингибиторная защита, масла, комбинированный ингибитор, метод поляризационного сопротивления.*

TO THE EVALUATION OF INHIBITOR PROTECTION OF AGRICULTURAL MACHINERY AND EQUIPMENT

Knyazeva Larisa[1], Dorokhov Andrey[2], Kur`yato Nikolay[3]
[1,2,3]All-Russian Research Institute for Use machinery and Petroleum products in Agriculture, Tambov, Russia
[1]Knyazeva27@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3232-2210
[2]dorokhov.andryusha@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1778-457X
[3]cska-sparta@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-1319-7370

Abstract. *Possible criteria for the effectiveness of inhibitor protection of agricultural machinery and equipment: integral and differential; quantitative, semi-quantitative, qualitative; a generalized quantitative assessment based on the weightiness of each type of destruction; mass, deep, volumetric; technical and economic; environmental and toxicological, etc. were considered. It was noted that each of the criteria taken separately is not always unambiguous in specific conditions, which can lead to a subjective assessment of the appropriateness of using certain corrosion inhibitors (CI). Electrochemical methods for assessing the effectiveness of inhibitor protection are highlighted as promising, which is associated with the desire of researchers to reduce the time of corrosion testing. As an example, a study of the metal-protective coating-electrolyte system by the method of polarization resistance with an assessment of the contribution of each component is considered. Compositions based on trans-former TKp, industrial I-20A, motor M10G2k, fresh and used (MMO), and combined IR CortecVpCI-368 and Cortec VpCI-369 were studied. Coatings on steel were preliminarily formed during the day. Comparison of the results on the protective effectiveness of compositions in I-20A with those also obtained by the method of polarization curves and gravimetric methods in a 0.5 M NaCl solution and in a thermal moisture chamber G-4 showed qualitatively similar results, which indicates the reliability of the results obtained by the method of polarization resistance. The maximum protective efficiency is observed for compositions based on MMO with an IC concentration of 3 -10 wt. % in MMO.*

Keywords: *corrosion, agricultural machinery, criteria, efficiency, inhibitory protection, oils, combined inhibitor, polarization resistance method.*

Для цитирования: Князева Л.Г., Дорохов А.В., Курьято Н.А. К оценке ингибиторной защиты сельскохозяйственной техники и оборудования // Наука в Центральной России. 2023. Т. 61 № 1. С. 133-146. https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-1-133-146.

For citation: Knyazeva L., Dorokhov A., Kur`yato N. On the assessment of the inhibitory protection of agricultural machinery and equipment. *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2023; 61(1): 133-146. (In Russ.) https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-1-133-146.

Введение. Сельскохозяйственная техника и оборудование подвергаются атмосферной коррозии в период эксплуатации и хранения во время временного неиспользования. Наиболее сильно страдают стальные поверхности, причем на интенсивность коррозионных разрушений влияют: состав и обработка металлической поверхности, стимуляторы коррозии, которые могут оказаться в воздушной атмосфере и на поверхности металла. Например, шлифованные и полированные стальные поверхности в начальный момент лучше сопротивляются коррозионному разрушению. В атмосфере животноводческих помещений, загрязненной такими газами, как сероводород, углекислый газ, аммиак, коррозия протекает быстрее. Чтобы дольше сохранять сельскохозяйственную технику и оборудование в рабочем состоянии требуется надежная противокоррозионная защита.

Для защиты сельскохозяйственной техники от атмосферной коррозии широко применяется ингибиторная защита (ИЗ)[1-5]. Ее эффективность зависит от условий среды и природы металла. Защитное действие ингибиторов коррозии (ИК), как правило, связано с их адсорбцией на поверхности металла, что приводит к уменьшению площади коррозионно-активной поверхности [1]. Оптимальный подбор ИК под условия среды невозможен без использования объективных и точных экспериментальных методов оценки их защитной эффективности в лабораторных и в производственных условиях.

Корректная оценка состояния поверхности металла до и после нанесения покрытия на основе визуальных, весовых, электрохимических, физических и аналитических методов необходима для правильного заключения об эффективности ИЗ. Трудности возникают при определении эффективного времени начала разрушения защитного покрытия и оценке срока его службы.

Среди множества критериев для оценки эффективности ингибиторной защиты используют: интегральные, определяющие коррозионный эффект; дифференциальные – скорость коррозии; показатели коррозионной стойкости. Как правило, проводится сравнение значений критериев в присутствии и в отсутствии ИК. К сожалению, каждый из критериев в отдельности не всегда однозначно характеризуют эффективность ингибиторной защиты в конкретных условиях, что

может привести к субъективной оценке целесообразности использования тех или иных ИК для защиты сельскохозяйственной техники и оборудования в конкретных условиях.

Для сравнительной оценки коррозионной стойкости сталей в различных условия разработан целый ряд международных и отечественных стандартов. Так в IS0 15156 предлагаются методы оценки по результатам лабораторных испытаний и на основании опыта эксплуатации в реальных условиях. Лабораторные испытания дешевле и быстрее, опыт эксплуатации в реальных условиях – дорог и рискован с точки зрения потери техникой и оборудованием надежности. Критерии оценки эффективности ингибиторной защиты напрямую связаны с методами исследования коррозионных поражений, что отражено в ряде отечественных стандартов (таблица 1)

Таблица 1 - Методы исследования и критерии эффективности ИЗ из ряда действующих отечественных стандартов

№ п/п	ГОСТ		Методы	Критерии эффективности ингибиторной защиты
	№	Название		
1	9.054-75	Консервационные масла, смазки и ингибированные пленкообразующие нефтяные составы	5 методов ускоренных испытаний консервационных материалов, связанных с выдерживанием металлических образцов с покрытиями в условиях повышенной относительной влажности воздуха и температуры без конденсации, с периодической или постоянной конденсацией влаги, при воздействии сернистого ангидрида с периодической конденсацией влаги на образцах, в атмосфере солевого тумана, в растворе электролита; определение способности масел вытеснять бромистоводородную кислоту.	Визуально площадь коррозионного разрушения за определенное время испытаний или по времени появления первого коррозионного очага; изменение цвета и блеска поверхности металлической пластины визуально или по изменению отражательной способности (ГОСТ 9.308-85).
2	9.908-85	Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости	Количественные, полуколичественные (балльные) и качественные	В основе время достижения заданной (допустимой) степени коррозионного поражения в определенных условиях
3	9.506-87	Ингибиторы коррозии металлов в водно-нефтяных средах	Электрохимический (метод поляризационных кривых), гравиметрический	Плотность коррозионного тока. Защитная способность ИК
4	9.509-89	Средства временной противокоррозионной защиты. Методы определения защитной способности	Электрохимические - для сравнительной экспресс-оценки и предварительной качественной оценки степени защиты; Имитационные - для оценки защитной способности в условиях, имитирующих реальные условия хранения и транспортирования законсервированных изделий.	По виду и степени поражений образцов качественным и полуколичественным методом.
5	9.514-99	Ингибиторы коррозии металлов для водных систем. Электрохимический метод определения защитной способности	Метод лабораторных коррозионных испытаний путем измерения скорости электрохимической коррозии с помощью индикатора поляризационного сопротивления	Коэффициент торможения коррозии. Степень защиты.
4	9.106-2021	Единая система защиты от коррозии и старения. Коррозия металлов. Термины и определения	Коррозионные на определение коррозионной стойкости. Лабораторные, натурные (полевые), эксплуатационные, ускоренные (в условиях близким к эксплуатационным, но более краткосрочные), ресурсные с целью определения срока службы покрытия	Коррозионный ток, защитный ток, плотность тока пассивации. Потенциалы: активации, начала пассивации, перепассивации, питтингообразования. Защитная концентрация ИК. Степень защиты. Водородный показатель коррозии, кислородный показатель коррозии. Визуальная оценка.

Разнообразие методов порождает еще большее разнообразие возможных критериев ИЗ.

В конструкциях сельскохозяйственной техники и оборудования широко распространены различные рамы, кузова из тонколистовой стали, для которых характерна преимущественно сплошная равномерная коррозия в атмосферных условиях. При наличии сплошной коррозии могут использоваться массовые, глубинные, объемные количественные критерии оценки эффективности ингибиторной защиты. Каждый из этих критериев отдельно достаточно информативен. Одним из наиболее распространенных массовых критериев в случае равномерной коррозии при лабораторных испытаниях является величина скорости коррозии (К, г/(м^2 ч) металла при введении ИК в коррозионную среду, определяемая через изменение массы металла при коррозии в единицу времени, отнесенная к единице поверхности.

$$К = \frac{m_o - m_1}{m_0 S\tau}, \quad (1)$$

где m_0 - масса образца до испытаний, кг; m_1- масса образца после испытаний и удаления продуктов коррозии, кг; S - площадь поверхности образца,τ -время коррозионного процесса, ч.

Площадь поверхности плоской металлической пластинки в этом случае определяют по формуле:

$$S = 2[(ab - \frac{\pi d^2}{\pi}) + h(a + b + \frac{\pi d}{2}) \quad (2)$$

где a– длина образца, м; b– ширина образца, м; h– толщина образца, м; d– диаметр отверстия, м.

Массовый критерий плохо применим к практике реальной эксплуатации техники и оборудования, потому что их невозможно взвесить с достаточной точностью. Из положения выходят, располагая на технике и оборудовании лабораторные образцы – свидетели и изменение массы фиксируют на них.

Со скоростью коррозии неразрывно связаны величина коэффициента торможения – γ, раз и величина защитной эффективности ИК - Z, %, определяемые по формулам (3,4):

$$\gamma = К_0/К_и \quad (3)$$

$$Z = \frac{K_0 - Kи}{K_0} \cdot 100\ \%, \quad (4)$$

где K_0 и $K_и$ – скорости коррозии металла в отсутствие и при наличии ИК в системе, соответственно.

Эти критерии взаимосвязаны (5,6):

$$\gamma = \frac{1}{1-Z}, \quad (5)$$

$$\gamma = \frac{1}{1 - Z/100}, \quad (6)$$

что отражено в таблице 1

Таблица 1 – Сравнение показателей Z и γ

Показатель	Значение												
Z, %	20	30	40	50	60	70	80	90	95	98	99	99,5	99,9
γ, раз	1,2	1,5	1,7	2,0	2,5	3,3	5	10	20	50	100	200	1000

Как указано в ГОСТ 9.106-2021 возможны и такие критерии оценки эффективности ингибиторной защиты, как единицы плотности электрического тока при электрохимических испытаниях, через плотности тока можно выразить скорость и коэффициент торможения коррозионного процесса (7).

$$\gamma = \frac{i_o}{i_1} \quad (7)$$

При протекании сплошной коррозии с постоянной скоростью могут использоваться как критерии ИЗ время до уменьшения массы на единицу площади на допустимую величину (t_m,год) и время проникновения на допустимую глубину l, (t_1, год) определяемые по формулам (3):

$$\tau_m = \frac{\Delta m}{v_m} \quad \tau_1 = \frac{\Delta l}{v_1}, \quad (8)$$

где v_m- скорость убыли массы, кг/м^2·год; v_1- линейная скорость коррозии, м/год.

При допущении в случае сплошной коррозии, что изменение массы образца прямо пропорционально глубине проникновения коррозии, массовый показатель можно пересчитать в глубинный (П), который для стали имеет вид (9):

$$П = \frac{К_и, 8760}{7,87} . 10^{-3} = 1,1131 K_и \quad (9)$$

где П – глубинный показатель скорости коррозии (проницаемость металла), мм/год; 8760 – количество часов в году; 7,87 – плотность железа, г/см^3.

Иначе П можно выразить через изменение массы образца:

$$П = 8,76 \cdot \Delta m/\rho \quad (10)$$

где $\cdot\Delta m$ – потеря массы металла или сплава при коррозии, ρ – плотность металла

Объемный показатель, равный объему поглощенного кислорода или выделившегося водорода в ходе процесса на единице поверхности за единицу времени при оценке эффективности ингибиторной защиты сельскохозяйственной техники практически не используется из-за его большей сложности, его больше применяют при фундаментальных научных исследованиях ИК.

Очевидно, что, с одной стороны, К, Z и П - важные технологические факторы, которые необходимо учитывать при выборе ингибиторной защиты на практике. Но, с другой стороны, эти критерии напрямую зависят от концентрации используемого ИК, поэтому также важны с экономической и с экологической точек зрения. Следует помнить, что стоимость ИК на рынке непрерывно растет, поэтому, чем меньше концентрация ИК, обеспечивающая нужную защитную эффективность, тем это более экономически выгодно. Не секрет, что многие ИК токсичны. Так, многие высокоэффективные маслорастворимые ингибиторы коррозии аминного типа относятся ко второму и третьему классу опасности, поэтому, чем меньшая концентрация ИК требуется для эффективной противокоррозионной защиты металла, тем лучше с экологической точки зрения. В результате, минимальная концентрация ИК, обеспечивающая заданный уровень его защитной эффективности, также может служить критерием для оценки эффективности ингибиторной защиты. Но тут возникают вопросы с тем, какой уровень ингибиторной защиты следует задавать, чтобы учесть, в том числе, экономические факторы.

Стоимость ингибиторной защиты складывается из стоимости используемых материалов и оборудования для их нанесения, стоимости трудовых затрат, связанных с осуществлением технологического процесса и стоимости амортизационных расходов. На уровень ингибиторной защиты влияет амортизационный срок службы сельскохозяйственного оборудования и техники. Вообще сельскохозяйственная техника и оборудование относятся к 5 группе с амортизационным сроком от 7 до 10 лет. Считается, что срок службы лакокрасочных покрытий, которые обычно используют для новой техники, не превышает 3 лет. Чтобы обеспечить амортизационный срок службы техники и оборудования теоретически достаточно ингибиторов коррозии, обеспечивающих защитную эффективность порядка 70 % и совсем не обязательно выдвигать требование к ингибиторам о защитной эффективности не менее 90 %. Очень часто более высокой защитной эффективностью обладают более дорогие ИК. Но все это очень условно, и с каждым случаем нужно разбираться отдельно непосредственно в условиях эксплуатации. Часто технику и оборудование эксплуатируют и за пределами амортизационного срока.

В работе [5] был предложен технико-экономический критерий эффективности ИЗ (11):

$$C_{ИК}/Z \rightarrow min, \quad (11)$$

где $C_{ИК}$ – удельная стоимость ингибированного материала, руб/кг,

Z – рациональная защитная эффективность, обеспечивающая необходимую долговечность материала.

На основе многолетних наблюдений предложено уравнение регрессии для скорости коррозии стальных деталей:

$$K = 0{,}78\ H + 1{,}22\ T + 0{,}173[Cl^-] + 0{,}3[SO_2] - 52{,}68, \quad (12)$$

где H -средняя годовая относительная влажность, %,

T – средняя годовая температура, ^{0}C,

$[Cl^-]$ – средняя годовая концентрация хлоридов, мг/м^3,

$[SO_2]$ - средняя годовая концентрация диоксида серы, мг/(м^3 сут).

Анализ уравнения по состоянию загрязнений вредными выбросами в регионах с учетом ПДК диоксида серы и хлоридов показал, что их влияние на К незначительно (0,3 – 0,5 %), поэтому уравнение (12) можно использовать в упрощенном виде (13)

$$K = 0{,}78\ H + 1{,}22\ T - 52{,}68 \quad (13)$$

Интересны комплексные оценки технико-экономической эффективности применения ингибированных материалов [6]. Путем сложения оценок по десятибалльной системе по ряду показателей (стойкость к различным реагентам, стоимость, массу, прочность, физическую стойкость и теплостойкость) определяют суммарный балл, характеризующий технико-экономическую эффективность материала.

Авторы работы [7] предлагают оценивать эффективность ИК методом математического планирования. В качестве факторов многофакторного эксперименты используют концентрации ИК и солей растворяющегося металла, температуру. Оценивали статистическую значимость коэффициентов в уравнении регрессии по методу наименьших квадратов, проверяли, используя критерии Стьюдента, а адекватность модели оценивали по критерию Фишера. Этот метод не потерял своей актуальности и сегодня.

Методами статистического моделирования предлагают прогнозировать сроки службы консервационных материалов в работе [8] на основе исследований кинетики коррозионных поражений стали в разных климатических зонах, выявлении и оценке главных атмосферных факторов, ускоряющих этот процесс. Изучали прежде всего поверхностную коррозию. По модели кинетической кривой строили такие критерии защитной эффективности консервационных материалов как время достижения определенного порога критического поражения поверхности, площадь коррозионного поражения (S) для заданного момента времени, коэффициент торможения γ. Все эти критерии могут быть использованы в виде точечных оценок и доверительных интервалов.

Существует удельно-стоимостной критерий эффективности ингибиторной защиты, руб /м^3, показывающий, сколько стоит ингибиторная защита единицы площади защищаемой поверхности [7].

Интересен подход, связывающий защитную эффективность, определенную в лабораторных условиях с промышленной оценкой ИК, предложенный в работе [9], отраженный в данных таблицы 2.

Таблица 2 – Критерии оценки эффективности ИК

Лабораторные условия	Промышленная оценка ИК			
	слабо	средне	хорошо	отлично
Z, %	≥90	$75 \leq Z < 90$	$50 \leq Z < 74$	< 50

С эколого-токсикологическими критериями ИЗ все достаточно сложно, так как далеко не всегда известны значения ПДК, которые используются при расчете предотвращенного экологического ущерба от использования ингибиторной защиты. В качестве экспрессной

интегральной оценки токсичности в [9] предложено использовать критерии биохимического (БПК) и химического (ХПК) потребления кислорода в растворах с соответствующей концентрацией ИК.

Частная собственность не способствует учету противокоррозионных свойств конструкционных материалов на стадии проектирования и разработки техники и оборудования, проведению дорогостоящих противокоррозионных мероприятий при ее эксплуатации структурами технического сервиса предприятий-изготовителей, сохранению основных фондов, оптимизации затрат на противокоррозионную защиту. Технику эксплуатируют в разных регионах, сокращая сроки хранения в период неиспользования, иногда вообще не проводя противокоррозионных мероприятий. На первое место может выйти не обеспечиваемая защитная эффективность ингибиторной защиты, а минимизация затрат.

Локальная коррозия, как правило опасней сплошной равномерной, но в сельскохозяйственном производстве на нее меньше обращают внимания, так как ее тяжелее учитывать на больших металлических поверхностях и с ней сложнее бороться.

При возникновении таких типов коррозии (местной пятнами, питтинговой, точечной, межкристаллитной, растрескивающей, подповерхностной и т.д.) требуются специфичные критерии оценки эффективности ингибиторной защиты. Как указано в ГОСТ 9.908-85 для местной коррозии пятнами, диаметр которых больше глубины прокорродировавшего металла, например, подходит критерий степени поражения поверхности (%), определяемой через отношение суммы поверхностей пятен к общей площади образца. В этом случае одного показателя недостаточно, требуется еще определять глубину поражения металла. Аналогично, в случае питтинговой коррозии актуальны одновременно три критерия (степень поражения поверхности, максимальная глубина проникновения, максимальный размер поперечника питтинга). В случае межкристаллитной коррозии и коррозионного растрескивания глубинного критерия проникновения коррозионного поражения недостаточно, необходимо использовать критерии, характеризующие снижение механических свойств.

Вообще, среди количественных методов оценки эффективности ингибиторной защиты очень перспективны электрохимические, что связано со стремлением исследователей к сокращению времени коррозионных испытаний. К тому же сама коррозия протекает чаще всего по электрохимическому механизму, поэтому электрохимические методы теоретически позволяют точнее описать коррозионные процессы. Очень важным преимуществом электрохимических методов является отсутствие необходимости снимать защитное покрытие для определения, начались ли процессы коррозионного разрушения под ним.

К наиболее простым электрохимическим методам относится измерение электрохимического потенциала (Е) металла, по значению которого, совместно с pH среды по диаграммам Пурбе можно судить о том, находится ли металл в пассивном состоянии или активно растворяется. Привлекают экспресностью, простотой аппаратурного оформления достаточно информативные методы снятия поляризационных кривых – зависимостей анодного и катодного тока от потенциала. В упомянутом выше ГОСТ 9.506-87 (таблица 1), в частности, описывают потенциодинамический и гальваностатический варианты этого метода. В [10] с помощью потенциометрии по промежутку времени от начала испытаний до найденного экстраполяцией момента пробоя, определяют срок службы покрытия. В ГОСТ 9.509-89 (таблица 1) предлагают ряд электрохимических испытаний:

- с помощью полярографа при выдерживании металла в парах ИК:

$$Z = \Delta h/\tau, \tag{14}$$

где Δh - разность амплитуд волн поляризационной кривой без ингибитора и поляризационной кривой стационарного вида с ингибитором, мм;

τ - время выдержки электрода в парах ингибитора до достижения поляризационной кривой стационарного вида, мин;

- измерение сопротивления (R,Ом) и емкости (C, Ф) образцов в растворе NaCl при различных частотах переменного тока:

$$R = \frac{R_{изм.}[1+(2\pi f)^2 \cdot C^2_{изм.} \cdot R^2_{изм.}]}{(2\pi f)^2 \cdot C^2_{изм.} \cdot R^2_{изм.}}, \qquad C = \frac{C_{изм.}}{1+(2\pi f)^2 \cdot C^2_{изм.} \cdot R^2_{изм.}} \tag{15}$$

где f - частота переменного тока, Гц;
$R_{изм}$- измеренные значения сопротивления при каждой частоте тока, Ом;
$C_{изм}$ - измеренные значения емкости при каждой частоте тока, Ф.

Метод поляризационного сопротивления, основанный на принципе Стерна-Гири (ГОСТ 9.514-99, таблица 1) предполагает, что вблизи стационарного потенциала зависимость между плотностью тока I и сдвигом потенциала ΔE прямолинейна:

$$R_n = \frac{\Delta E}{i} \tag{16}$$

где Rп - поляризационное сопротивление, ΔE – сдвиг потенциала от стационарного значения в катодном или анодном направлении, не превышающий 25 мВ.

Плотность коррозионного тока:

$$i_{кор} = \frac{b_k b_a}{2{,}3(b_k b_a)} \cdot \frac{1}{R_n}, \tag{17}$$

где b_k и b_a – тафелевские наклоны катодного и анодного процессов. Зависимость (9) позволяет сравнивать эффективность ингибиторов по значениям поляризационного сопротивления.

Коррозиметр «Моникор-2М» реализует на практике метод Стерна-Гири.

В работе [11] предложено определять характер защитного действия ИК путем сравнения катодных и анодных граничных сопротивлений и соответствующих сдвигов потенциала стального электрода от стационарного значения.

Одним из наиболее широко используемых в настоящее время методов исследования коррозионной стойкости металлов является импедансный [12], основанный на измерении электрической емкости и сопротивления металла под пленкой защитного покрытия, погруженного в электролит при наложении на систему переменного тока.

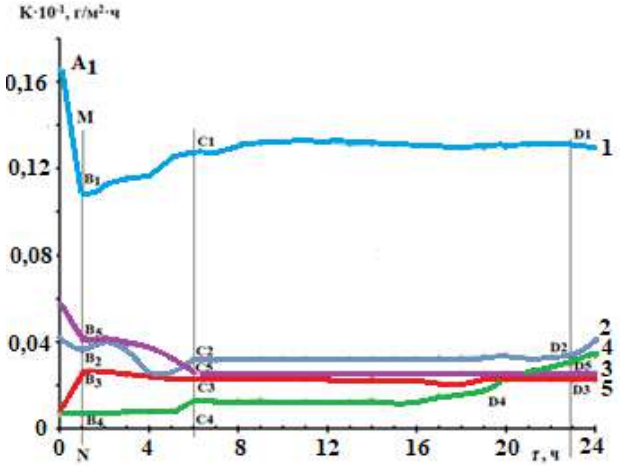
В работах [12,13] описывают систему металл — защитное покрытие — электролит с помощью стационарных потенциалов, поляризационных характеристик, омического сопротивления, емкости, скорости диффузии и т. п., как электрохимически активную систему. Выявлено, что, если при введении ИК защитная способность возрастает, то величина Z определяется свойствами не только ИК, а защитной системы «фазовая пленка — ингибитор», в целом». Методом определения поляризационного сопротивления можно оценить вклад каждой из составляющих такой системы [9, 12,13].

В данной работе представлены в качестве примера использования последнего метода результаты исследования ингибированных масляных композиций.

Результаты и обсуждение. Исследовали композиции на основе трансформаторного ТКп, индустриального И-20А, моторного М10Г$_2$к, свежего и отработанного (ММО) и комбинированных ИК CortecVpCI-368 и Cortec VpCI-369 [14,15]. При измерениях методом поляризационных кривых покрытия на стали предварительно формировались в течение суток. Метод линейного поляризационного сопротивления позволяет проследить за коррозионными процессами в режиме реального времени.

Рассмотрим отдельно зависимости изменения скорости коррозии во времени незащищенной стальной поверхности, защищенной только маслом, защищенной ингибированным маслом (рисунки 1- 5).

Как следует из рисунка 1 в первые 24 часа скорость атмосферной коррозии углеродистой стали 0,8кп невелика за счет защитного действия сформированной на поверхности металла воздушно-оксидной пленки (рисунок 1, кривая 1). Затем при абсорбции пленкой влаги, видимо, меняется структура поверхностной пленки и снижается ее защитная способность, что приводит к систематическому повышению скорости коррозии.



1 – Фон, 2 – И20А; 3 - М10Г$_2$к, 4– ТКп; 5 – ММО
Рисунок 1 – Изменение скорости коррозии во времени

Введем точки A_1, B_1, C_1, D_1 на кривой 1. Точка A_1 – начало отсчета протекания коррозионного процесса, для этого момента времени (τ_{A1}) скорость коррозии будет K_{A1}. Величины защитной эффективности к моментам времени τ_{B1}, τ_{C1} и τ_{D1} могут быть рассчитаны из зависимостей:

$$Z_{B1} = (K_{A1} - K_{B1})/K_{A1}, \quad (18)$$

$$Z_{C1} = (K_{A1} - K_{C1})/K_{A1}, \quad (19)$$

$$Z_{D1} = (K_{A1} - K_{D1})/K_{A1}. \quad (20)$$

На участке A_1B_1 скорость коррозии быстро снижается во времени за счет образования поверхностных твердофазных оксидных образований. На участке C_1D_1 вблизи τ_C величина $dK/d\tau$ существенно снижена, либо вообще стремится к нулю, когда достигается стационарное состояние защитной пленки вблизи τ_D. Таким образом, твердофазная защитная пленка характеризуется вполне определенной величиной Z_D.

Нанесение на поверхность корродирующей стали пленок исследуемых масел приводит к снижению скорости коррозии (рисунок 1, кривые 2-5) и, соответственно, возрастанию защитного эффекта системы «твердофазная пленка-масло». В такой бимодальной защитной системе есть два компонента, оказывающие защитное действие. Принимаем, что вклад твердофазной пленки сохраняется без изменения в присутствии масла. Защитная эффективность твердофазной защитной пленки (Z_B, Z_C и Z_D) оценена по данным кривой 1 рисунка 1.

$$Z_{\Sigma,B} = Z_B + Z_{B,м}, \quad (21)$$

$$Z_{\Sigma,C} = Z_C + Z_{C,м}, \quad (22)$$

$$Z_{\Sigma,D} = Z_D + Z_{D,м}. \quad (23)$$

Для масла к моментам τ_B, τ_C и τ_D имеем:

$$Z_{B,м} = (K_{B1} - K_{B2})/ K_{A1}, \quad (24)$$

$$Z_{C,м} = (K_{C1} - K_{C2})/K_{A1}, \quad (25)$$

$$Z_{D,м} = (K_{D1} - K_{D2})/K_{A1}. \quad (26)$$

Полученные данные для исследуемых масел отражены в таблице 3.

Таблица 3 – Защитная эффективность бимодальной системы «твердофазная пленка -масло» по данным рисунка 1

Масло	Защитная эффективность (Z), %								
	Z_{B1}	Z_{C1}	Z_{D1}	$Z_{B,\,M}$	$Z_{C,\,M}$	$Z_{D,\,M}$	ZΣ, B	ZΣ, C	ZΣ, D
И20-А	34,1	24.8	21,7	44,2	57,3	58,1	91,4	82,1	79,8
ММО	34,1	24,8	21,7	50,0	60,8	62,7	84,1	85,7	84,5
М10Г2к	34,1	24,8	21,7	46,0	60,8	60,8	80,1	85,6	82,5
ТКп	34,1	24,8	21,7	60,6	68,5	59,4	94,1	93,3	81,1

Как следует из представленных результатов, к 24 часам экспозиции максимальный вклад в суммарный защитный эффект обеспечивают защитные пленки ММО, причем защитный эффект приблизительно одинаков через 1 час, и через 23 часа.

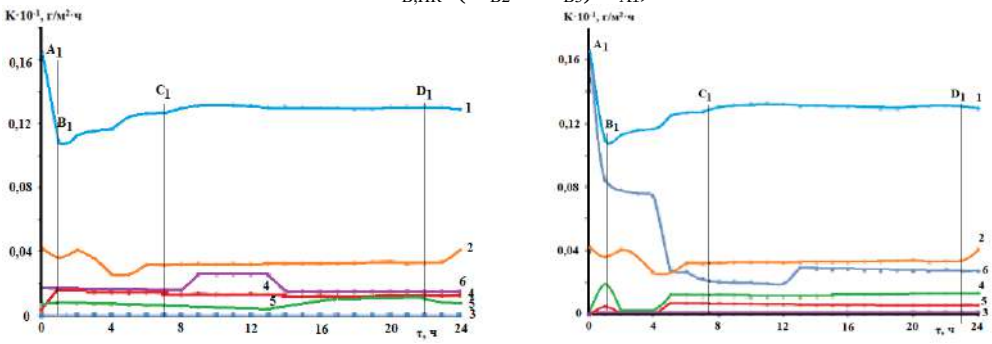
В случае масел, ингибированных комбинированными ИК CortecVpCI-368 (1) и Cortec VpCI-369 принимаем аддитивное действие всех трех компонентов системы: твердофазной пленки (ТФК), неингибированного масла (НМ) и ИК.

$$Z_{\Sigma} = Z_{ТФК} + Z_{НМ} + Z_{ИК} \quad (27)$$

На рисунке 2 приведены зависимости изменения скорости коррозии для ингибированного индустриального масла И-20А в первые 24 часа. В таблице 4 приведены данные о вкладах компонентов в реперных точках. Максимальный вклад ингибиторов коррозии в общую защитную эффективность наблюдается при их концентрации 3 масс.%.

Защитный эффект 3 масс. % ИК ко времени в точке Вможно рассчитать из зависимости:

$$Z_{B,ИК}=(K_{B2}\text{-K } K_{B3})/K_{A1}, \quad (28)$$



а б

Рисунок 3 – Изменение во времени скорости коррозии И-20А, ингибированного CortecVpCI-368 (а) и Cortec VpCI-369 (б) в концентрации, масс. %: 1 – 0 (фон), 2 – 0 (И-20А); 3 - 3; 4 – 5; 5 – 7; 6 – 10

Таблица 3 – Защитная эффективность «твердофазная пленка - индустриальное масло - ИК» по данным рисунка 3

$C_{ИК}$, масс.%	Защитная эффективность (Z), %											
	Твердофазная пленка			Неингибированное масло (НМ)			ИК, $Z_{ИК}$			Суммарный защитный эффект		
	Индустриальное масло											
	Z_{B1}	Z_{C1}	Z_{D1}	$Z_{B,\,M}$	$Z_{C,\,M}$	$Z_{D,\,M}$	$Z_{B,\,ИК}$	$Z_{C,\,ИК}$	$Z_{D,\,ИК}$	$Z_{\Sigma,\,B}$	$Z_{\Sigma,\,C}$	$Z_{\Sigma.D}$
0	34/34	25/25	22/22	44/44	57/57	58/58						
3	34/34	25/25	22/22	44/44	57/57	58/58	22/22	18/17	20/20	~100/ ~100	~100/ ~99	~100/ ~100
5	34/34	25/25	22/22	44/44	57/57	58/58	12/11	11/12	13/13	90/89	93/94	93/93
7	34/34	25/25	22/22	44/44	57/57	58/58	16/19	15/15	13/17	94/97	97/97	93/97
10	34/34	25/25	22/22	44/44	57/57	58/58	12/-29	10/3	11/4	90/49	92/85	91/84

Приведенные данные свидетельствуют о максимальном вкладе ИК в общую защитную эффективность при концентрации 3 масс. % и о наименьшем - при концентрации 10 масс. %, причем существенные различия между вкладами CortecVpCI-368 и Cortec VpCI-369 наблюдаются только в последнем случае. В И-20А вклады ИК выше, чем для составов на основе ТКп (таблица 4).

Максимальный вклад ИК в общую защитную эффективность композиций с ТКп наблюдается также при их концентрации 3 масс.%. Только в этом случае кривая изменения скорости коррозии проходит ниже кривой, полученной для пленки неингибированного ТКп. При концентрации ИК в масле 5 и 7 масс. % кривая идет ниже только при времени 20-24 часа, можно это связать с его медленной адсорбцией. Возможно, причина еще и в том, что исходные масла и вводимые нами исследуемые ИК вступают в антагонизм, что не проявляется при низкой концентрации ИК (3 масс. %). Но, чем выше концентрация ИК, тем сильнее проявляется антагонизм, поэтому кривая для масла с 10 масс. % ИК идет выше кривой неингибированного масла в течение всего времени измерения. Вклады CortecVpCI-368 и Cortec VpCI-369 мало отличаются друг от друга.

Таблица 4– Защитная эффективность «твердофазная пленка-трансформаторное масло - ИК»

$C_{ИК}$масс. %	Защитная эффективность композиций с CortecVpCI-368/ CortecVpCI-369, %											
	Твердофазная пленка			Неингибированное масло (НМ)			ИК, $Z_{ИК}$			Суммарный защитный эффект		
	Трансформаторное масло											
	Z_{B1}	Z_{C1}	Z_{D1}	$Z_{B,\,М}$	$Z_{C,\,М}$	$Z_{D,\,М}$	$Z_{B,\,ИК}$	$Z_{C,\,ИК}$	$Z_{D,\,ИК}$	$Z_{\Sigma,\,B}$	$Z_{\Sigma,\,C}$	$Z_{\Sigma.D}$
0	34/34	25/25	22/22	61/61	69/69	59/59						
3	34/34	25/25	22/22	61/61	69/69	59/59	4/4	7/7	10/10	99/99	~100/ ~100	~100/ ~100
5	34/34	25/25	22/22	61/61	69/69	59/59	-2/-9	2/3	4/3	93/87	94/93	95/94
7	34/34	25/25	22/22	61/61	69/69	59/59	-2/-1	4/3	5/5	93/95	98/97	96/96
10	34/34	25/25	22/22	61/61	69/69	59/59	-13/-10	-9/-17	-13/-16	82/85	85/77	78/75

В таблице 5 приведены данные по защитной эффективности для ингибированного моторного масла М10$Г_2$к, свежего и отработанного (ММО). Как следует из приведенных данных суммарный защитный эффект для композиций на основе ММО, выше, чем для свежего М10$Г_2$к, причем высокие значения защитной эффективности достигаются практически сразу.

Таблица 5 – Защитная эффективность «твердофазная пленка – моторное масло - ИК»

$C_{ИК}$, мас. %	Защитная эффективность (Z), %											
	Твердофазная пленка			Неингибированное масло (НМ)			Твердофазная пленка			Суммарный защитный эффект		
	CortecVpCI-368/ CortecVpCI-369 в М10$Г_2$к											
	Z_{B1}	Z_{C1}	Z_{D1}	$Z_{B,\,М}$	$Z_{C,\,М}$	$Z_{D,\,М}$	$Z_{B,\,ИК}$	$Z_{C,\,ИК}$	$Z_{D,\,ИК}$	$Z_{\Sigma,\,B}$	$Z_{\Sigma,\,C}$	$Z_{\Sigma.D}$
0	34/34	25/25	22/22	46/46	61/61	61/61						
3	34/34	25/25	22/22	46/46	61/61	61/61	16/16	14/14	14/14	96/96	~100/ ~100	97/97
5	34/34	25/25	22/22	46/46	61/61	61/61	-17/-11	-3/0	-1/3	63/69	83/86	82/83
7	34/34	25/25	22/22	46/46	61/61	61/61	12/8	10/7	7/8	92/88	96/93	90/91
10	34/34	25/25	22/22	46/46	61/61	61/61	-14/-11	3/-12	5/-11	66/69	89/74	88/72
	CortecVpCI-368/ CortecVpCI-369 в ММО											
	Z_{B1}	Z_{C1}	Z_{D1}	$Z_{B,\,М}$	$Z_{C,\,М}$	$Z_{D,\,М}$	$Z_{B,\,ИК}$	$Z_{C,\,ИК}$	$Z_{D,\,ИК}$	$Z_{\Sigma,\,B}$	$Z_{\Sigma,\,C}$	$Z_{\Sigma.D}$
0	34/34	25/25	22/22	50/50	61/61	63/63						
3	34/34	25/25	22/22	50/50	61/61	63/63	16/16	14/14	15/15	~100/ ~100	~100/ ~100	~100/ ~100
5	34/34	25/25	22/22	50/50	61/61	63/63	14/11	11/12	13/13	98/95	97/98	98/98

7	34/34	25/25	22/22	50/50	61/61	63/63	16/16	14/14	13/15	~100/ ~100	~100/ ~100	98/ ~100
10	34/34	25/25	22/22	50/50	61/61	63/63	12/1	10/3	13/15	96/85	96/89	98/ ~100

Для всех масляных композиций оптимальная концентрация ИК – 3 масс.%, для композиций на основе ММО 3 - 10 масс.%. При всех концентрациях ИК во всех исследованных маслах в принципе получены достаточно близкие значения скорости коррозии. Следует отметить, что для метода поляризационного сопротивления характерен большой разброс результатов параллельных экспериментов, что характерно для пленок наноразмерной толщины.

Таким образом, согласно исследованиям, проведенным методом поляризационного сопротивления оптимальный растворитель-основа – ММО, оптимальная концентрация ИК - 3 масс. % и 3 -10 масс. % в ММО.

В таблице 6 приведены сравнительные данные, полученные из электрохимических и гравиметрических испытаний, по влиянию концентрации составов на основе Cortec VpCI-368 и Cortec VpCI-369 в индустриальном масле И-20А на их защитную эффективность на стали 0,8кп.

Таблица 6 – Зависимость защитной эффективность композиций на основе Cortec VpCI-368 и Cortec VpCI-369 в И-20А на стали 0,8кп при электрохимических и гравиметрических испытаниях

Концентрация VpCl в И-20А, масс. %	Защитная эффективность (Z), % при исследованиях							
	CortecVpCI-368				CortecVpCI-369			
	электрохимия в 0,5 М NaCl по методам		гравиметрия		электрохимия в 0,5 М NaCl по методам		гравиметрия	
	поляризационных кривых	поляризационного сопротивления (24 ч)	0,5 М NaCl	Г-4	поляризационных кривых	поляризационного сопротивления (24 ч)	0,5 М NaCl	Г-4
0	41	58	21	41	41	58	21	45
3	89	~100	29	86	71	~100	29	97
5	96	93	69	97	87	93	69	99
7	96	93	69	97	97	97	69	99
10	96	91	69	98	98	84	69	~100
100	89		81	~100	71		80	~100

При сравнении результатов исследований разными методами во всех случаях получены качественно подобные результаты. Различия связаны с различными условиями проведения экспериментов в разных методах исследования. Введение ИК в масло в количестве 3-10 масс. % позволяет не менее, чем в два раза увеличить защитную эффективность покрытия. Максимальная защитная эффективность для композиций при 3 масс. % ИК, полученная методом поляризационного сопротивления, при остальных исследованиях не подтвердилась. Значения защитной эффективности композиций с CortecVpCI-368 и CortecVpCI-369 С при концентрации от 3 до 10 масс. % достаточно близки между собой при различных методах исследования.

Выводы. Критерии эффективности ИЗ разнообразны. Масляные композиции перспективно рассматривать методом поляризационного сопротивления, определяя вклад в общую защитную эффективность всех компонентов. Защитную эффективность (Z) отдельно ИК и всей защитной системы в целом можно использовать в качестве объективного критерия эффективности ИЗ. Для быстрой, эффективной и достоверной оценки эффективности ИЗ желательно одновременно использовать несколько методов исследования и, возможно, несколько различных критериев, а также проводить статистическую обработку данных, чтобы подтвердить достоверность полученных результатов. Лабораторные исследования необходимо проверять на практике в непосредственных условиях эксплуатации и хранения сельскохозяйственной техники и оборудования.

Список источников

1. Козлова Л.С., Сибилева С.В., Чесноков Д.В., Кутырев А.Б. Ингибиторы коррозии (обзор)//Авиационные материалы и технологии. - 2015.-№ 2.- С.67 – 75.

2. Vigdorovich V.I., Knyazeva L.G., Tsygankova L.E., Ostrikov V.V., Petrashev A.I. Properties of Petroleum and Synthetic Oils as Bases for Anticorrosion Materials//Chemistry and Technology of Fuels and Oils. 2019. T. 55. № 4. C. 412-423.

3. Кузнецова Е.Г., Прохоренков В.Д., Князева Л.Г., Петрашев А.И., Гайдар С.М. Защитная эффективность водорастворимых ингибиторов коррозии при консервации сельскохозяйственной техники//Техника в сельском хозяйстве. - 2012. - № 6. – С. 23-25.

4. Брянский Б.Я., Бутакова Ю.А., Мухин В.А., Новикова В.В., Проскура А.Г. О выборе ингибиторов коррозии на основе измерений граничного сопротивления // Вестник Омского университета. - 2017. - № 1. - С. 55 – 58.

5. Голубев М.И. Повышение эффективности хранения лесохозяйственных машин путем разработки и применения ресурсосберегающих консервационных составов. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. М.: 2013

6. Цикерман Л.Я., Кесельман Г.С. Технико-экономическая эффективность противокоррозионной защиты подземных металлических трубопроводов. М.: Изд-во ЦНИИТЭнефтегаз, 1964.

7. Тыр С.Г., Федоров Ю.В., Бобошко З.А. Оценка ингибиторов коррозии методом математического планирования// Защита металлов. -1989.-Т.25.- № 6.- С. 998-1001.

8. Лапига А.Г., Калинина Э.В., Карпов В.А., Михайлова О.Л. Прогнозирование сроков службы консервационных материалов методами статистического планирования// Химия и технология топлив и масел. -1998.-№9.- С.24-27

9. Вигдорович В.И., Стрельникова К.О. Критерии оценки защитной эффективности ингибиторов коррозии//Конденсированные среды и межфазные границы.-Т.13.- №1.-С.24-28.

10. Способ определения срока службы защитных покрытий на металлах в агрессивных средах. Авторское свидетельство № 1817013. Опубл. 23.05.93. Бюл. № 19.

11. Кичигин В.И., Шерстобитова И.Н., Шеин А.Б. Импеданс электрохимических и коррозионных систем: учеб. пособие по спецкурсу. Пермь, Перм. гос. ун-т, 2009. 239 с.

12. Vigdorovich, V.I. Addition of surface polysulfide film to the inhibitor protective action against hydrosulfide corrosion of carbon steel / V.I. Vigdorovich, L.E. Tsygankova and N.V. Shel // Surf. InterfaceAnal. – 2010. – V. 42, № 5, 6. – P. 626 – 628.

13. Вигдорович В.И., Цыганкова Л.Е., Князева Л.Г., Шель Н.В., Кузнецова Е.Г., Дорохов А.В., Остриков В.В., Урядников А.А. Способ дифференциации вкладов компонентов антикоррозионной системы, формирующейся на корродирующей металлической поверхности, в ее интегральную эффективность в агрессивной среде. Патент на изобретение RU 2648012 C2, 21.03.2018. Заявка № 2016109163 от 14.03.2016.

14. Knyazeva L.G., Tsygankova L.E., Dorokhov A.V., Kur`yato N.A. Protective efficiency of oil compositions with Cortec VpCI-368D // International Journal of Corrosion and Scale Inhibition. 2021. Vol. 10, no. 2. P. 551-561.

15. Knyazeva L.G., Tsygankova L.E., Dorokhov A.V., Kur`yato N.A. Protective efficiency of oil compositions with Cortec VpCI-368D // International Journal of Corrosion and Scale Inhibition. 2021. Vol. 10, no. 2. P. 551-561.

References

1. Kozlova L.S., Sibileva S.V., Chesnokov D.V., Kutyrev A.B. Corrosion inhibitors (review)//Aviation materials and technologies. - 2015.-No. 2.- P.67 - 75.

2. Vigdorovich V.I., Knyazeva L.G., Tsygankova L.E., Ostrikov V.V., Petrashev A.I. Properties of Petroleum and Synthetic Oils as Bases for Anticorrosion Materials//Chemistry and Technology of Fuels and Oils. 2019. V. 55. No. 4. S. 412-423.

3. Kuznetsova E.G., Prokhorenkov V.D., Knyazeva L.G., Petrashev A.I., Gaidar S.M. Protective effectiveness of water-soluble corrosion inhibitors in the conservation of agricultural machinery//Technology in agriculture. - 2012. - No. 6. - S. 23-25.

4. Bryansky B.Ya., Butakova Yu.A., Mukhin V.A., Novikova V.V., Proskura A.G. On the choice of corrosion inhibitors based on measurements of boundary resistance // Bulletin of the Omsk University. - 2017. - No. 1. - S. 55 - 58.

5. Golubev M.I. Improving the efficiency of storage of forestry machines through the development and use of resource-saving conservation compositions. Abstract of the dissertation for the degree of candidate of technical sciences. M.: 2013

6. Tsikerman L.Ya., Keselman G.S. Technical and economic efficiency of anti-corrosion protection of underground metal pipelines. M.: Publishing house of TsNIITEneftegaz, 1964.

7. Tyr S.G., Fedorov Yu.V., Boboshko Z.A. Evaluation of corrosion inhibitors by the method of mathematical planning// Protection of metals. -1989.-T.25.- No. 6.- S. 998-1001.

8. Lapiga A.G., Kalinina E.V., Karpov V.A., Mikhailova O.L. Forecasting the service life of conservation materials by methods of statistical planning // Chemistry and technology of fuels and oils. - 1998.-№9.- P.24-27

9. Vigdorovich V.I., Strelnikova K.O. Criteria for evaluating the protective effectiveness of corrosion inhibitors//Condensed media and interphase boundaries.-T.13.- No. 1.-C.24-28.

10. Method for determining the service life of protective coatings on metals in aggressive environments. Copyright certificate No. 1817013. Publ. 05/23/93. Bull. No. 19.

11. Kichigin V.I., Sherstobitova I.N., Shein A.B. Impedance of electrochemical and corrosion systems: textbook. special course allowance. Perm, Perm. state un-t, 2009. 239 p.

12. Vigdorovich, V.I. Addition of surface polysulfide film to the inhibitor protective action against hydrosulfide corrosion of carbon steel / V.I. Vigdorovich, L.E. Tsygankova and N.V. Shell // Surf. InterfaceAnal. - 2010. - V. 42, No. 5, 6. - P. 626 - 628.

13. Vigdorovich V.I., Tsygankova L.E., Knyazeva L.G., Shel N.V., Kuznetsova E.G., Dorokhov A.V., Ostrikov V.V., Uryadnikov A.A. A method for differentiating the contributions of the components of an anti-corrosion system formed on a corroding metal surface to its integral efficiency in an aggressive environment. Patent for invention RU 2648012 C2, 03/21/2018. Application No. 2016109163 dated March 14, 2016.

14. Knyazeva L.G., Tsygankova L.E., Dorokhov A.V., Kur'yato N.A. Protective efficiency of oil compositions with Cortec VpCI-368D // International Journal of Corrosion and Scale Inhibition. 2021 Vol. 10, no. 2. P. 551-561.

15. Knyazeva L.G., Tsygankova L.E., Dorokhov A.V., Kur'yato N.A. Protective efficiency of oil compositions with Cortec VpCI-368D // International Journal of Corrosion and Scale Inhibition. 2021 Vol. 10, no. 2. P. 551-561.

Информация об авторах

Л.Г. Князева Лариса Геннадьевна – доктор химических наук, доцент; А.В. Дорохов - кандидат химических наук; Н.А. Курьято – младший научный сотрудник.

Information about the authors

L. Knyazeva – Doctor of Chemical Sciences, Associate Professor; A. Dorokhov - Candidate of Chemical Sciences; N. Curiato - junior researcher.

Вклад авторов: Л.Г. Князева – обзор литературы, формулировка цели и выводов, обработка и анализ результатов исследований; А.В. Дорохов и Н.А. Курьято – проведение экспериментальных исследований.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: L. Knyazeva - literature review, formulation of the goal and conclusions, processing and analysis of research results; A.Dorokhov and N.Kur`yato – conducting experimental studies.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию (Received): 12.01.2023 Принята к публикации (Accepted): 20.02.2023