

УДК 620.179.1.082.705
DOI

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО МЕТОДА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ



В. А. Сясько,
д-р техн. наук,
ООО «КОНСТАНТА»,
Санкт-Петербург, Россия.
E-mail: 9334343@gmail.com



С. С. Голубев,
канд. техн. наук,
Федеральное агентство
по техническому
регулированию и метрологии
«РОССТАНДАРТ»,
Москва, Россия.
E-mail: golubev@gost.ru



А. С. Мусихин,
ООО «КОНСТАНТА»,
Санкт-Петербург, Россия.
E-mail: musihinaleksei@
mail.ru

Электроискровой метод неразрушающего контроля защитных диэлектрических покрытий применяется практически во всех отраслях производства и регулируется стандартами ГОСТ, ISO, ASTM и т.д. Однако стандарты не уделяют должного внимания вопросам формирования высокого напряжения (постоянное или переменное), его полярности относительно контрольного электрода, влиянию окружающей среды и неоднородности электрического поля. Выполнен подробный анализ процессов формирования пробоя воздушного зазора дефектного участка покрытия и зависимости напряженности электрического поля от длины межэлектродного промежутка для однородных и сильнонеоднородных электрических полей. Показано, что напряжение пробоя воздушных зазоров в сильнонеоднородном электрическом поле значительно меньше, чем в однородном. Также показано, что напряжение пробоя воздушных зазоров при положительной полярности контрольного электрода меньше, чем при отрицательной полярности. Обоснована возможность контроля покрытий минимальной толщиной до 50 мкм при одновременном уменьшении контрольного напряжения без снижения достоверности результатов.

Ключевые слова: электроискровой метод, сплошность, покрытие, напряженность электрического поля, полярность, пробивное напряжение.

V. A. Syasko

(Constanta LTD, St. Petersburg, Russia);

S. S. Golubev

(Federal Agency on Technical Regulating and Metrology ROSSTANDART, Moscow, Russia);

A. S. Musikhin

(Constanta LTD, St. Petersburg, Russia)

THE IMPROVEMENT OF THE HIGH VOLTAGE TESTING METHOD

The high voltage spark testing method of protective dielectric coatings is applied in almost all manufacture areas and is governed by ISO, ASTM etc. However, all of it doesn't pay proper attention to high voltage forming (DC or AC) and its polarity relative to electrode, influence of environment and electric field inhomogeneity. In that paper a detailed analysis of air gap breakdown forming processes was given. A dependence of electric field strength on an interelectrode gap length was given for homogeneous and highly inhomogeneous electric fields. It was shown a breakdown voltage of air gaps in highly inhomogeneous field is greatly less than in homogeneous field. Also, it is described the breakdown voltage of air gaps with positive polarity is less than with negative polarity. The possibility coatings testing with a minimum thickness up to 50 μm while reducing the testing voltage without reducing the reliability of the results is shown.

Keywords: high voltage method, continuity, coating, electrical strength, polarity, breakdown voltage.

Статья поступила в редакцию 17.09.2019

Received 17.09.2019

Для соответствия постоянно возрастающему уровню технологического развития современная промышленность нуждается в наличии широкой номенклатуры функциональных диэлектрических покры-

тий, которые придают обрабатываемой поверхности металлических изделий гидроизоляционные, антикоррозионные, диэлектрические или другие специальные свойства. Нарушение процессов нанесения



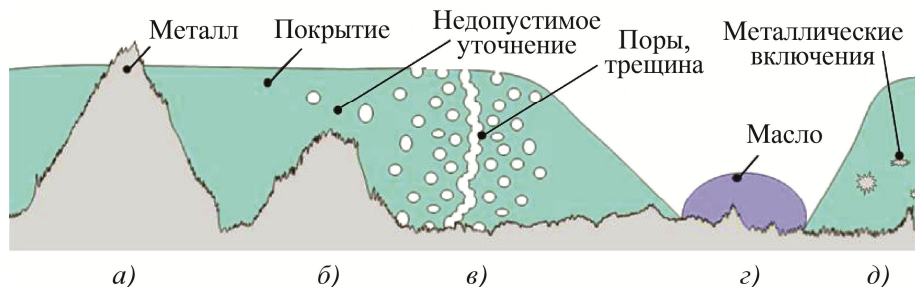


Рис. 1. Схематичное изображение возможных дефектов покрытия:

а, г – отсутствие покрытия; *б* – недопустимое утонение; *в* – сквозная пора или трещина; *д* – металлические включения

покрытий и правил эксплуатации изделий может приводить к образованию дефектов структуры, ухудшающих параметры функциональных покрытий [1, 2].

Дефекты, влияющие на функциональные параметры диэлектрических покрытий, можно условно разделить на четыре группы (рис. 1):

- дефекты, нарушающие сплошность покрытия (поры, трещины, сколы и т.д.);
- дефекты, нарушающие однородность покрытия по толщине (толщина покрытия меньше допустимого уровня);
- дефекты, нарушающие однородность покрытия по объему (инородные металлические или воздушные включения);
- дефекты, нарушающие другие функциональные свойства покрытия (несоответствие электрической прочности E покрытия предъявляемым требованиям).

В рамках данной статьи наибольший интерес представляют сквозные дефекты, нарушающие сплошность покрытия.

Постоянно повышающиеся требования к функциональным покрытиям [3 – 5] предписывают проводить сплошной контроль покрытий в целях выявления названных дефектов. В настоящее время отечественные и зарубежные стандарты [4 – 10] регламентируют использование различных методов выявления таких дефектов: электроискровой метод неразрушающего контроля (НК), электролитический метод НК, метод визуального определения дефектов, метод электровекторного картирования. Из всех перечисленных методов электроискровой метод НК обладает наибольшей производительностью [11], особенно для изделий большой площади или протяженных объектов, и применяется во многих отраслях промышленности.

Электроискровой метод НК (рис. 2) предполагает создание между электродом и проводящим основанием электрического поля, напряженность E которого достаточна для образования искрового пробоя дефектных участков покрытия (например, воздушных промежутков в местах нарушения сплошности). Протекающий при искровом пробое

электрический ток I регистрируется прибором, который в свою очередь информирует оператора о наличии дефекта посредством звуковой и световой сигнализации [12].

До настоящего времени применительно к электроискровому методу НК практически не исследовались зависимость электрической прочности воздушного промежутка от его величины, влияние ряда геометрических и электрофизических параметров электродов на чувствительность и достоверность контроля (вероятность выявления дефектов покрытия). Стандарты не уделяют должного внимания вопросам формирования контрольного напряжения U (постоянного или импульсного), полярности его приложения, влиянию неоднородности электрического поля на величину необходимого контрольного напряжения, чем значительно ограничивают применение данного метода. Предполагается, что учет нижеописанных факторов, определяющих характер и протекание процессов электроискрового пробоя дефектных участков покрытия, позволит проводить электроискровой НК покрытий с толщиной изоляции d от 50 мкм до 25 мм с большей достоверностью.

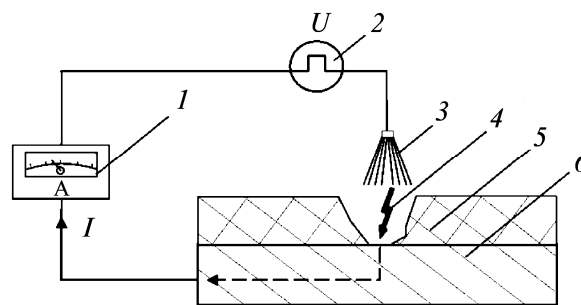


Рис. 2. Принцип действия электроискрового метода НК:

1 – схема фиксации тока искрового пробоя и сигнализации; *2* – источник высокого напряжения; *3* – электрод; *4* – искровой пробой воздушного промежутка (дефектного участка покрытия); *5* – диэлектрическое покрытие; *6* – электропроводящее основание

**Процессы, приводящие к образованию
искрового пробоя воздушных промежутков
при электроискровом НК**

Механизм формирования искрового разряда для воздушных (разрядных) межэлектродных промежутков $d_{п}$ величиной от 5 мкм до 50 мм объясняется таунсендовской теорией электрического пробоя газов [13]. Если в газе между двумя электродами, создающими электрическое поле, появляется свободный электрон, то, двигаясь к аноду при достаточной напряженности электрического поля, он может ионизировать атом или молекулу газа при столкновении. В результате этого появляется новый электрон и положительный ион. Новый электрон вместе с начальным ионизируют новые атомы и молекулы, и число свободных электронов непрерывно нарастает, возникает лавина электронов. Согласно указанной теории из электронных лавин (рис. 3), возникающих в электрическом поле разрядного промежутка, образуется стример (рис. 5) – светящийся тонкий разветвленный проводящий канал, который содержит ионизированные атомы газа и отщепленные от них свободные электроны. Стример, удлиняясь, перекрывает разрядный промежуток и соединяет электроды, формируя искровой разряд.

Интенсивность размножения электронов в лавине характеризуется коэффициентом ударной ионизации α , равным числу ионизаций, производимых электроном на пути в 1 см по направлению действия электрического поля.

При подробном анализе протекающих процессов следует учитывать, что при развитии лавины одновременно с электронами образуются положительные ионы, подвижность которых значительно меньше, чем электронов, и за время развития лавины они практически не успевают переместиться в промежутке к катоду. Таким образом, после прохождения лавины электронов в межэлектродном промежутке остаются положительные ионы, которые искажают электрическое поле (уменьшают или увеличивают его напряженность). На рис. 3 приведено распределение напряженности E электрического поля в межэлектродном промежутке длиной $d_{п}$ при прохождении его лавиной электронов. Видно, что величина E на фронте лавины возрастает, в то время как в средней части, где находятся остающиеся положительные ионы, уменьшается, а вблизи катода вновь незначительно увеличивается [14].

Как правило, появление первичных свободных электронов при самостоятельном разряде вызвано актами поверхностной ионизации из катода или фотоионизацией атомов воздуха. Предположим, что из катода за счет внешнего ионизатора вырывается n_0 электронов (например, $n_0 = 1$). На расстоянии x от катода число электронов возросло до n (рис. 4).

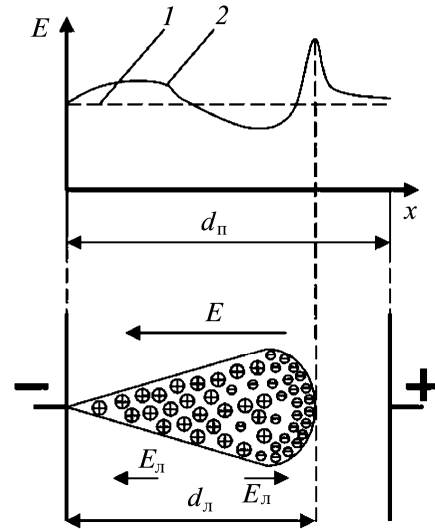


Рис. 3. Искажение электрического поля в межэлектродном промежутке при возникновении лавины электронов:

1 – средняя напряженность поля в отсутствии лавины; 2 – результирующая напряженность; $E_{л}$ – напряженность электрического поля, создаваемого лавиной

Увеличение числа электронов dn на пути dx будет равно

$$dn = n\alpha dx, \tag{1}$$

или

$$\frac{dn}{n} = \alpha dx. \tag{2}$$

Проинтегрировав правую и левую части равенства (2) по соответствующим переменным, получим

$$\ln(n) = \alpha x, \tag{3}$$

или

$$n = e^{\alpha x}. \tag{4}$$

Выражение (4) определяет общее число электронов в лавине без учета их прилипания, описанного в работе [15], к нейтральным атомам и моле-

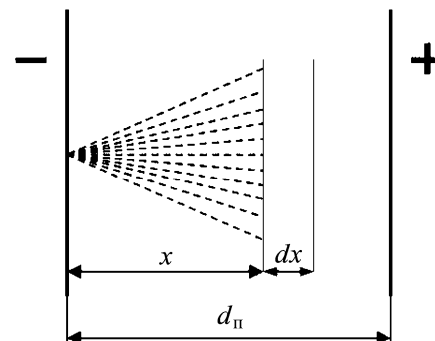


Рис. 4. Схема лавинообразного процесса нарастания электронов в однородном электрическом поле (пояснение к определению числа электронов в лавине)

кулам. Явление прилипания характеризуется коэффициентом прилипания η , равным числу электронов, связывающихся с нейтральными атомами на пути в 1 см по направлению действия электрического поля. В данном случае число электронов в лавине с учетом прилипания будет равно

$$n = n_0 e^{(\alpha - \eta)x}. \quad (5)$$

Ключевым элементом достоверного электроискрового НК является обеспечение условий самостоятельности искрового разряда в местах дефектов покрытия (например, нарушения их сплошности). После прохождения первой лавины в 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 приложенного к электродам напряжения.

При самостоятельной форме разряда лавинный процесс возобновляется, поскольку сама первичная лавина (и последующие вторичные) создает условия для возобновления процесса, к которым следует отнести следующие:

- оставшиеся после прохождения лавины положительные ионы, двигаясь к катоду, бомбардируют его и вызывают эмиссию электронов из катода;

- возбужденные атомы и молекулы, образующиеся наряду с ионизацией, испускают фотоны, которые могут приводить как к фотоионизации в объеме промежутка, так и к фотоэмиссии электронов из катода. Образующиеся таким образом вторичные электроны приводят снова к образованию лавин в разрядном промежутке;

- количество положительных ионов n_u^+ , оставшихся в межэлектродном промежутке после прохождения лавины, равно количеству электронов в лавине (5), исключая начальный электрон, т.е.

$$n_u^+ = n_0 e^{(\alpha - \eta)d_n} - 1. \quad (6)$$

Однако следует учитывать, что не все электроны, выбитые из катода, будут участвовать в образовании вторичных лавин. Часть электронов рекомбинирует с положительными ионами. В общем случае суммарный процесс образования вторичных электронов из катода характеризуется коэффициентом вторичной ионизации γ , который зависит от материала катода, состава и давления газа, при этом $\gamma \ll 1$. Количество вторичных электронов, образованных после прохождения первичной лавины при самостоятельной форме разряда, должно удовлетворять условию

$$\gamma (e^{(\alpha - \eta)d_n} - 1) \geq 1, \quad (7)$$

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

Как было указано выше, в процессе развития лавины непрерывно увеличивается число электронов и положительных ионов. С увеличением числа электронов в головке лавины возрастает напряженность поля на фронте лавины, одновременно в хвосте лавины напряженность поля понижается. Это приводит к тому, что электроны в головке лавины останавливаются и могут рекомбинировать с ионами, излучая фотоны, которые в свою очередь способны вблизи хвоста первичной лавины ионизовать нейтральные молекулы, образуя вторичные лавины.

Вторичные лавины, следуя по силовым линиям и имея на головке избыточный отрицательный заряд, втягиваются в область положительного объемного заряда, оставленного первичной лавиной. Электроны вторичных лавин смешиваются с положительными ионами первичной лавины и образуют стример – область с наибольшей плотностью тока, которая, разогреваясь, начинает светиться. Наибольшая концентрация частиц (плотность тока) формируется вблизи катода. Для фотоионизации в объеме газа энергия фотонов должна быть больше энергии ионизации. Этот процесс успешно осуществляется в воздухе, содержащем компоненты с относительно низкой энергией ионизации.

Расчеты, выполненные в работе [15], показывают, что лавина переходит в стример при критическом числе электронов $n_{кр} > 10^7 \dots 10^9$. Для накопления такого количества электронов лавина должна пройти некое критическое расстояние $x_{кр}$. Следовательно, с увеличением расстояния между электродами свыше $x_{кр}$ лавина неизбежно перейдет в стримерную форму развития разряда. Необходимо отметить, что $x_{кр}$ также зависит от давления воздуха и его процентного состава. Картина образования

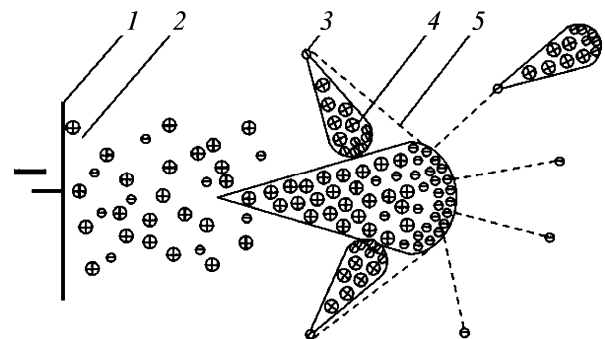


Рис. 5. Механизм развития катодного стримера:
1 – катод; 2 – канал стримера; 3 – электрон фотоионизации; 4 – лавина электронов; 5 – траектория движения фотонов

стримера приведена на рис. 5.

При рассмотрении условия самостоятельности разряда в однородном поле (пробой всего межэлектродного промежутка) допустимо принять $\eta = 0$ и привести выражение (8) к виду

$$\gamma(e^{\alpha d_{\text{п}}} - 1) = 1. \quad (8)$$

Из формулы (8) следует

$$\alpha = \frac{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}{d_{\text{п}}}. \quad (9)$$

В работе [16] экспериментально установлено, что

$$\alpha = A_0 p e^{-\frac{B_0 p}{E}}, \quad (10)$$

где p – давление газа; E – напряженность электрического поля; A_0 – коэффициент, зависящий от состава газа; B_0 – коэффициент, зависящий от энергии ионизации газа.

Приравняем выражения (9) и (10) для α :

$$\frac{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}{d_{\text{п}}} = A_0 p e^{-\frac{B_0 p}{E}}. \quad (11)$$

Как известно, для однородного поля $E = U/d_{\text{п}}$. Подставив это выражение в уравнение (11), получим

$$\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) = A_0 p d_{\text{п}} e^{-\frac{B_0 p d_{\text{п}}}{U}}, \quad (12)$$

или

$$e^{\frac{B_0 p d_{\text{п}}}{U}} = \frac{A_0 p d_{\text{п}}}{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}. \quad (13)$$

Прологарифмируем формулу (13):

$$\frac{B_0 p d_{\text{п}}}{U} = \ln \frac{A_0 p d_{\text{п}}}{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}. \quad (14)$$

Поскольку нас интересует пробивное (разрядное) напряжение $U_{\text{пр}}$, то для его определения выражение (14) следует преобразовать к виду

$$U_{\text{пр}} = \frac{B_0 p d_{\text{п}}}{\ln \frac{A_0 p d_{\text{п}}}{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}}. \quad (15)$$

Из формулы (15) следует, что при неизменной внешней температуре величина $U_{\text{пр}}$ в однородном поле является нелинейной функцией произведения давления воздуха p на величину межэлектродного промежутка $d_{\text{п}}$, т.е. $U_{\text{пр}} = f(p d_{\text{п}})$.

В свою очередь электрическая прочность воздушного промежутка $E_{\text{пр}} = U_{\text{пр}}/d_{\text{п}}$, определяемая при нормальном атмосферном давлении, равна

$$E_{\text{пр}} = \frac{B_0 p}{\ln \frac{A_0 p d_{\text{п}}}{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}}. \quad (16)$$

Графически эта зависимость представлена на рис. 6.

При $d = \text{const}$ увеличение давления p больше некоторого минимального значения приводит к росту числа столкновений электронов с нейтральными атомами и молекулами и, как следствие, к уменьшению их энергии, накапливаемой на длине свободного пробега. Следовательно, для возникновения ударной ионизации

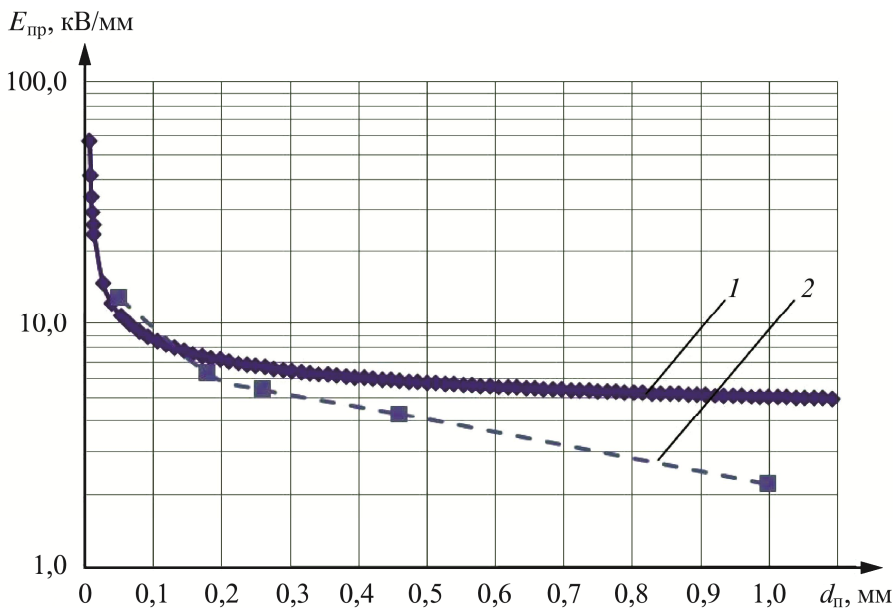


Рис. 6. Зависимости электрической прочности воздуха от расстояния между электродами:

1 – расчетная для системы плоских электродов; 2 – экспериментальная для системы цилиндрический электрод диаметром 0,6 мм – плоскость

ции (пробоя воздушного промежутка) необходимо увеличивать величину контрольного напряжения U . С другой стороны, при давлениях, меньших, чем некое минимальное значение, увеличиваются длина свободного пробега электронов и накапливаемая ими энергия, но при этом уменьшается количество столкновений, что в свою очередь уменьшает вероятность ударной ионизации. Для увеличения вероятности ударной ионизации необходимо, чтобы как можно большее число столкновений заканчивалось ионизацией. Для этого необходимо увеличивать энергию электронов на длине свободного пробега, т.е. увеличивать величину прилагаемого контрольного напряжения U (увеличивать напряженность поля E в межэлектродном промежутке). Особенно важно это учитывать при контроле покрытий малой толщины ($d_{\text{п}} < 1$ мм) в области существенно нелинейной зависимости $E_{\text{пр}}(d_{\text{п}})$.

Влияние формы электрического поля и полярности контрольного напряжения на величину пробивного напряжения воздушных промежутков

Из сказанного следует, что образование искрового разряда и стримера определяется величиной контрольного напряжения U и формой электрического поля в области межэлектродного промежутка. Традиционно в электротехнике формы электрических полей подразделяются на однородные, слабо-неоднородные и сильнонеоднородные, при этом степень неоднородности электрического поля между двумя электродами характеризуется коэффициентом неоднородности $K_{\text{Н}}$, который равен отношению максимальной напряженности электрического поля E_{max} к средней напряженности $E_{\text{ср}}$ между электродами, т.е.

$$K_{\text{Н}} = \frac{E_{\text{max}}}{E_{\text{ср}}}.$$

При этом

$$E_{\text{ср}} = \frac{U}{d_{\text{п}}}.$$

Вместе с тем E_{max} зависит от приложенного к электродам напряжения, конфигурации и размеров электродов, а также расстояния между ними. Для однородного поля коэффициент неоднородности $K_{\text{Н}} = 1$, для слабо-неоднородного $K_{\text{Н}} \leq 3$, для сильнонеоднородного $K_{\text{Н}} \geq 3$. Кроме этого, различают симметричную и несимметричную системы электродов. При симметричной системе электроды имеют одинаковую форму и размеры, отсутствует заземление какого-либо из них. При несимметрич-

ной системе электроды имеют отличающиеся конфигурацию и размеры либо один из них заземленный.

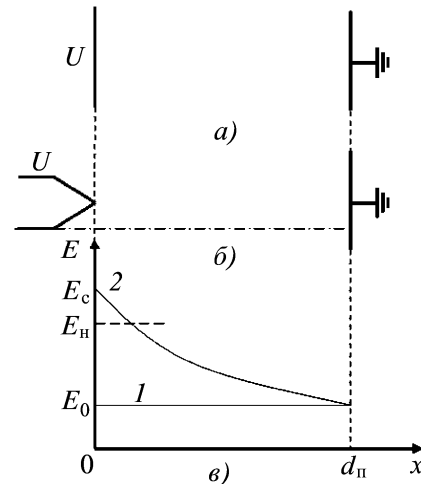


Рис. 7. Система плоских электродов (а), система заостренный стержень – плоскость (б) и соответствующие им зависимости напряженности электрического поля в межэлектродном промежутке (в): 1 – для системы плоских электродов; 2 – для системы заостренный стержень – плоскость на оси стержня

В общем случае в неоднородном поле напряженность E в различных точках межэлектродного промежутка разная по величине и по направлению. Неоднородные поля могут быть созданы в парах стержень–стержень, стержень–плоскость, провод–земля и некоторых других. Наибольший практический интерес для рассматриваемой задачи представляет пара стержень–плоскость. На рис. 7 приведены типовые зависимости напряженности E электрического поля в межэлектродном промежутке для системы плоских электродов и системы заостренный стержень (электрод) – плоскость на оси острия стержня [17].

В однородных полях, например в системе плоских электродов, у которых напряженность E_0 меньше некоторой напряженности $E_{\text{н}}$, соответствующей возникновению самостоятельной формы разряда, коронный и искровой разряды не возникают. В сильнонеоднородном поле (например, в системе электродов заостренный стержень – плоскость) возможна ситуация, при которой в области, прилегающей к стержню, напряженность поля $E_{\text{с}} > E_{\text{н}}$. При этом возникает самостоятельный коронный разряд, локализованный в этой области. Разряд будет подерживаться либо за счет фотоионизации из объема воздуха (при положительной полярности стержня), либо за счет фотоэмиссии или автоэлектронной (холодной) эмиссии с катода (при отрицательной полярности стержня). При небольшом повышении

напряженности поля в промежутке $E_{\text{ср}} < E_{\text{н}}$ область коронного разряда будет продвигаться от стержня к плоскому электроду. При достижении плоского

торый, взаимодействуя с внешним полем, будет увеличивать напряженность непосредственно у острия и уменьшать в остальной части промежутка (рис. 8, а).

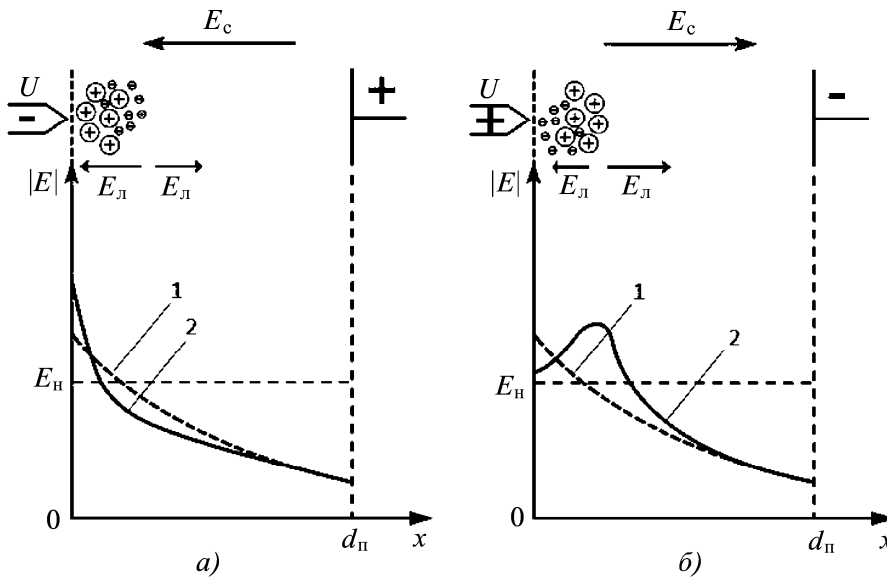


Рис 8. Образование анодного (а) и катодного (б) стримеров:

1 – зависимость напряженности электрического поля для системы заостренный стержень – плоскость на оси стержня; 2 – результирующая напряженность в промежутке после возникновения лавин; $E_{\text{н}}$ – напряженность возникновения самостоятельной формы разряда

электрода во всем воздушном промежутке образуется стример. Таким образом, в неоднородных электрических полях искровой разряд образуется при значениях U , меньших, чем в однородных полях.

В однородных и слабонеоднородных полях (например, при контроле сплошности покрытия протяженными резиновыми электродами), где минимальный и средний градиенты напряжения мало отличаются друг от друга, влияние полярности приложенного контрольного напряжения невелико. В сильнонеоднородных полях ($K_{\text{н}} > 3$) при несимметричных электродах (например, в системе электродов заостренный стержень – плоскость) существенное влияние на величину разрядного напряжения оказывает полярность.

При отрицательной полярности острия электрическое поле непосредственно у острия приводит к эмиссии электронов с катода, которые сразу попадают в сильное поле и осуществляют ударную ионизацию, образуя большое число лавин. Электроны лавин, перемещаясь в слабое поле у анода, теряют скорость, захватываются нейтральными молекулами, становятся отрицательными ионами, рассеянными в пространстве. Положительные ионы лавин образуют объемный заряд у острия, ко-

торый, взаимодействуя с внешним полем, будет увеличивать напряженность непосредственно у острия и уменьшать в остальной части промежутка (рис. 8, б). Если напряжение между электродами достаточно велико, то возникает лавина электронов справа от положительного объемного заряда. Электроны лавины, смешиваясь с положительными ионами объемного заряда, создают зародыш канала анодного стримера, заполненного плазмой.

Все это приводит к тому, что для дальнейшей ионизации в данной части промежутка необходимо значительно увеличить разность потенциалов между электродами. При дальнейшем увеличении напряжения происходит ионизация справа от плазменного слоя, большое число образующихся лавин приводит к удлинению стримера. Однако из-за большого числа лавин головка стримера оказывается размыта. В силу рассмотренных особенностей развитие стримера происходит с большими трудностями.

Зажигается стримерный коронный разряд. Положительные заряды этой лавины будут располагаться на головке стримера и создавать область повышенной напряженности во внешнем пространстве. Наличие области сильного поля обеспечивает образование новых лавин, электроны которых втягиваются в канал стримера, постепенно удлиняя его. Стример прорастает к катоду, вызывая пробой воздушного промежутка при сравнительно малой величине разрядного напряжения. Все это приводит к тому, что разрядное напряжение при положительной полярности острей меньше, чем при отрицательной полярности.

Электроискровой контроль диэлектрических покрытий в однородном и сильнонеоднородном электрических полях

Как уже было указано, в зависимости от формы применяемой системы электродов в межэлектродном пространстве создаются однородное или сильнонеоднородное электрические поля. Одним из электродов при этом является металлическое основание, которое можно рассматривать как плоское или квазиплоское в зоне контроля. В качестве второго (контрольного) традиционно применяются следующие электроды:

- использующие в качестве контактного элемента листы электропроводящей резины шириной до нескольких сотен миллиметров и толщиной порядка двух миллиметров (рис. 9, *а*);
- серповидные или Т-образные из металлических прутков диаметром 3...4 мм (рис. 9, *б*);
- кольцевые (пружинные) из металлических прутков диаметром 1,5...3,0 мм (рис. 9, *в*);
- веерные или щеточные, состоящие из набора металлических стержней или проволок (рис. 9, *з* и *д* соответственно).

Для решения вопросов оптимизации формы и конструкции электродов было выполнено моделирование картины электрического поля указанных электродов, располагаемых на покрытии в районе искусственного сквозного цилиндрического дефекта. При этом наибольший интерес представляет контроль тонких (лакокрасочных и подобных им) покрытий, где правильный выбор величины контрольного напряжения особенно актуален для исключения недобраковки (отсутствия электрического пробоя воздушного промежутка в районе дефекта сплошности покрытия) или перебраковки (например, электрического пробоя материала покрытия). В качестве примера рассмотрим результаты моделирования для случая лакокрасочного покрытия толщиной $d = 200$ мкм и искусственного дефекта диаметром 100 мкм.

При сканировании поверхности покрытия плоским резиновым электродом он поджимается и проходит над дефектом плоской и торцевой частями. На плоской части электрическое поле в районе дефекта является практически однородным (рис. 10, *а*) и для обеспечения достоверного выявления дефекта (пробоя воздушного промежутка) требуется повышение контрольного напряжения, что не всегда возможно при контроле покрытий малой толщины. В то же время при расположении торца резинового электрода над дефектом (рис. 10, *б*) электрическое поле в районе торца становится неоднородным. Примерно такая же неоднородность поля в районе торца наблюдается при установке электрода под некоторым углом (рис. 10, *в*). Резко неоднородным поле становится в районе усеченного торца плоского электрода (рис. 10, *г*). Применение плоских резиновых электродов, усеченных на торце, позволит повысить достоверность выявления дефектных участков покрытия.

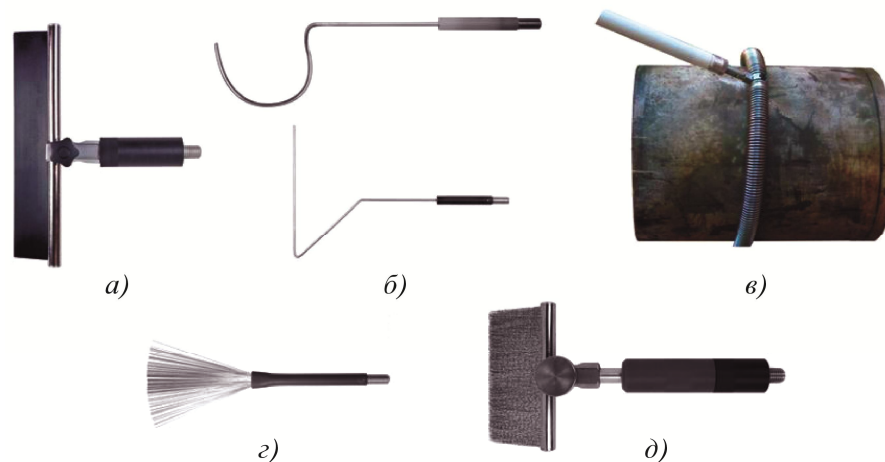


Рис. 9. Типовые контрольные электроды: плоский резиновый (*а*), серповидный и Т-образный (*б*), пружинный (*в*), веерный (*з*) и щеточный (*д*)

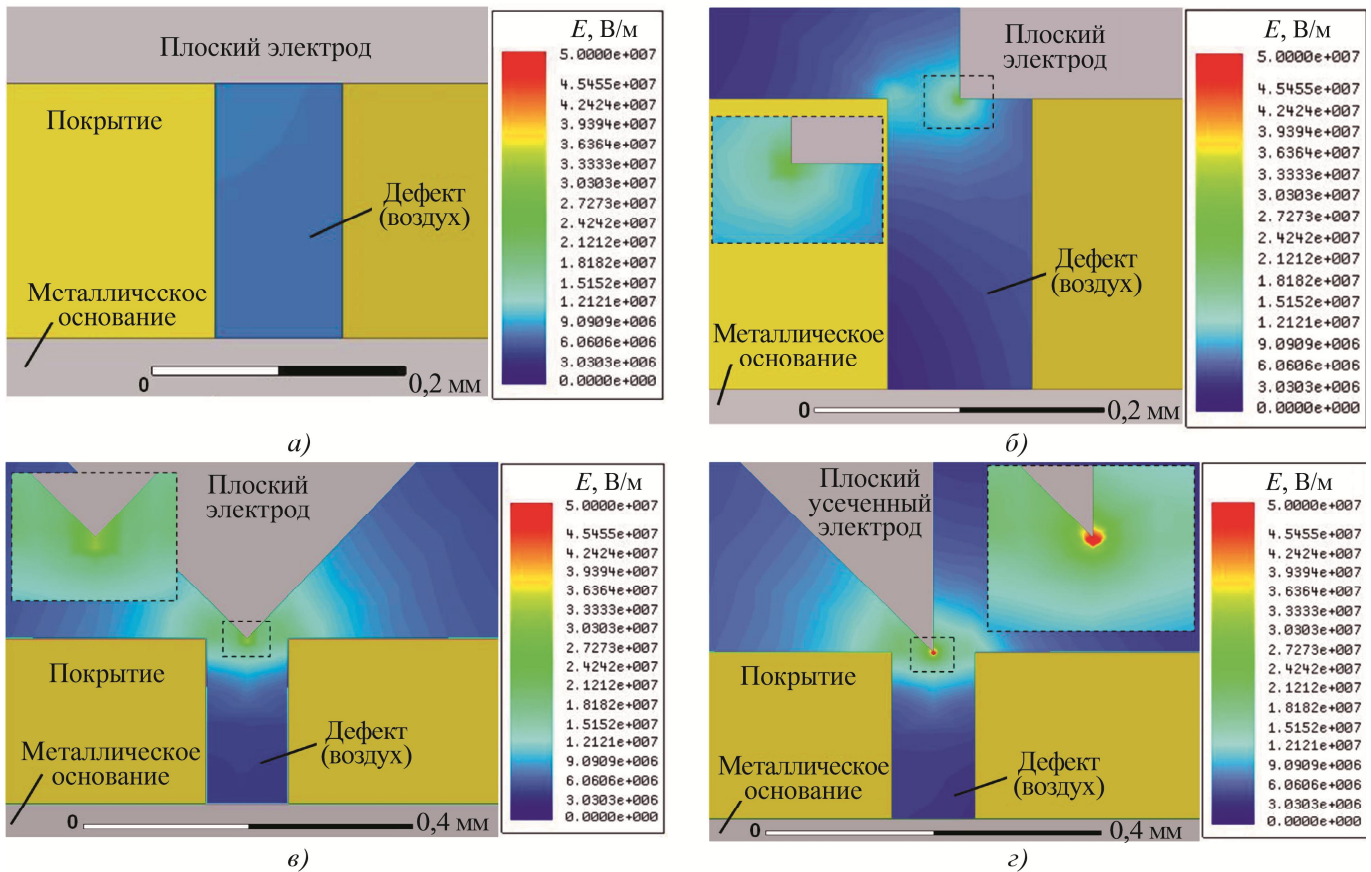


Рис. 10. Расчетные картины электрического поля для плоского резинового контрольного электрода над искусственным дефектом:

а – в районе плоской части; *б* – в районе торцевой части; *в* – при установке электрода под углом 45° к покрытию; *г* – для случая усеченной (заточенной) торцевой части

Серповидные и Т-образные электроды, диаметр которых (например, 3 мм) существенно больше диаметра искусственного дефекта (например, 0,1 мм), можно рассматривать как плоские. При этом картина однородного поля в районе дефекта будет близка к представленной на рис. 10, *а*. При этом следует учитывать возможность изменения межэлектродного расстояния при сканировании поверхности покрытия.

В случае использования пружинных электродов при нахождении витка над искусственным дефектом также будет справедливым сказанное для случая серповидных и Т-образных контрольных электродов. Кроме того, при сканировании возможна ситуация, при которой виток пружины не пройдет непосредственно над дефектом, увеличивая тем самым длину разрядного промежутка и, как следствие, возможность недобраковки.

Особо следует рассмотреть веерный и щеточный контрольные электроды. При сканировании поверхности покрытия веерным электродом стержни поджимаются к поверхности и могут про-

ходить над дефектом цилиндрической и торцевой частями. При прохождении цилиндрической частью электрическое поле в районе дефекта (при минимальном межэлектродном промежутке) является слабонеоднородным ($K_H \leq 2$) (рис. 11, *а*). Картина поля для случая пересечения искусственного дефекта торцом стержня будет практически соответствовать представленной на рис. 10, *б*. Сильнонеоднородным ($K_H \sim 10$) поле становится при пересечении дефекта заточенным (конусным) торцом цилиндрического электрода (рис. 11, *б*). Данные выводы справедливы для случая, при котором диаметр искусственного цилиндрического дефекта меньше диаметра стержней сканирующих контрольных электродов.

При производстве щеточных электродов используется большое число плотно расположенных проволок диаметром 0,2...0,4 мм. Картина поля на их торцах для случая проволок диаметром 0,2 мм в районе искусственного цилиндрического дефекта, диаметр которого превышает диаметр проволоки, показана на рис. 12. Поле при этом является резко неоднородным.

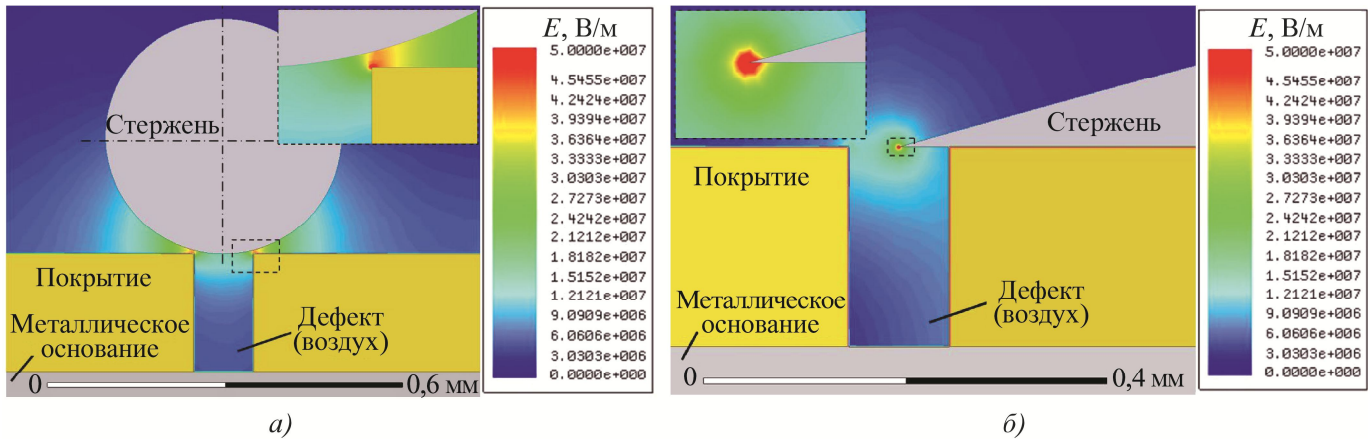


Рис. 11. Расчетные картины электрического поля для стержня сверного контрольного электрода над искусственным дефектом:

a – в районе цилиндрической части; *б* – в районе заточенной (конусной) торцевой части

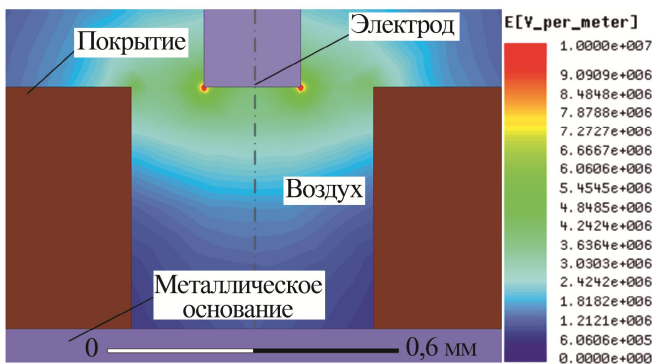


Рис. 12. Расчетная картина электрического поля для проволоки диаметром 0,2 мм над искусственным дефектом диаметром 0,5 мм

В данном случае для достижения требуемой достоверности контроля необходимо при изготовлении контрольных электродов использовать большое число проволок, диаметр которых сопоставим или меньше диаметра дефектов, которые необходимо выявлять. Еще больший эффект достигается при придании проволокам заточенной конической формы на торцах.

Таким образом, усечение торцевой части плоских резиновых электродов, а также уменьшение диаметра стержней (проволок) контрольного сверных и щеточных электродов и придание им конической формы позволяет существенно повысить неоднородность поля в воздушном промежутке дефекта и, как следствие, понизить пробивное напряжение промежутка, необходимое для образования искрового пробоя в местах нарушения сплошности покрытия. Уменьшение пробивного напряжения дефектных участков позволяет понизить контрольное напряжение и прово-

дить контроль покрытий с меньшим значением электрической прочности без снижения его достоверности.

Заключение

Анализ процесса искрообразования с учетом полярности прилагаемого контрольного напряжения и конструктивных принципов создания сильнонеоднородного электрического поля в межэлектродном промежутке показал возможность контроля покрытий малой толщины при контрольных напряжениях, меньших, чем рассчитываемые по зависимостям, представленным в современной нормативной документации, без снижения достоверности результатов, что особенно актуально для лакокрасочных и подобных им покрытий протяженных систем (например, трубопроводов) и объектов большой площади, для контроля которых до настоящего времени в большинстве случаев регламентируется низкопроизводительный и трудноприменимый электролитический метод.

На основании проведенных исследований авторами разработаны новые конструкции электродов и импульсные режимы работы дефектоскопов с частотой подачи импульсов контрольного напряжения до 600 Гц, а также разработан межгосударственный стандарт ГОСТ 34395–2018 «Материалы лакокрасочные. Электроискровой метод контроля сплошности диэлектрических покрытий на токопроводящих основаниях», который устанавливает электроискровой метод определения сплошности лакокрасочных покрытий, нанесенных на токопроводящие основания, толщиной 25 мкм и выше. Стандарт регламентирует процедуры выбора контрольного напряжения, подготовки и проведения контроля, а также отчета о его результатах.

Библиографический список

1. **ГОСТ 9.402–2004.** Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Подготовка металлических поверхностей к окрашиванию. М.: Стандартиформ, 2006. 40 с.
2. **Яковлев А. Д.** Химия и технология лакокрасочных покрытий: учеб. для вузов. 4-е изд., испр. СПб.: Химиздат, 2010. 448 с.
3. **ГОСТ Р51164–98.** Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии. М.: Изд-во стандартов, 1998. 46 с.
4. **ГОСТ 9.401–91.** Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Общие требования и методы ускоренных испытаний на стойкость к воздействию климатических факторов. М.: Изд-во стандартов, 1991. 194 с.
5. **ГОСТ 9.410–88.** Система защиты от коррозии и старения. Покрытия порошковые полимерные. Типовые технологические процессы. М.: Стандартиформ, 2006. 24 с.
6. **ГОСТ 34395–2018.** Материалы лакокрасочные. Электроискровой метод контроля сплошности диэлектрических покрытий на токопроводящих основаниях. М.: Стандартиформ, 2018. 11 с.
7. **ASTMD 5162-01:2015/Standard Practice for Discontinuity (Holiday) Testing of Nonconductive Protective Coating on Metallic Substrates,** 2015.
8. **ASTM G62–14/Standard Test Methods for Holiday Detection in Pipeline Coatings,** 2014.
9. **NACE SP0188–2006/Discontinuity (Holiday) Testing of New Protective Coatings on Conductive Substrates,** 2006.
10. **ASTM D6747–15/Standard Guide for Selection of Techniques for Electrical Leak Location of Leaks in Geomembranes,** 2015.
11. **Мусихин А. С., Сясько В. А.** Электроискровой контроль сплошности защитных лакокрасочных покрытий // В мире НК. 2018. Т. 21. № 2. С. 42 – 45.
12. **Ерехинский Б. А., Пахомов А. В.** Современные технологии диагностики объектов добычи газа и газового конденсата. Применяемая техника и оборудование. Воронеж: Воронежск. обл. типография, 2017. 374 с.
13. **Базелян Э. М., Райзер Ю. П.** Искровой разряд: учеб. пособие. М.: Изд-во МФТИ, 1997. 320 с.
14. **Важов В. Ф., Лавринович В. А., Лопаткин С. А.** Техника высоких напряжений: курс лекций. Томск: Изд-во ТПУ, 2006. 119 с.
15. **Райзер Ю. П.** Физика газового разряда: учеб. руководство. 2-е изд. М.: Наука, 1992. 536 с.
16. **Мик Дж., Крэгс Дж.** Электрический пробой в газах. пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1960. 605 с.
17. **Воробьев Г. А., Похолков Ю. П., Королев Ю. Д. и др.** Физика диэлектриков (область сильных полей): учеб. пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2003. 244 с.

Библиографический список

1. **ГОСТ 9.402–2004.** Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Подготовка металлических поверхностей к окрашиванию. М.: Стандартиформ, 2006. 40 с.
2. **Яковлев А. Д.** Химия и технология лакокрасочных покрытий: учеб. для вузов. 4-е изд., испр. СПб.: Химиздат, 2010. 448 с.
3. **ГОСТ Р51164–98.** Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии. М.: Изд-во стандартов, 1998. 46 с.
4. **ГОСТ 9.401–91.** Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Общие требования и методы ускоренных испытаний на стойкость к воздействию климатических факторов. М.: Изд-во стандартов, 1991. 194 с.
5. **ГОСТ 9.410–88.** Система защиты от коррозии и старения. Покрытия порошковые полимерные. Типовые технологические процессы. М.: Стандартиформ, 2006. 24 с.
6. **ГОСТ 34395–2018.** Материалы лакокрасочные. Электроискровой метод контроля сплошности диэлектрических покрытий на токопроводящих основаниях. М.: Стандартиформ, 2018. 11 с.
7. **ASTMD 5162-01:2015/Standard Practice for Discontinuity (Holiday) Testing of Nonconductive Protective Coating on Metallic Substrates,** 2015.
8. **ASTM G62–14/Standard Test Methods for Holiday Detection in Pipeline Coatings,** 2014.
9. **NACE SP0188–2006/Discontinuity (Holiday) Testing of New Protective Coatings on Conductive Substrates,** 2006.
10. **ASTM D6747–15/Standard Guide for Selection of Techniques for Electrical Leak Location of Leaks in Geomembranes,** 2015.
11. **Мусихин А. С., Сясько В. А.** Электроискровой контроль сплошности защитных лакокрасочных покрытий // В мире НК. 2018. Т. 21. № 2. С. 42 – 45.
12. **Ерехинский Б. А., Пахомов А. В.** Современные технологии диагностики объектов добычи газа и газового конденсата. Применяемая техника и оборудование. Воронеж: Воронежск. обл. типография, 2017. 374 с.
13. **Базелян Э. М., Райзер Ю. П.** Искровой разряд: учеб. пособие. М.: Изд-во МФТИ, 1997. 320 с.
14. **Важов В. Ф., Лавринович В. А., Лопаткин С. А.** Техника высоких напряжений: курс лекций. Томск: Изд-во ТПУ, 2006. 119 с.
15. **Райзер Ю. П.** Физика газового разряда: учеб. руководство. 2-е изд. М.: Наука, 1992. 536 с.
16. **Мик Дж., Крэгс Дж.** Электрический пробой в газах. пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1960. 605 с.
17. **Воробьев Г. А., Похолков Ю. П., Королев Ю. Д. и др.** Физика диэлектриков (область сильных полей): учеб. пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2003. 244 с.