

## КОМПЛЕКСНЫЙ ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ КОНТРОЛЬ СПЛОШНОСТИ И НЕДОПУСТИМЫХ УТОНЕНИЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

© 2022 г. В.А. Сясько<sup>1,\*</sup>, Б.Я. Литвинов<sup>2,\*\*</sup>, А.С. Мусихин<sup>2,\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>ООО «КОНСТАНТА», Россия 198095 С.-Петербург, Огородный переулок, 21

<sup>2</sup>ФГУП ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, Россия 190005 С.-Петербург, Московский пр-т, 19

E-mail: \*9334343@gmail.com; \*\*sztul@mail.ru; \*\*\*musikhinaleksei@gmail.com

Поступила в редакцию 29.06.2022; после 15.07.2022

Принята к публикации 15.07.2022

В настоящее время основным методом выявления дефектов сплошности диэлектрических покрытий является электроискровой метод неразрушающего контроля (НК). Однако к большинству современных покрытий так же применяются требования по минимальной толщине покрытия. Представляется перспективным проведение допускового контроля толщины диэлектрических покрытий в одном технологическом процессе с контролем их сплошности за счет изменения существующих методик контроля и способа формирования испытательного напряжения.

Проведен теоретический и экспериментальный анализ процессов искрообразования, происходящих при обнаружении сквозных и несквозных дефектов диэлектрических покрытий на электропроводящих основаниях. Измерены и рассчитаны минимальные контрольные напряжения для исследуемых диэлектрических покрытий с учетом выявления как сквозных дефектов, так и недопустимых утонений. Предложено применение вероятностного подхода к обнаружению вышеописанных дефектов. Показано, что при известном значении электрической прочности покрытия можно с расчетной вероятностью обнаружить как сквозные, так и несквозные дефекты покрытий при заданном испытательном напряжении.

*Ключевые слова:* электрическая прочность, электроискровой контроль, пробивное напряжение, сплошность, покрытие, толщина.

DOI: 10.31857/S0130308222090056, EDN: BSFFSC

Проблема оценки технического состояния и продления срока службы диэлектрических антикоррозионных и гидроизоляционных покрытий имеет большое практическое значение, что подтверждается опытом эксплуатации различных типов промышленных металлических изделий, в том числе на объектах трубопроводной транспортной инфраструктуры.

Одним из основных требований к таким покрытиям является обеспечение стопроцентной сплошности покрытий [1—3]. Но при нарушении технологии нанесения покрытий и правил эксплуатации изделий в покрытиях могут возникать дефекты сплошности: непрокрасы, сквозные и несквозные поры, трещины, отрывы, проколы и т.д.

В большинстве случаев предполагается послойное нанесение диэлектрических покрытий. В случае нарушения технологии нанесения количество слоев покрытия может не соответствовать заявленному. Таким образом, существует актуальная задача контроля количества слоев конечной системы.

Большинство современных технологий контроля предполагают измерение конечной толщины покрытия приборами, которые проводят дискретные измерения в различных точках конструкций, например, электромагнитными толщиномерами. Однако осуществление непрерывного контроля толщины покрытия является нетривиальной технической задачей.

Одним из наиболее распространенных методов неразрушающего контроля (НК) сплошности диэлектрических покрытий является электроискровой, при котором для выявления дефектов между поверхностью покрытия и электропроводящим основанием формируется электрическое поле высокой напряженности  $E$ . За счет того, что дефектные участки покрытия имеют электрическую прочность меньшую, чем бездефектное покрытие, при соответствующей напряженности электрического поля в них формируется искровой разряд (рис. 1).

Современные [1—5] методики выбора испытательного напряжения  $U_{и}$ , прикладываемого с использованием электрода к поверхности покрытия, позволяют выявлять только сквозные дефекты покрытий. При этом не уделяется должного внимания связи толщины  $d_{п}$  контролируемых покрытий и их пробивного напряжения  $U_{пр}$  для задачи выявления недопустимо малой толщины и несквозных дефектов покрытий. В связи с этим актуальна разработка единой методики обнаружения не только нарушений сплошности покрытий, но и недопустимых утонений.

Так, в работах [6, 7] предлагается оценивать геометрические параметры сквозных дефектов покрытий по изменению электрического импеданса при возникновении в них коронного или искрового разрядов. Подобный подход мог бы быть применен и для оценки тока утечки через недопустимое утонение покрытия, однако метод, основанный на расчете и определении электри-

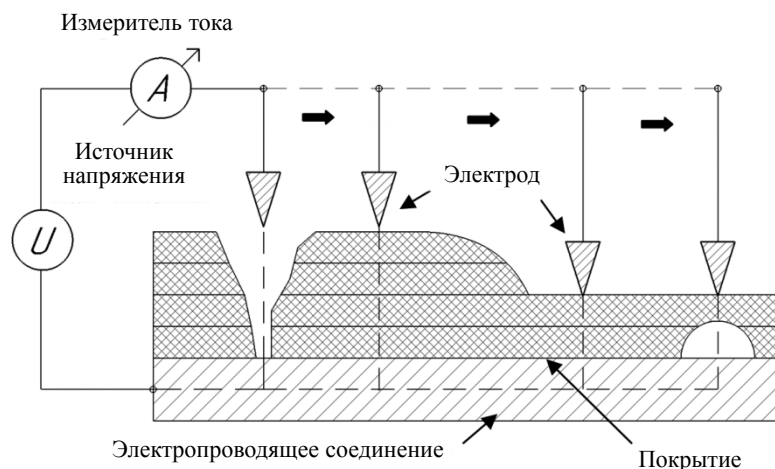


Рис. 1. Схематичное изображение принципа электроискрового контроля диэлектрических покрытий.

ческого сопротивления материала, не может быть применен к участкам покрытия, где происходят разрядные процессы [8].

Для рассматриваемой задачи сквозные дефекты диэлектрических покрытий представляют собой воздушные межэлектродные промежутки, для которых расчет пробивного напряжения воздушного промежутка  $U_{пв}$  для  $d_{п}$  от 5 мкм до 50 мм в однородном электрическом поле может быть осуществлен с использованием основных положений теории электрического пробоя Таунсенда [9, 10]. Согласно указанной теории, искровой разряд в газовой среде формируется за счет лавинного размножения свободных носителей заряда в межэлектродном промежутке и образования электропроводящего канала (стримера), формирование которого условно можно разделить на стадии формирования первичной и вторичных лавин. Для формирования первичной лавины носителей заряда (электронов) необходимо, чтобы свободные электроны, имеющиеся в газе, которым заполнен сквозной дефект покрытия, получали энергию от внешнего электрического поля, создаваемого в межэлектродном промежутке (между электродом и электропроводящим основанием), большую или равную энергии ионизации атомов газа на длине свободного пробега электрона. С учетом коэффициентов первичной ионизации  $\alpha$  и прилипания  $\eta$  можно определить общее число электронов в лавине, прошедшей расстояние  $\Delta d$  [11]:

$$n = n_0 \cdot e^{(\alpha - \eta) \cdot \Delta d}.$$

После прохождения первой лавины в межэлектродном промежутке лавинный процесс может возобновиться или затухнуть. Для возобновления лавинного процесса (организации самостоятельного разряда) необходим хотя бы один вторичный эффективный электрон, который может возникнуть, в том числе в результате прохождения первичной лавины, при увеличении  $U_{п}$ .

Основным положением теории является условие самостоятельности разряда в местах несплошности:

$$\gamma \cdot (e^{(\alpha - \eta) \cdot d_{п}} - 1) \geq 1, \quad (1)$$

где  $\gamma$  — коэффициент вторичной ионизации электронов;  $\alpha$  — коэффициент ударной ионизации;  $\eta$  — количество свободных электронов;  $d_{п}$  — толщина покрытия.

Ключевым элементом достоверного электроискрового НК является обеспечение условий самостоятельности искрового разряда в местах дефектов покрытия (в том числе нарушений их сплошности).

Зависимость (1) показывает, что в результате прохождения первичной лавины необходимо образование, как минимум, одного эффективного электрона, способного зажечь вторичную лавину.

При рассмотрении условия самостоятельности разряда в однородном поле (пробой всего межэлектродного промежутка) допустимо принять  $\eta = 0$  и привести выражение (1) к виду:

$$\gamma \cdot (e^{\alpha \cdot d_n} - 1) = 1. \quad (2)$$

Экспериментально установлено [10], что

$$\alpha = A_0 \cdot P \cdot e^{\frac{B_0 \cdot P}{E}}, \quad (3)$$

где  $E$  — напряженность однородного электрического поля в межэлектродном промежутке;  $A_0$  — коэффициент, зависящий от состава газа;  $B_0$  — коэффициент, зависящий от энергии ионизации газа;  $P$  — давление газа.

Из (2) и (3) следует:

$$\frac{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}{d_n} = A_0 \cdot P \cdot e^{\frac{B_0 \cdot P}{E}}. \quad (4)$$

Как известно [12], для однородного поля  $E = U_{\text{нв}}/d_n$ , поэтому подставим это выражение в (4):

$$\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) = A_0 \cdot P \cdot d_n \cdot e^{\frac{B_0 \cdot P \cdot d_n}{U_{\text{нв}}}}. \quad (5)$$

Прологарифмировав (5), получим:

$$\frac{B_0 \cdot P \cdot d_n}{U_{\text{нв}}} = \ln \frac{A_0 \cdot P \cdot d_n}{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}. \quad (6)$$

Поскольку нас интересует  $U_{\text{нв}}$ , то для его определения (6) преобразуем к виду:

$$U_{\text{нв}} = \frac{B_0 \cdot P \cdot d_n}{\ln \frac{A_0 \cdot P \cdot d_n}{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}}. \quad (7)$$

Из (7) следует, что при неизменной внешней температуре воздуха в однородном поле  $U_{\text{нв}} = f(P \cdot d_n)$ , а при квазипостоянном атмосферном давлении —  $U_{\text{нв}} = f(d_n)$  (рис. 2).

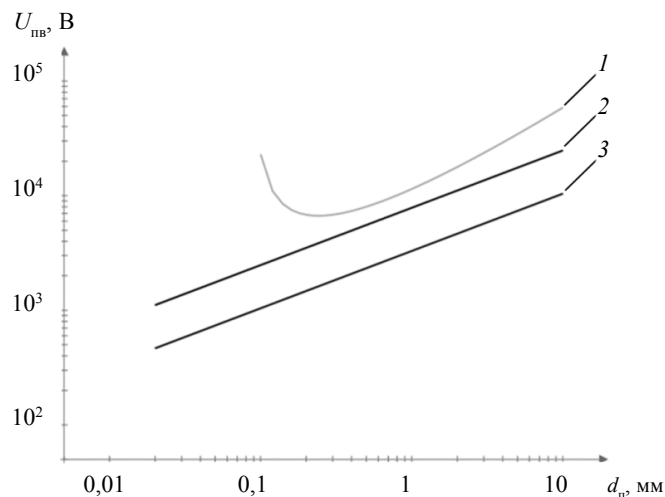


Рис. 2. Расчетные значения  $U_{\text{нв}}$ :  
 1 —  $U_{\text{нв}}(d_n)$  по формуле (7) для атмосферного воздуха при нормальных условиях; 2 —  $U_{\text{нв}}(d_n)$  по формуле (8) для  $d_n > 1$  мм; 3 —  $U_{\text{нв}}(d_n)$  по формуле (8) для  $d_n < 1$  мм.

В то же время стандартизованные методики определения испытательного напряжения, учитывающие неоднородности электрического поля в процессе контроля, предлагают расчет  $U_n$  на основе эмпирической зависимости [2, 3] (см. рис. 2):

$$U_n = M \cdot \sqrt{d_n}, \quad (8)$$

где  $M$  — постоянный эмпирический коэффициент, зависящий от  $d_n$  ( $M = 3294$  для покрытий толщиной  $d_n < 1$  мм и  $M = 7843$  для  $d_n > 1$  мм).

Как видно из рис. 2, стандартизованные методики расчета испытательного напряжения предназначены исключительно для выявления сквозных дефектов покрытия. Для выявления недопустимых утонений покрытий электроискровым методом необходимо рассмотреть процессы пробоя твердых диэлектриков.

Электрическую прочность диэлектриков можно рассчитать в зависимости от их структуры и энергетических характеристик материала [15].

В [13] предлагается эмпирическая зависимость пробивного напряжения покрытия  $U_{пр}$  для широкого ряда диэлектрических покрытий:

$$U_{пр} = \frac{K}{d_n} \cdot K_B \cdot (A_c^0)^{1,1} \cdot \exp\left(\frac{a}{b + \lg(b)} + \frac{m}{n + \lg(\tau)}\right), \quad (9)$$

где  $K$  — коэффициент пропорциональности, зависящий от  $d_n$ ;  $\tau$  — длительность воздействия приложенного напряжения;  $K_B$  — вероятность пробоя;  $A_c^0$  — энергия каналаобразования;  $a$ ,  $b$ ,  $n$ ,  $m$  — некоторые постоянные, зависящие от состава диэлектрика.

Полученная формула может применяться при расчетах электрической прочности диэлектриков толщиной от 0,01 до 40 мм при длительности импульса приложенного напряжения  $\tau = 0,1$ —10 мкс.

В табл. 1 приведены значения  $U_{пр}$  для ряда твердых диэлектриков, полученные экспериментально и вычисленные по вышеприведенным формулам для образцов толщиной  $d_n = 0,1$  мм [14].

Таблица 1

Расчетные и экспериментальные значения электрической прочности  $U_{пр}$  для диэлектрических материалов толщиной  $d = 0,1$  мм

Материал покрытия	$U_{пр}$ , кВ	
	Экспериментальные значения	Расчетные значения
Полиэтилен	6,75—7	6,2
Полистирол	5,5—7,3	4,3
Фторопласт-4	3,5	4

Оценка  $U_{пр}$  по (9) возможна для однокомпонентных одно- или многослойных покрытий, параметры которых можно найти в справочной литературе, например, антикоррозионных покрытий трубопроводов. Вместе с тем следует учесть, что требуемые для расчета параметры многокомпонентных покрытий (например, лакокрасочных), как правило, не нормируются. Поэтому  $U_{пр}$  многокомпонентных покрытий или покрытий, для которых  $U_{пр}$  не удастся определить расчетным путем, можно определить экспериментально. Для экспериментального определения  $U_{пр}$  предлагается использовать покрытие, идентичное или близкое контролируемому по составу и толщине, нанесенное на металлическое основание.

В качестве примера приведены результаты эксперимента по определению  $U_{пр}$ , в котором в качестве оснований использовались листы фольгированного текстолита и алюминия, на которые было нанесено лакокрасочное покрытие (ЛКП) — эмаль MLS 306.

После изготовления образцов (нанесения трех, шести и девяти слоев покрытия на поверхность основания) была замерена толщина в контрольных точках, в которых определялось пробивное напряжение. Прикладываемое напряжение увеличивалось до пробоя покрытия, фиксировалось значение  $U_{пр}$  с использованием осциллографа DSO-X 2002A. В результате была получена зависимость  $U_{пр}(d_n)$ , представленная на рис. 3.

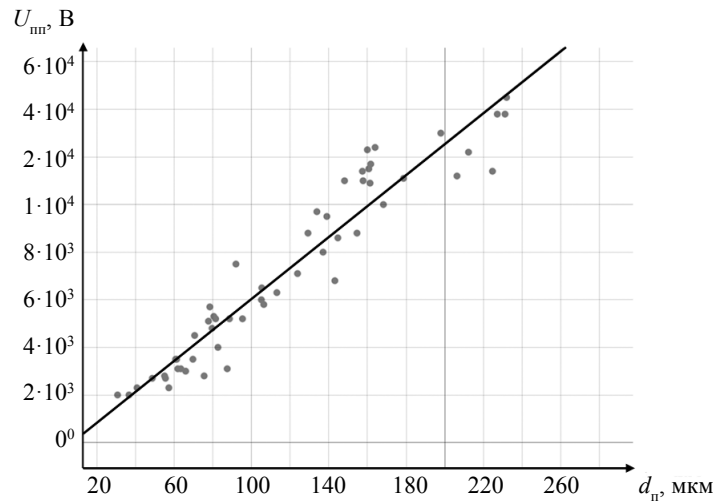


Рис. 3. Зависимость пробивного напряжения покрытий  $U_{\text{пп}}$  от толщины покрытия  $d_{\text{п}}$ .

Как видно из рис. 3, полученные значения  $U_{\text{пп}}$  имеют достаточно большой разброс. Предположительно это связано с формированием разряда в точке с наименьшей толщиной покрытия и некоторым разбросом параметров покрытия [16, 17]. По этой причине требуется проведение оценки вероятности выявления недопустимых утонений покрытия в зависимости от  $U_{\text{и}}$  и  $d_{\text{п}}$ .

Для этого был применен алгоритм, основанный на построении линии регрессии зависимости  $U_{\text{пп}}(d_{\text{п}})$  и построении на ее основе нормальных функций распределения с заданными параметрами [18, 19].

На исследуемом участке зависимость  $U_{\text{пп}}(d_{\text{п}})$  имеет квазилинейный вид. Следовательно, по полученным экспериментальным данным была построена линейная регрессия вида  $U = k \cdot d + b$ , для которой была построена функция нормального (гауссовского) распределения вероятности формирования искрового разряда от величины  $U_{\text{и}}$  (см. рис. 3):

$$P(U_{\text{и}}) = \frac{1}{\sqrt{2\sigma}} \int_{-\infty}^{U_{\text{и}}} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt,$$

где  $d_{\text{п}}$  — толщина покрытия;  $U_{\text{и}}$  — испытательное напряжение;  $k, b$  — параметры линии регрессии;  $\mu$  — математическое ожидание;  $\sigma$  — СКО.

Границы доверительного интервала  $P(U_{\text{и}})$  для регрессионной модели (см. рис. 3) в соответствии с [20]:

$$P_{\pm}(U_{\text{и}}) = P(U_{\text{и}}) \pm t_p \sqrt{D} \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(\ln U_{\text{и}} - \bar{U}_{\text{и}})^2}{\sum_{i=1}^n (\ln U_{\text{и}i} - \bar{U}_{\text{и}})^2}},$$

где  $n$  — количество измерений;  $t_p$  — коэффициент Стьюдента для доверительной вероятности 95 % и  $(n-2)$ -степеней свободы;  $D$  — дисперсия значений пробивного напряжения.

График зависимости вероятности обнаружения дефекта  $P(U_{\text{пп}})$  характеризует достоверность НК. На графике, являющемся сигмовидной функцией, представлены границы интервала с заданной доверительной вероятностью (показаны пунктиром). Очевидно, что с увеличением  $d_{\text{п}}$  характеристика  $P(U_{\text{пп}})$  сдвигается вправо. Так же при проведении допускового контроля покрытия (выявления мест недопустимого утонения) рекомендуется строить зависимость  $P(U_{\text{пп}})$  для доверительной вероятности выявления дефекта 0,9 (90 %). Следовательно, можно определить электрическую прочность покрытия  $E_{\text{п}}$  для вероятности обнаружения дефекта, равной 90 % для каждой исследованной толщины покрытия (рис. 5).

Данные эксперимента показывают, что расчетное значение  $E_{\text{п}}$  в указанном диапазоне толщин составляет  $75,4 \pm 8,2$  кВ. С учетом того, что электрическая прочность практически постоянна в

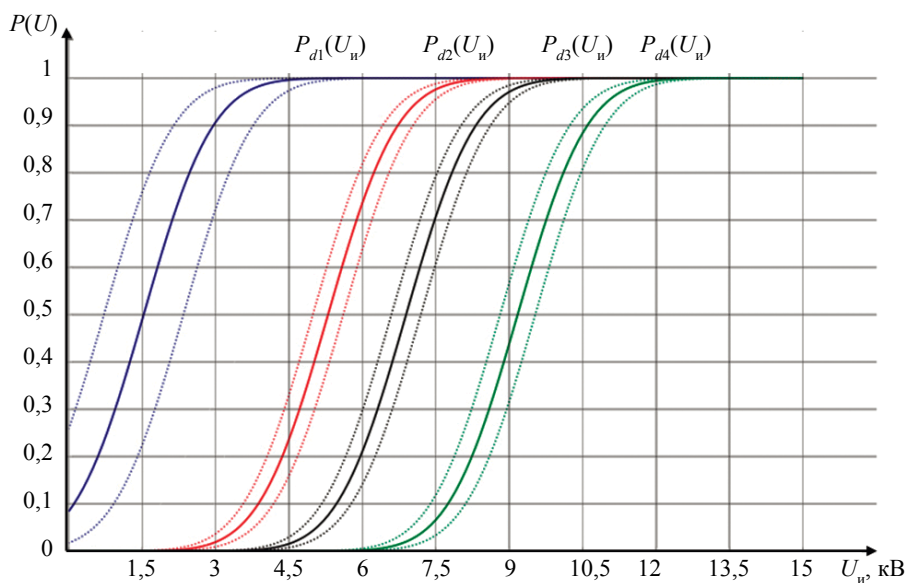


Рис. 4. Распределение вероятности пробоя покрытия в зависимости от приложенного напряжения для  $d_1 = 38$  мкм,  $d_2 = 89$  мкм,  $d_3 = 113$ ,  $d_4 = 148$  мкм.

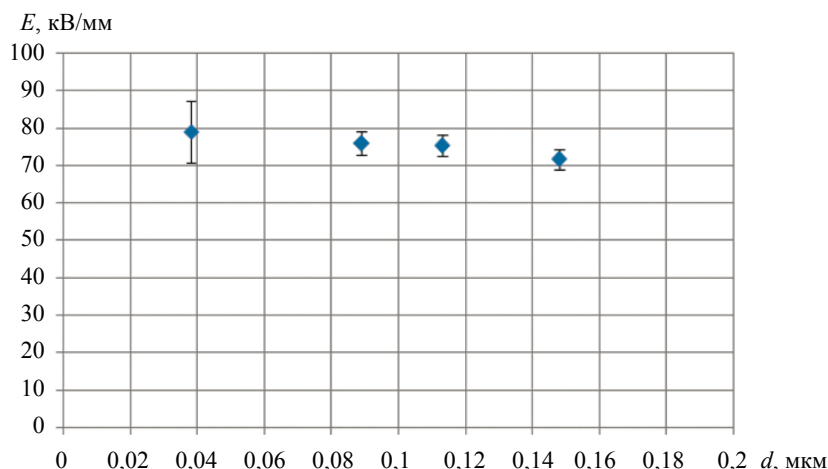


Рис. 5. Зависимость электрической прочности покрытия  $E_n$  от его толщины для исследуемых образцов.

указанном диапазоне толщин, вероятность выявления дефекта заданной толщины (исходя из электрической прочности покрытия) составит 0,8 (80 %).

Таким образом, при известном значении электрической прочности покрытия (рассчитанном или определенном экспериментально) можно с заданной вероятностью выявлять недопустимые утонения, производя контроль испытательным напряжением, величина которого равна  $U_n = E_n / d_n$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен теоретический и экспериментальный анализ процессов искрообразования применительно к задачам выявления сквозных и несквозных дефектов диэлектрических покрытий на электропроводящих основаниях. Рассчитаны минимальные испытательные напряжения для сквозных дефектов покрытий и показана невозможность использования существующих методик НК для выявления несквозных дефектов покрытий. Измерены и рассчитаны минимальные контрольные напряжения исследуемых диэлектрических покрытий с учетом необходимости выявле-

ния как сквозных дефектов, так и недопустимых утонений. Предложено применение вероятностного подхода при обнаружении описанных дефектов. Показано, что при известном значении электрической прочности покрытия можно с расчетной вероятностью обнаружить как сквозные, так и несквозные дефекты покрытий при заданном испытательном напряжении.

Полученные результаты позволяют разработать методику проведения испытаний, которая расширяет диапазон применимости метода и повышает достоверность результатов контроля.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р51164—98 Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии. М.: Изд-во стандартов, 1998. 46 с.
2. ГОСТ 34395—2018 Материалы лакокрасочные. Электроискровой метод контроля сплошности диэлектрических покрытий на токопроводящих основаниях. М.: ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2018. 11 с.
3. ASTM G62 — 14/Standard Test Methods for Holiday Detection in Pipeline Coatings.
4. *Ерехинский Б.А., Пахомов А.В.* Современные технологии диагностики объектов добычи газа и газового конденсата. Применяемая техника и оборудование. Воронеж: АО «Воронежская областная типография», 2017. 374с.
5. M. A. S. Davies Holiday detection: what is the correct test voltage? // *Anti-Corrosion Methods and Materials*. 1983. No. 12. P. 4—12. ISSN: 0003-5599.
6. *Гаджиев Я.М., Ибрагимова Э.Н.* Экспериментальное исследование измерения размеров трещин силикатно-эмалевых покрытий трубы // *Дефектоскопия*. 2020. № 1. С. 61—65.
7. *Ибрагимов Н.Ю., Ибрагимова Э.Н.* Дефектоскопическая установка трещиномер силикатных покрытий труб // *Дефектоскопия*. 2017. № 11. С. 55—57.
8. Неразрушающий контроль. Электрический контроль / *Справочник в 7 т. Под общ. ред. В.В. Ключева*. М.: Машиностроение, 2004. 679 с.
9. *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда / *Учебное руководство*. 2-е изд. М.: Наука, 1992. 536 с.
10. *Тренькин А.А., Алмазова К.И., Белоногов А.Н., Боровков В.В., Горелов Е.В., Морозов И.В., Харитонов С.Ю.* Исследования начальной фазы искрового разряда в воздухе в промежутке острие (катод)—плоскость методом лазерного зондирования // *Журнал технической физики*. 2020. Т. 90. № 12.
11. *Смирнов А.С.* Прикладная физика. Физика газового разряда / *Учеб. пособие*. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1997. 68 с.
12. *Мик Дж., Крэгс Дж.* Электрический пробой в газах / *Перевод с англ.* М.: Изд-во иностранной лит-ры, 1960. 605 с.
13. *Важов В.Ф., Лавринович В.А., Лопаткин С.А.* Техника высоких напряжений / *Курс лекций*. Томск: Изд-во ТПУ, 2006. 119 с.
14. *Воробьев Г.А., Похолков Ю.П., Королев Ю.Д.* Физика диэлектриков (область сильных полей) / *Учебное пособие и др.* Томск: Изд-во ТПУ, 2003. 244 с.
15. *Григорьев А.Н., Павленко А.В., Ильин А.П., Карнаухов Е.И.* Электрический разряд по поверхности твердого диэлектрика. Ч. 1. Особенности развития и существования поверхностного разряда // *Известия ТПУ*. 2006. № 1. С. 66—69.
16. *Старикова Н.С., Редько В.В.* Исследование методов контроля целостности изоляции в области слабых и сильных электрических полей [Электронный ресурс] // *Вестник науки Сибири*. 2013. № 3 (9). С. 55—59.
17. *Галева Н.С.* Повышение информативности контроля кабельных изделий на основе комплексного использования электроискрового и электроемкостного методов. 05.11.13 / *Дисс. ... на соискание ученой степени канд. наук*. ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», 2017. 143 с.
18. *Чертисцев В.Ю.* Оценка вероятности обнаружения дефектов акустическими методами в зависимости от их размера в конструкциях из ПКМ для выходных данных контроля в виде бинарных величин // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 3 (52). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-65-79
19. *Бойчук А.С., Генералов А.С., Далин М.А., Степанов А.В.* Вероятностная оценка достоверности результатов ультразвукового неразрушающего контроля конструкций из ПКМ, применяемых в авиационной промышленности // *Ремонт. Восстановление. Модернизация*. 2013. № 9. С. 36—39.
20. *Лебедев А.М.* Исследование достоверности допускового контроля // *Научный вестник МГТУ ГА*. 2005. Т. 86. № 4. С. 65—70.