

Тип статьи: научная
УДК 620.197.6: 62-791.2
DOI: 10.35887/2305-2538-2024-5-7-16

ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЛАКОКРАСОЧНОГО ПОКРЫТИЯ В ЭЛЕКТРОЛИТЕ

Александр Иванович Петрашев

*Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве, г. Тамбов, Российская Федерация
vitin-10.pet@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7949-6883>*

Реферат. Использование известных методов измерения электрического сопротивления защитного покрытия в электролите сопряжено с опасностью применения высокого напряжения, которое ускоряет деградацию покрытия. Обоснована структурная схема измерительного устройства, работающего на низковольтном напряжении до 1,5 В. Устройство содержит два гальванических элемента с электролитом, конденсатор, выключатель, цифровой мультиметр и трехпозиционный переключатель. Один гальванический элемент прикреплен к покрытию на пластине из углеродистой стали и снабжен электродом из нержавеющей стали. Второй гальванический элемент снабжен электродами из углеродистой и нержавеющей стали. Он является источником опорного напряжения. Эталонным сопротивлением служит входное сопротивление мультиметра от 1 МОм. Максимальная величина измеряемого сопротивления покрытия достигает 1400 МОм. Получена формула для расчета удельного электрического сопротивления лакокрасочного покрытия в растворе электролита. Посредством изготовленного устройства исследована динамика изменения удельного электрического сопротивления двух покрытий из полиуретановой краски Raptor с отвердителем. Покрытия нанесены в два и три слоя, длительность испытаний в растворе борофоски составила 200 суток. По завершении испытаний удельное электрическое сопротивление трехслойного покрытия снизилось с 480 до 20 МОм·м, оно было в 4 раза больше двухслойного. Этот результат указывает на существенное увеличение защитной стойкости полиуретанового покрытия после нанесения третьего слоя.

Ключевые слова: лакокрасочное покрытие, удельное электрическое сопротивление, гальванический элемент.

MEASUREMENT OF PAINT COATING RESISTANCE IN ELECTROLYTE

Alexandr Petrashev

*All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture,
Tambov, Russian Federation
vitin-10.pet@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7949-6883>*

Abstract. The use of known methods for measuring the electrical resistance of a protective coating in an electrolyte is associated with the danger of using high voltage, which accelerates degradation of the coating. The structural diagram of a measuring device operating at a low voltage of up to 1.5 V is substantiated. The device contains two galvanic cells with an electrolyte, a capacitor, a switch, a digital multimeter, and a three-position switch. One galvanic cell is attached to the coating on a carbon steel plate and is equipped with an electrode made of stainless steel. The second galvanic cell is equipped with electrodes made of carbon and stainless steel. It is a source of reference voltage. The input resistance of the multimeter from 1 MOhm serves as a reference resistance. The maximum value of the measured coating resistance reaches 1400 MOhm. A formula is obtained for calculating the specific electrical resistance of the paint and varnish coating in an electrolyte solution. Using the manufactured device, the dynamics of changes in the specific electrical resistance of two coatings made of Raptor polyurethane paint with a hardener are studied. The coatings were applied in two and three layers, the duration of testing in the borofoska solution was 200 days. Upon completion of the tests, the specific electrical resistance of the three-layer coating decreased from 480 to 20 MOhm·m, it was 4 times greater than the

two-layer coating. This result indicates a significant increase in the protective resistance of the polyurethane coating after applying the third layer.

Keywords: paint coating, specific electrical resistance, galvanic cell.

Для цитирования: Петрашев А.И. Измерение сопротивления лакокрасочного покрытия в электролите // Наука в Центральной России Science in the Central Russia. 2024. Т. 71, № 5. С. 7-16. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-5-7-16>.

For citation: Petrashev A. Measurement of paint coating resistance in electrolyte. *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2024; 71(5): 7-16. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-5-7-16>.

Введение. Расширение объемов внесения туковых смесей для роста урожайности сельскохозяйственных культур сопряжено с использованием высокопроизводительных разбрасывателей удобрений, повышением их безотказности и долговечности путем применения лакокрасочных покрытий, обладающих высокой стойкостью в условиях длительного воздействия концентрированных растворов этих смесей [1, 2]. В процессе эксплуатации заводские покрытия на узлах тукоразбрасывателей разрушаются, но их восстанавливают путем ремонтного окрашивания. В первую очередь, это касается покрытий шасси, рамы, подвески и кузова [3, 4]. На рисунке 1 показаны узлы прицепных и самоходных тукоразбрасывателей с разрушенными покрытиями, приведен срок использования.



Amazone ZA-M1500, 15 лет



ПУ-7000, 5 лет



Amazone ZA-M900, 2 года



Туман-3, 2 года

Рисунок 1 – Узлы тукоразбрасывателей с разрушенным лакокрасочным покрытием

Как видим, поверхности ряда узлов тукоразбрасывателей после 2-х лет эксплуатации нуждаются в ремонтном окрашивании. Попытки восстановить лакокрасочную защиту тукоразбрасывателей Amazone ZA-M1500 и ПУ-7000 путем окраски атмосферостойкими эмалями типа ПФ-115, рекомендованными действующим ГОСТ 6572-91 [5], оказываются малоэффективными (см. рисунок 1). Для ремонтной окраски узлов тукоразбрасывателей требуются более стойкие лакокрасочные материалы, выбор которых следует начинать с лабораторных исследований.

Антикоррозионную стойкость лакокрасочных покрытий в лабораторных условиях исследователи оценивают, используя как стандартные экспериментальные методы и оборудование, так и разрабатывая новую исследовательскую аппаратуру. Наличие на поверхности металла лакокрасочного покрытия ограничивает применение постоянно-токовых методов исследований, так как воздействие измерительных импульсов высокого напряжения может привести к разрушению покрытия. Ряд авторов [6] считают, что без применения импортной аппаратуры с высоким входным сопротивлением невозможно определять сопротивление высокоомного покрытия. Если покрытие на металлической пластине имеет достаточно высокое сопротивление, не регистрируемое прибором, то на нем предлагается закрепить гальваноячейку с электролитом. Проникновение электролита через поры покрытия со временем приведет к снижению его сопротивления.

ГОСТ 9.083-78 [7] рекомендует в качестве критерия отказа покрытия принимать снижение его электрического сопротивления в электролите до величины приведенного сопротивления разрушения. Приведенное сопротивление покрытия предлагается рассчитывать по формуле:

$$R_{пр} = r_{пк} \cdot S,$$

где $R_{пр}$ – приведенное сопротивление покрытия, Ом·см²; $r_{пк}$ – общее (измеренное) электрическое сопротивление покрытия, Ом; S – площадь соприкосновения агрессивной среды с поверхностью покрытия, см².

В ГОСТ Р 51164-98 [8] изложена методика испытаний защитной способности покрытий в электролите, сущность которой заключается в измерении электрического сопротивления на образцах покрытие-труба в 3 %-ном растворе хлорида натрия посредством тераомметра, присоединенного одним щупом к трубе, а другим – к платиновому (графитовому) электроду в растворе, контактирующем с покрытием трубы. Расчет среднего значения переходного сопротивления покрытия $R_{i,ср}$ (Ом·м²) на каждом образце проводят по формуле:

$$R_{i,ср} = \frac{S}{n} \sum_{j=1}^n r_{ij},$$

где i – номер образца; j – номер измерения; n – количество измерений на i -м образце; r_{ij} – сопротивление i -го образца при j -м измерении, Ом; S – площадь контакта образца с раствором, м².

Однако, в стандартных методиках определения приведенного (переходного) сопротивления [8, 9] не учтена толщина покрытия, поэтому рассчитанные значения сопротивлений считаются отнесенными к толщине покрытия 1 см (или 1 м). Полученный результат не дает представления об изолирующих и защитных свойствах материала, из которого нанесено покрытие, о влиянии количества слоев и их толщины на изменение сопротивления покрытия. К тому же использование тераомметра в качестве измерительного прибора сопряжено с опасностью электрического удара высоким напряжением (до 2500 В). Измерительные импульсы тока высокого напряжения от тераомметра отрицательно воздействуют на тестируемое покрытие, так как в порах с электролитом способны вызвать электрогидравлический эффект [9], существенно ускоряющий деградацию покрытия.

Способом экспресс-оценки состояния защитных покрытий во время длительной эксплуатации и старения [10] предусмотрено измерение электрического сопротивления защитного покрытия в интервале от 83 кОм до 115 кОм под напряжением 1000 В посредством мегаомметра, оснащенного измерительным щупом с токопроводящей подложкой. Полученные результаты сопоставляют с твердостью, адгезией и площадью микротрещин. Этот способ пригоден для экспресс-оценки состояния защитного покрытия, эксплуатируемого в атмосферных условиях, но не применим для измерения электрического сопротивления нового лакокрасочного покрытия, например, из полиуретановой эмали с начальным электрическим сопротивлением 100-500 МОм, длительно работающего в условиях воздействия концентрированного раствора минерального удобрения. Он опасен возможным воздействием тока высокого напряжения (1000 В) во время выполнения измерений.

Для определения удельного объемного электрического сопротивления лакокрасочного покрытия [11] предложен измерительный прибор, включающий два отстоящих друг от друга электрода на участках лакокрасочного покрытия, нанесенного на металлическую пластину.

Измерительные электроды окружены охранными электродами, токи которых не попадают в измерительные цепи, а потенциалы поддерживаются измерительным прибором равными потенциалам измерительных электродов для того, чтобы исключить влияние поверхностного сопротивления между измерительными электродами. Удельное объемное электрическое сопротивление ρ (Ом·м) покрытия определяется расчетным путем по формуле:

$$\rho = \frac{r_{\text{пк}} \cdot S}{2\delta},$$

где δ – толщина покрытия, м.

Данный способ имеет низкую точность, обусловленную измерением практически удвоенного электрического сопротивление покрытия двойной толщины. При этом в приборе используется опасно высокое испытательное напряжение, он оснащен гальванической развязкой для поддержания равных потенциалов на измерительных и охранных электродах, а также защитой от токов перетекания с охранных электродов в измерительные цепи. В натуральных условиях применение охранных электродов неэффективно, так как их потенциалы не способны влиять на величину поверхностного сопротивления между измерительными электродами и повысить точность измерения.

Определенный технический интерес представляет простое по исполнению устройство, предлагаемое для контроля пористости лакокрасочных покрытий на металлической основе [12]. Оно содержит два гальванических элемента в виде диэлектрических резервуаров, прикрепляемых к контролируемому покрытию и наполняемых электролитом. В один резервуар помещают электрод из цинка, а в другой – из меди, имеющие различные стационарные потенциалы, и соединяют их с гальванометром. Электролит из резервуаров по порам в покрытии проникает к металлической основе и замыкает гальваническую цепь между электродами, вызывая прохождение тока через гальванометр. Величина тока зависит от разности потенциалов электродов и омическим сопротивлением смоченных участков покрытия, которое связано с пористостью лакокрасочного покрытия.

Однако, с помощью этого устройства возможна только косвенная оценки омического сопротивления смоченных участков покрытия по качественному критерию «больше-меньше», так как отсутствие эталонного сопротивления в его схеме не позволяет определять численные значения показателей омического сопротивления. Устройство характеризуется низкой чувствительностью из-за слабого измерительного напряжения (для электродов цинк-медь электрохимический потенциал не превышает 0,83 В) и высокого внутреннего сопротивления гальванической цепи, равного удвоенному омическому сопротивлению покрытия. Из-за нестабильности процессов, протекающих в местах контакта электролита с металлической основой, показания гальванометра часто меняются, что искажает точность измерения.

Цель исследования – разработка метода и устройства для определения удельного электрического сопротивления лакокрасочного покрытия в высокоомном диапазоне с использованием низковольтного измерительного напряжения, безопасного для электрической прочности покрытия в процессе его испытаний на длительное воздействие растворов туковых смесей.

Обоснование структурной схемы измерительного устройства.

При проведении исследований на применение низковольтного напряжения для определения высокоомного сопротивления лакокрасочного покрытия в растворе туковой смеси была обоснована и апробирована работоспособная схема измерительного устройства (рисунок 2).

Устройство для определения удельного электрического сопротивления лакокрасочного покрытия в растворе туковой смеси (в электролите) содержит два гальванических элемента, представляющих собой тестовую ячейку 1 и гальваноячейку 2. С ними соединены конденсатор 3, выключатель 4, цифровой мультиметр 5 с высокоомным входным сопротивлением (мультиметр MAS838 с входным сопротивлением 1,0 МОм) и трехпозиционный переключатель 6 (МП-63 1Р) в качестве устройства для переключения электрических цепей.

Тестовая ячейка 1 содержит стальную пластину 7 из углеродистой стали, защищенную исследуемым лакокрасочным покрытием (ЛКП) 8, на котором герметично закреплен пластиковый стакан 9 без дна. На крышке 10 стакана 9 закреплен электрод 11 из нержавеющей стали

(нержавеющий электрод). Нержавеющий электрод 11 тестовой ячейки проводами соединен со стальным электродом 15 гальваноячейки, выполненным из углеродистой стали, и с вводным контактом «с» переключателя 6. Стальная пластина 7 соединена с вводным контактом «b» переключателя 6. Гальваноячейка 2 содержит пластиковый стакан 12 с дном, на крышке 13 которого закреплены нержавеющий электрод 14 и стальной электрод 15. Нержавеющий электрод 14 соединен с выключателем 4 и с обкладкой «плюс» конденсатора 3. Выключатель 4 соединен с гнездом «V.Ω.μA» цифрового мультиметра 5. Выходной контакт «a» переключателя 6 соединен с обкладкой «минус» конденсатора 3 и с гнездом «СОМ» цифрового мультиметра 5. Переключатель 6 имеет позиции: «нейтральное», «включена гальваноячейка», «включены обе ячейки».

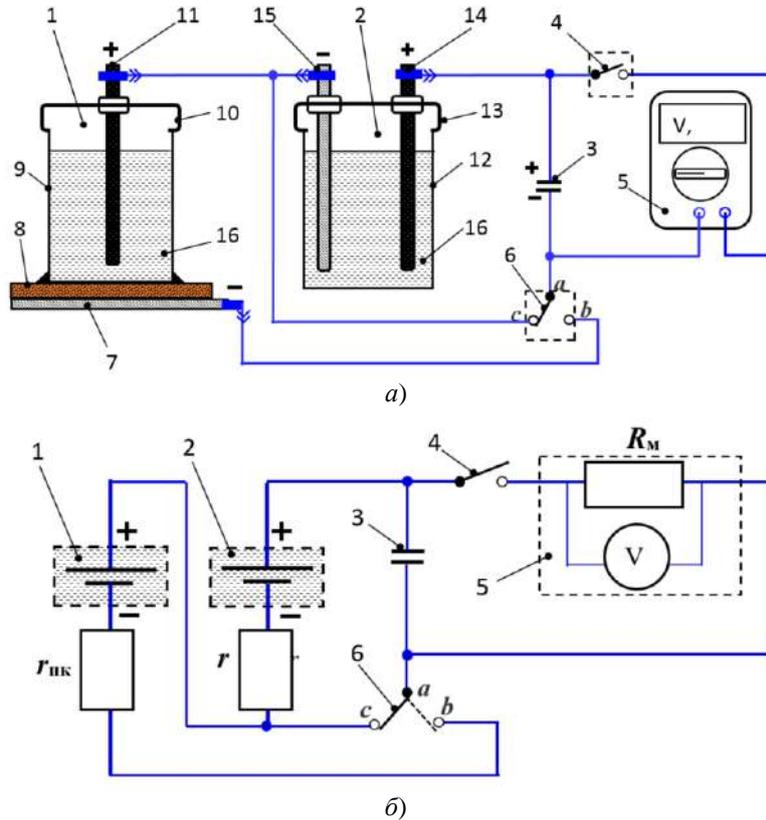


Рисунок 2 – Принципиальная а) и структурная б) схема измерительного устройства:
 1 – тестовая ячейка; 2 – гальваноячейка; 3 – конденсатор; 4 – выключатель; 5 – мультиметр цифровой; 6 – переключатель трехпозиционный; 7 – пластина стальная; 8 – лакокрасочное покрытие; 9, 10 – стаканы без дна; 10, 13 – крышки; 11, 14 – электроды из нержавеющей стали; 12 – стакан с дном; 15 – стальной электрод; 16 – раствор туковой смеси

Входное сопротивление мультиметра обозначено символом R_m . Внутреннее сопротивление тестовой ячейки в совокупности с электрическим сопротивлением ЛКП обозначено символом $r_{пк}$. Внутреннее сопротивление гальваноячейки обозначено символом r . Показывающий дисплей мультиметра обозначен символом V.

Перед началом работы измеряют смачиваемую площадь S (m^2) поверхности ЛКП в тестовой ячейке и толщину δ (м) покрытия. В тестовую ячейку и в гальваноячейку заливают водный раствор туковой смеси, используемой в качестве электролита. Погружают в ячейки с электролитом соответствующие электроды, закрепленные на крышках. В гальваноячейке с электролитом стальной электрод и нержавеющий электрод образуют гальванический элемент. Электродвижущая сила (ЭДС) E гальванического элемента близка к электрохимическому потенциалу $\Delta\phi$ между сталью и нержавеющей сталью, величина которого, по справочным данным

[13], равна:

$$E \cong \Delta\varphi = 0,75 \text{ В.}$$

В гальваноячейке с раствором туковой смеси стальной электрод является катодом, а нержавеющий электрод – анодом. Так как тестовая ячейка тоже имеет нержавеющий электрод и стальную пластину с ЛКП, смоченным электролитом, то после проникновения электролита по порам покрытия к пластине, тестовая ячейка становится гальваническим элементом с ЭДС E_T , примерно равной ЭДС гальваноячейки:

$$E_T = E.$$

При этом в тестовой ячейке стальная пластина является электродом катодом, а нержавеющий электрод – анодом.

В исходном положении переключатель находится на позиции «нейтральное», выключатель и мультиметр выключены. Для проведения измерений переводят переключатель на позицию «включена гальваноячейка». При этом выходной контакт «а» переключателя соединен с вводным контактом «с». Обкладки конденсатора соединены со стальным электродом (катодом) и с нержавеющим электродом (анодом) гальваноячейки, от которой заряжается конденсатор.

Включают мультиметр на диапазон измерения постоянного напряжения U от 0,01 В до 20 В (или от 0,001 В до 2 В), а затем включают выключатель. По показаниям дисплея мультиметра фиксируют величину напряжения U_1 на электродах гальваноячейки и обкладках конденсатора. Во время этого измерения через мультиметр протекает ток I_1 , величина которого зависит от величины опорного напряжения U_1 , фиксируемого на дисплее мультиметра, и входного сопротивления R_M мультиметра:

$$I_1 = \frac{U_1}{R_M}.$$

Затем переключатель переводят на позицию «включены обе ячейки», в которой его выходной контакт «а» соединен с вводным контактом «b». В результате образуется электрическая цепь, в которой стальной электрод (катод) гальваноячейки последовательно соединен с нержавеющим электродом (анодом) тестовой ячейки, а стальная пластина (катод) подключена к обкладке «минус» конденсатора. При последовательном соединении двух источников тока с одинаковыми ЭДС, к которым относятся гальваноячейка и тестовая ячейка, их напряжения суммируются:

$$U_0 = 2U_1.$$

где U_0 – тестовое напряжение при последовательном соединении гальваноячейки с тестовой ячейкой, В.

Если выключатель выключен, то конденсатор заряжается током, проходящим через внутреннее сопротивление r гальваноячейки и внутреннее сопротивление $r_{пк}$ тестовой ячейки, включающее сопротивление ЛКП. Время полного заряда конденсатора до напряжения U_0 напрямую зависит от его емкости, сопротивлений r и $r_{пк}$. При большой величине сопротивления $r_{пк}$ оно может длиться несколько часов, что неприемлемо для процесса измерений.

Поэтому, после перевода переключателя на позицию «включены обе ячейки», выключатель и мультиметр оставляют включенными. Конденсатор разряжается через входное сопротивление R_M мультиметра. Напряжение на нем падает до стабилизированной величины U_M , которая определяется током, питаемым от гальваноячейки и тестовой ячейки. Так как внутреннее сопротивление r гальваноячейки много меньше внутреннего сопротивления $r_{пк}$ ЛКП тестовой ячейки ($r \ll r_{пк}$), то в последующих расчетах величина r не учитывается. Внутренним сопротивлением тестовой ячейки с покрытием считается сопротивление $r_{пк}$ ЛКП.

При последовательном соединении сопротивления $r_{пк}$ покрытия и входного сопротивления R_M мультиметра, в цепи через мультиметр течет ток I_0 под напряжением U_0 :

$$U_0 = 2U_1 = I_0 \cdot r_{пк} + I_0 \cdot R_M. \quad (1)$$

В выражении (1) произведение $I_0 \cdot R_M$ представляет собой падение напряжения U_M , фиксируемое на дисплее мультиметра:

$$I_0 \cdot R_M = U_M. \quad (2)$$

Из формулы (2) определяется сила тока ($I_0 = U_M / R_M$), посредством которой выражение (1) преобразуется в зависимость для расчета электрического сопротивления $r_{пк}$ ЛКП в тестовой ячейке:

$$r_{\text{пк}} = R_{\text{м}} \left(\frac{2U_1 - U_{\text{м}}}{U_{\text{м}}} \right). \quad (3)$$

При практических измерениях напряжения мультиметром MAS838 на стальном и нержавеющей электродах, погруженных в раствор туковой смеси (борофоски), получена величина опорного напряжения $U_1 = 0,71$ В. Согласно технической характеристике на мультиметр MAS838, его входное сопротивление $R_{\text{м}} = 1$ МОм, минимальное значение измеряемого падения напряжения $U_{\text{м.мин}} = 0,01$ В в диапазоне от 0,01 В до 20 В (или $U_{\text{м.мин}} = 0,001$ В в диапазоне от 0,001 В до 2 В). По формуле (3) рассчитана максимальная величина сопротивления ЛКП, которая может быть определена посредством разрабатываемого комплекта: $r_{\text{пк.макс}} = 140$ МОм в диапазоне от 0,01 В до 20 В (или $r_{\text{пк.макс}} = 1400$ МОм в диапазоне от 0,001 В до 2 В)

Удельное электрическое сопротивление тестируемого ЛКП рассчитывается по формуле:

$$\rho_{\text{пк}} = r_{\text{пк}} \cdot \frac{S}{\delta} = R_{\text{м}} \cdot \frac{S}{\delta} \cdot \left(\frac{2U_1}{U_{\text{м}}} - 1 \right), \quad (4)$$

где $\rho_{\text{пк}}$ – удельное электрическое сопротивление ЛКП, МОм·м; S – площадь контакта ЛКП с раствором туковой смеси в тестовой ячейке, м²; δ – толщина тестируемого участка ЛКП, м; $R_{\text{м}}$ – входное сопротивление мультиметра, МОм; U_1 – опорное напряжение на электродах гальваноячейки, фиксируемое по дисплею мультиметра, В; $U_{\text{м}}$ – падение напряжения на входном сопротивлении мультиметра при последовательном соединении гальваноячейки и тестовой ячейки, измеряемое по дисплею мультиметра, В.

Формула (4) позволяет вычислять изменение удельного электрического сопротивления ЛКП в процессе его испытаний на стойкость к воздействию раствора туковой смеси. Предлагаемое устройство может использоваться при выборе ремонтного лакокрасочного покрытия для узлов тукоразбрасывателя, изготовленных из углеродистой конструкционной стали. При этом защитная стойкость покрытия оценивается по изменению величины удельного электрического сопротивления при длительном воздействии концентрированного раствора туковой смеси.

Материалы и методы.

Посредством изготовленного устройства исследовали динамику изменения удельного электрического сопротивления двух лакокрасочных покрытий в двух тестовых ячейках с раствором борофоски, содержание которой по сухому остатку равно 200 г/л. Испытаны лакокрасочные покрытия из двухкомпонентной полиуретановой краски Raptor (с отвердителем), нанесенной кистью в 2 и 3 слоя на пластины из стали 08кп. Смачиваемые участки полиуретановых покрытий Raptor в тестовых ячейках имели толщину: двухслойное покрытие – $\delta = 0,18$ мм ($0,18 \cdot 10^{-3}$ м), трехслойное покрытие – $\delta = 0,25$ мм ($0,25 \cdot 10^{-3}$ м). Смачиваемая площадь контакта раствора борофоски с покрытием в каждой тестовой ячейке: $S = 10$ см² (10^{-3} м²). После заправки тестовых ячеек раствором борофоски, покрытия под раствором выдерживали двое суток. Используя трехпозиционный переключатель, посредством мультиметра MAS838 сначала измеряли величину напряжения U_1 – на нержавеющей и стальном электродах гальваноячейки, а затем величину падения напряжения $U_{\text{м}}$ на входном сопротивлении мультиметра при последовательном соединении гальваноячейки и тестовой ячейки.

Измерения значений напряжения выполняли поэтапно в течение 200 суток. После каждого этапа измерений, тестовую ячейку и гальваноячейку разъединяли, из гальваноячейки извлекали электроды вместе с крышкой. Гальваноячейку с раствором борофоски плотно закрывали новой крышкой, чтобы избежать испарения воды из раствора. Извлеченные электроды промывали дистиллированной водой, удаляли со стального электрода продукты окисления и сушили его ацетоном. Сухие электроды помещали их в эксикатор с силикагелем. Для проведения новых измерений ячейки соединяли по схеме, изображенной на рисунке 2. Тестовые ячейки с раствором борофоски на протяжении всего периода испытаний оставались герметично закрытыми посредством крышек с закрепленными на них нержавеющей электродами.

Результаты и их обсуждение.

По формуле (3) определили начальную величину электрического сопротивления покрытий после двух суток экспозиции покрытий в растворе борофоски: для двухслойного покрытия – $r_{\text{пк}} = 13$ МОм; для трехслойного – $r_{\text{пк}} = 120$ МОм.

Результаты поэтапных измерений напряжений, выполненных в процессе испытаний покрытий

в растворе борофоски в течение 200 суток, пересчитали в удельное электрическое сопротивление $\rho_{\text{пк}}$ лакокрасочного покрытия. Полученные зависимости (рисунок 3) характеризовали динамику изменения удельного электрического сопротивления двухкомпонентных полиуретановых покрытий Raptor при длительном воздействии раствора борофоски.

Так, например, за период испытаний удельное электрическое сопротивление двухслойного покрытия толщиной 0,18 мм снизилось от $\rho_{\text{пк}} = 70$ МОм·м до $\rho_{\text{пк}} = 5$ МОм·м, а трехслойного покрытия толщиной 0,25 мм снизилось от $\rho_{\text{пк}} = 480$ МОм·м до $\rho_{\text{пк}} = 20$ МОм·м. По завершении испытаний удельное электрическое сопротивление трехслойного покрытия было в 4 раза больше двухслойного, что указывало на существенное увеличение защитной стойкости полиуретанового покрытия после нанесения третьего слоя.

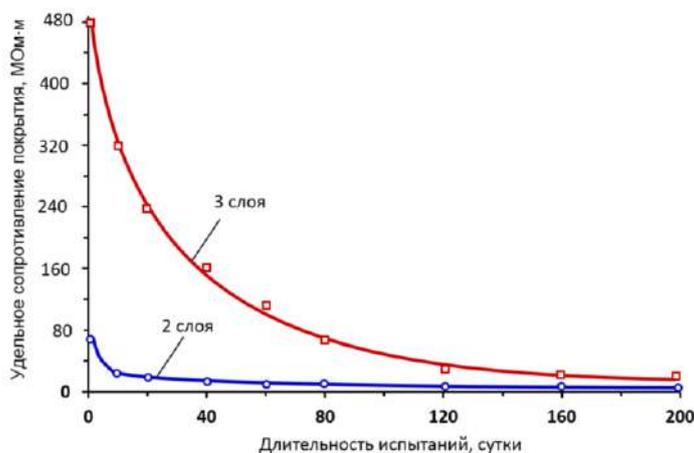


Рисунок 3 – Динамика изменения удельного электрического сопротивления двухкомпонентных полиуретановых покрытий Raptor при длительном воздействии раствора борофоски

Заключение. Техническая новизна разработанного измерительного устройства защищена патентом РФ на изобретение [15]. Устройство используется при выборе лакокрасочных покрытий для тукоразбрасывателей путем оценки их защитной стойкости по изменению удельного электрического сопротивления, определяемого в имитационных испытаниях покрытия под действием концентрированного раствора минерального удобрения.

Низковольтная токовая нагрузка на лакокрасочное покрытие от гальваноячейки, сопоставимая с параметрами электрохимических потенциалов конструкционных материалов тукоразбрасывателя, и отсутствие измерительных токовых импульсов обеспечат проведение длительных испытаний покрытия в условиях, близких к эксплуатационным. Как показали испытания [16], периодическое измерение параметров электрического тока с помощью предлагаемого комплекта не способно привести к деструктивным изменениям в материале покрытия и повлиять на его электрическую прочность и защитную стойкость.

Применение мультиметра в диапазоне измерения постоянного напряжения позволило использовать его высокоомное входное сопротивление в качестве эталонного нагрузочного сопротивления при выполнении измерений параметров электрического тока, проходящего через искомое сопротивление лакокрасочного покрытия. Благодаря применению мультиметра оптимизирована структурная схема разработанного устройства и обоснована расчетная зависимость для определения удельного электрического сопротивления лакокрасочного покрытия в растворе туковой смеси.

Введением трехпозиционного переключателя решена задача переключения электрических цепей при измерении опорного напряжения на электродах гальваноячейки, а также при измерении падения напряжения на электродах последовательно соединенных гальваноячейки и тестовой ячейки, имеющей лакокрасочное покрытие на стальной пластине.

Список источников

1. Лакокрасочные покрытия для защиты сельскохозяйственной техники от коррозии / Л.Г. Князева, А.И. Петрашев, А.В. Дорохов и др. // Наука в центральной России. 2022. № 1 (55). С. 118-134. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2022-1-118-134>.
2. Исследование противокоррозионной защиты тукообразбрасывающих машин / А.И. Петрашев, Л.Г. Князева, В.В. Клепиков, А.М. Губашева // Техника и оборудование для села. 2018. № 7. С. 38-42. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35303152> (дата обращения 25.07.2024)
3. Губашева А.М., Петрашев А.И. Антиккоррозионная защита тукообразбрасывающих машин / В сборнике: Актуальные вопросы электрохимии, экологии и защиты от коррозии. Тамбов: Издательство ИП Чеснокова А.В., 2019. С. 167-171. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42367993> (дата обращения 25.07.2024)
4. Петрашев А.И., Клепиков В.В., Губашева А.М. Обеспечение противокоррозионной защиты тукообразбрасывателей Amazone ZA-M900 при эксплуатации / В сборнике: Инфокоммуникационные и интеллектуальные технологии на транспорте ПТТ'2018. Липецк: Липецкий ГТУ, 2018. Т. 2. С. 141-148. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36566304> (дата обращения 25.07.2024)
5. ГОСТ 6572-91. Покрытия лакокрасочные тракторов и сельскохозяйственных машин. Общие технические требования. М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. 17 с.
6. Методы оценки противокоррозионной эффективности лакокрасочных покрытий / А. В. Сороков, С. Н. Степин, А. А. Каюмов и др. // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15. № 24. С. 68-75. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18345703> (дата обращения 25.07.2024).
7. ГОСТ 9.083-78 ЕСЗКС. Покрытия лакокрасочные. Методы ускоренных испытаний на долговечность в жидких агрессивных средах. М.: Издательство стандартов, 1989. 56 с.
8. ГОСТ Р 51164-98. Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии. М.: ИПК Издательство стандартов, 1998. 52 с.
9. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1986. 253 с.
10. Патент на изобретение RU 2792698, МПК G01R 27/02: Способ экспресс-оценки состояния защитных покрытий / А.В. Пчельников, А.П. Пичугин, А.П. Илясов, Р.В. Лучик, В.И. Пчельников. Заявка: 2022112676 от 05.05.2022, опубл. 23.03.2023.
11. Авторское свидетельство СССР № 1798730, МПК G01R 27/02: Способ определения удельного объемного электрического сопротивления лакокрасочного покрытия / В.С. Аксельрод, Б.В. Деркач, Е.В. Бакирова, Е.А. Белоус, К.Б. Щигловский. Заявка: 4851002 от 12.06.1990, опубл. 28.02.1993.
12. Авторское свидетельство СССР № 569907, МПК G 01N 15/08: Устройство для контроля пористости лакокрасочных покрытий на металлической основе / В.И. Беловайненко, В.И. Вертяев. Заявка: 2040714 от 02.07.1974, опубл. 25.08.1977.
13. Electrochemical Potentials [Электронный ресурс]. URL: <https://www.qsl.net/n9zia/electrochemical.html> (дата обращения 25.07.2024).
14. Патент на изобретение RU 2820040, МПК G01R 27/02: Устройство для определения удельного электрического сопротивления лакокрасочного покрытия в электролите / А.И. Петрашев. Заявка: 2024107141 от 14.03.2024, опубл. 28.05.2024.
15. Клепиков В.В. Исследование полиуретановых лакокрасочных покрытий / В сборнике: Аграрная наука - сельскому хозяйству. Барнаул: Алтайский ГАУ, 2024. Т. 2. С. 104-105. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=65355850>.

References

1. Knyazeva L.G., Petrashev A.I., Dorokhov A.V. et al. Paint and varnish coatings for protecting agricultural machinery from corrosion. *Nauka v central'noj Rossii = Science in central Russia*: 2022; 1 (55):118-134. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2022-1-118-134> (in Russ.)
2. Knyazeva L.G., Petrashev A.I., Klepikov V.V. et al. Research of anticorrosion protection of fertilizer spreaders. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela = Machinery and equipment for rural area*. 2018; (7):38-42. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35303152> (accessed 25.07.2024). (In Russ.)

3. Gubasheva A.M., Petrashev A.I. Anti-corrosion protection of fertilizer spreading machines. In the collection: Current issues of electrochemistry, ecology and corrosion protection. Tambov: Publishing house of IP Chesnokova A.V., 2019:167-171. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42367993> (accessed 25.07.2024). (In Russ.)
4. Petrashev A.I., Klepikov V.V., Gubasheva A.M. Ensuring anti-corrosion protection of Amazone ZA-M900 fertilizer spreaders during operation. In the collection: Infocommunication and intelligent technologies in transport ИТТ'2018. Lipetsk: Lipetsk STU, 2018. (2):141-148. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36566304> (accessed 25.07.2024). (In Russ.)
5. GOST 6572-91. Paint and varnish coatings for tractors and agricultural machinery. General technical requirements. M.: ИПК Publishing House of Standards, 2003. 17 p. (In Russ.)
6. Sorokov A.V., Stepin S.N., Kayumov A.A. et al. Methods for assessing the anticorrosive efficiency of paint and varnish coatings. Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of the Kazan Technological University. 2012; 15 (24):68-75. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18345703> (accessed 25.07.2024). (In Russ.)
7. GOST 9.083-78 ESZKS. Paint and varnish coatings. Methods of accelerated durability tests in liquid aggressive environments. M.: Publishing House of Standards, 1989. 56 p. (In Russ.)
8. GOST R 51164-98. Main steel pipelines. General requirements for corrosion protection. M.: IPC Publishing House of Standards, 1998. 52 p. (In Russ.)
9. Yutkin L.A. Electrohydraulic effect and its application in industry. L.: Mechanical Engineering, Leningrad Branch, 1986. 253 p.
10. Patent for invention RU 2792698, IPC G01R 27/02: Method for rapid assessment of the condition of protective coatings. Pchelnikov A.V., Pichugin A.P., Ilyasov A.P., Luchik R.V., Pchelnikov V.I. Application: 2022112676 dated 05.05.2022, published 23.03.2023. (In Russ.)
11. USSR Author's Certificate 1798730, IPC G01R 27/02: Method for Determining the Specific Volume Electrical Resistivity of a Paint and Varnish Coating. Akselrod V.S., Derkach B.V., Bakirova E.V., Belous E.A., Shchiglovsky K.B. Application: 4851002 dated 12.06.1990, published 28.02.1993. (In Russ.)
12. USSR Author's Certificate 569907, IPC G 01N 15/08: Device for Monitoring the Porosity of Paint and Varnish Coatings on a Metal Base. Belovaynenko V.I., Vertyaev V.I. Application: 2040714 dated 02.07.1974, published 25.08.1977. (In Russ.)
13. Electrochemical Potentials. Retrieved from <https://www.qsl.net/n9zia/electrochemical.html> (accessed 25.07.2024). (In Russ.)
14. Patent for invention RU 2820040, IPC G01R 27/02: Device for determining the specific electrical resistance of a paint and varnish coating in an electrolyte. Petrashev A.I. Application: 2024107141 dated 14.03.2024, published 28.05.2024.
15. Klepikov V.V. Research of polyurethane paint and varnish coatings. In the collection: Agricultural science - for agriculture. Barnaul: Altai SAU, 2024. (2):104-105. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=65355850> (accessed 25.07.2024). (In Russ.)

Информация об авторах

А.И. Петрашев - доктор технических наук.

Information about the authors

A. Petrashev - Doctor of Technical Sciences.

Поступила в редакцию (Received): 02.09.2024 Принята к публикации (Accepted): 12.10.2024