ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ

УДК 620.179.
DOI:
Оригинальная статья / Original Article

ОЦЕНКА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕМНЫХ ДЕФЕКТОВ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫМ МЕТОДОМ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ (ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ИСКРОВОЙ КОНТРОЛЬ)

В.А. Сясько[1], А.С. Мусихин[2], И.С. Гнивуш[3,*], М.С. Степанова[1]

[1]Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, Санкт-Петербург, Российская Федерация
[2]ООО «Константа», Санкт-Петербург, Российская Федерация
[3]Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Российская Федерация

**e-mail: klin4_g@mail.ru*

Аннотация. Рассмотрена возможность выявления несквозных (объемных и придонных) дефектов диэлектрических покрытий импульсным электроискровым методом неразрушающего контроля. Показано, что информативным признаком наличия дефекта служат частичные разряды, вызывающие характерную деформацию импульса испытательного напряжения. На основе эквивалентной емкостной модели покрытия с дефектом получена связь кажущегося заряда и геометрических характеристик воздушного зазора. Результаты подтверждены численным моделированием распределения электрического поля в COMSOL и экспериментом на образцах из оргстекла с глухими отверстиями переменной глубины. Предложен алгоритм выделения сигнала частичного разряда по взвешенной сумме приращений среднеквадратичных отклонений второй производной напряжения. Полученные зависимости позволяют выявлять несквозные (объемные и придонные) дефекты и оценивать остаточную толщину покрытия в зоне дефекта.

Ключевые слова: электроискровой метод, диэлектрические покрытия, несквозной дефект покрытия, частичные разряды, придонный дефект, объемный дефект.

Финансирование. Исследование проведено без дополнительного финансирования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

Вклад авторов. Концепция обзорной статьи — СВА, МАС; анализ данных литературы — СВА, МАС, ГИС; написание рукописи — СВА, МАС, ГИС, СМС; редактирование — МАС, ГИС, СМС; работа со списком литературы и рисунками — СМС.

Ссылка цитирования: Сясько В.А., Мусихин А.С., Гнивуш И.С., Степанова М.С. Оценка геометрических параметров объемных дефектов диэлектрических покрытий электроискровым методом неразрушающего контроля (высоковольтный искровой контроль) // Дефектоскопия / Russian Journal of Nondestructive Testing. 2026. № 3. С. 46 –56. DOI:

© Сясько В.А., Мусихин А.С., Гнивуш И.С., Степанова М.С., 2026

ELECTROMAGNETIC METHODS

УДК 620.179.
DOI:
Original Article

Evaluation of Geometric Parameters of Volumetric Defects in Dielectric Coatings by The Electrospark Method of Non-Destructive Testing (High-Voltage Spark Testing)

V.A. Syasko[1], A.S. Musikhin[2], I.S. Gnivush[3,*], M.S. Stepanova[1]

[1]D.I. Mendeleev Institute for Metrology (VNIIM), St. Petersburg, Russian Federation
[2]LLC "KONSTANTA", St. Petersburg, Russian Federation
[3]Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation

**e-mail: klin4_g@mail.ru*

Abstract. The paper examines the feasibility of detecting non-through defects (internal defects and interfacial defects at the metal–coating interface) in dielectric coatings using the electrospark method of non-destructive testing. It is shown that partial discharges, which induce a characteristic distortion of the test-voltage pulse, serve as an informative indicator of a coating defect. Based on an equivalent capacitive model of a coating with a defect, a relationship between the apparent charge and the geometry of the air gap is derived. The results are validated by numerical simulation of the electric-field distribution in COMSOL and by experiments on plexiglas specimens with blind holes of varying depth. An algorithm is proposed for extracting the partial-discharge signal using a weighted sum of increments in the root-mean-square deviations of the second derivative of the voltage. The obtained dependences make it possible to estimate the residual coating thickness in the defect region.

Keywords: electrospark method, coating defect, dielectric coatings, partial discharges, interfacial defect at the metal–coating interface (interfacial defect), internal defect.

Funding. The study was conducted without additional funding.

Conflict of interests. The authors declare no obvious or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Authors contribution. Review article concept — SVA, MAS; literature data analysis — SVA, MAS, GIS; manuscript writing — SVA, MAS, GIS, SMS; editing — MAS, GIS, SMS; work with the bibliography and figures — SMS

For Citation: Syasko V.A., Musikhin A.S., Gnivush I.S., Stepanova M.S. Evaluation of Geometric Parameters of Volumetric Defects in Dielectric Coatings by The Electrospark Method of Non-Destructive Testing (High-Voltage Spark Testing). *Defectoskopiya / Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2026, no. 1, pp. 46–56. (In Russ.) DOI:

© Syasko V.A., Musikhin A.S., Gnivush I.S., Stepanova M.S., 2026

ВВЕДЕНИЕ

Электроискровой контроль, основанный на возникновении искровых разрядов в месте дефекта сплошности покрытия при формировании в контролируемой области покрытия электрического поля высокой напряженности, является одним из наиболее производительных методов неразрушающего контроля сплошности диэлектрических покрытий на металлических конструкциях [1, 2]. Метод позволяет выявлять дефекты покрытий, которые снижают изоляционные свойства [3].

В настоящее время широкое распространение получили методики выявления сквозных дефектов (поры и микропоры, каналы, трещины, раковины и т.д.) электроискровым методом [4, 5]. Однако в промышленных защитных покрытиях, на этапе их нанесения и при эксплуатации изделия, могут формируются дефекты структуры, которые нельзя отнести к сквозным (например, пузыри, отслоения покрытия от основания, инородные включения, расслоения, кратеры и др.) [6, 7]. Такие дефекты со временем могут приводить к разрушению покрытия, формированию сквозных дефектов и сокращению срока службы защищаемого изделия. Достаточно часто такие дефекты возникают на стыках листов гидроизоляционных материалов кровельных систем, приводя к постепенной деградации свойств покрытия. При этом существующие методики электроискрового контроля [8 – 10] не позволяют выявлять несквозные дефекты, т.к. отсутствует сквозной канал в покрытии, в котором формируется фиксируемый искровой разряд.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Несквозные дефекты покрытия можно разделить на недопустимые утонения, объемные включения и придонные дефекты. Утонение характеризуется двумя толщинами – толщиной первоначального покрытия d и воздушным зазором d_1, образующимся между контактной поверхностью электрода и поверхностью изделия в месте утонения (рис. 1*а*). Объемные включения (воздушные пузыри и полости) характеризуются диаметром ∅, глубиной залегания h_1 и количеством включений (рис. 1*б*) [11, 12].

Придонные дефекты образуются при отслоении покрытия от металлического основания и характеризуется высотой d_1 отслоения от основания (рис. 2).

В [13] описан способ выявления несквозных дефектов испытательным напряжением, предполагающий пробой покрытия. В покрытии формируется сквозной дефект (воздушный канал), который необходимо устранять.

Известно, что формированию искрового разряда в газе или твердом теле (диэлектрике) предшествует стадия формирования частичных разрядов [14–16]. Также из [14–16] следует, что при приложении импульсного испытательного напряжения к контролируемому покрытию в объеме описанных выше дефектов могут образовываться частичные разряды. При этом частичные разряды не приведут к нарушению свойств самого покрытия. Таким образом, частичные разряды, приводящие к изменению формы импульса испытательного напряжения, традиционно рассматриваемые как мешающий параметр электро-

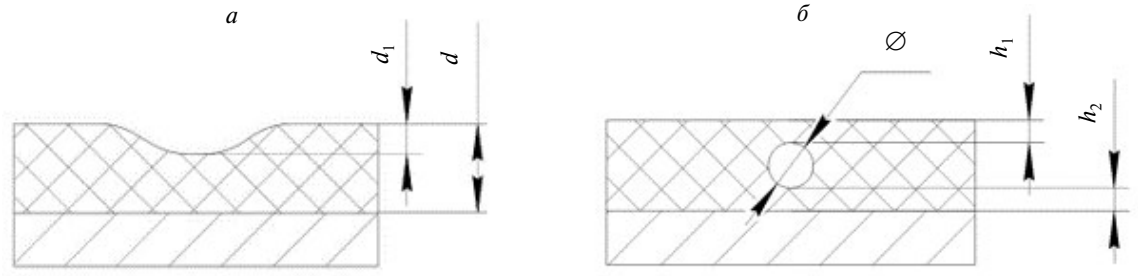


Рис. 1. Схематичное изображение недопустимого утонения (*а*) и объемного дефекта (*б*)
Fig. 1. Schematic representation of unacceptable thinning (*а*) and volumetric defect (*б*)

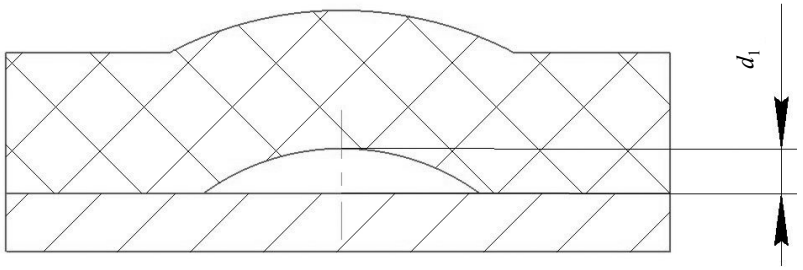


Рис. 2. Модель придонного дефекта
Fig. 2. Interfacial defect model

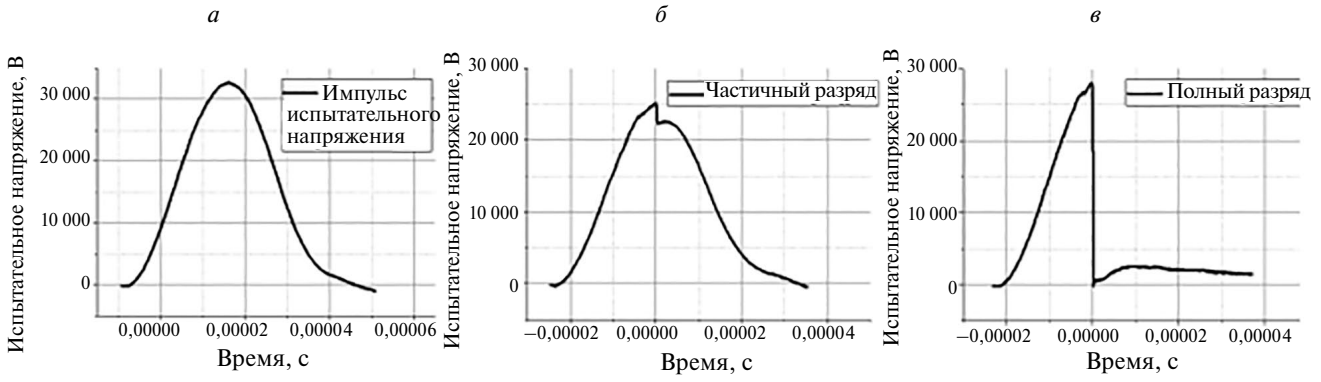


Рис. 3. Форма импульсов испытательного напряжения: импульс испытательного напряжения на бездефектном участке покрытия (*а*); импульс испытательного напряжения при возникновении частичного разряда (*б*); импульс испытательного напряжения при возникновении полного разряда на участке покрытия со сквозным дефектом (*в*)

Fig. 3. Test-voltage pulse waveforms: pulse recorded on a defect-free coating area (*а*); pulse recorded when a partial discharge occurs (*б*); pulse recorded when a full discharge occurs on a coating area with a through defect (*в*)

искрового контроля, могут быть информативным параметром, позволяющим сделать вывод о наличии в покрытии объемного или придонного дефектов и их геометрических параметрах (рис. 3).

Информация о наличии дефектов в объеме покрытия может быть получена как по сигналу с токоизмерительного элемента, так и по характерному изменению формы импульса испытательного напряжения. Однако при анализе сигнала на токоизмерительном шунте (рис. 4) видно, что частичные разряды возникаю также и в приповерхностных областях покрытия, что значительно зашумляет полезный сигнал. Поэтому целесообразно анализировать форму импульса испытательного напряжения.

При этом не каждый частичный разряд вызывает изменение заряда системы «электрод – покрытие – электропроводящее основание», достаточное для выделения сигнала, обусловленного частичным разрядом в несквозном дефекте на фоне шумов (при измерении с помощью встраиваемых аналого-цифровых преобразователей). Для количественного описания частичных разрядов используется такой параметр, как кажущийся заряд – заряд, мгновенное введение которого между электродами испытуемого объекта, установленного в испытательной схеме, могло бы дать такое же показание на измерительном приборе, как и сам импульс частичного разряда (ГОСТ Р55191—2012) [17, 18]. Для моделирования возникновения частичного разряда в придонном дефекте (отслоении покрытия), заполненном воздухом, можно использовать электрическую схему замещения, представленную на рис. 5.

На рис. 5 U – постоянное напряжение, приложенное между покрытием и основанием; U_1, U_2 – напряжения на участках диэлектрика и воздушном промежутке (дефекте) соответственно; C_2, C_1 – электрические емкости диэлектрика и воздушного промежутка соответственно.

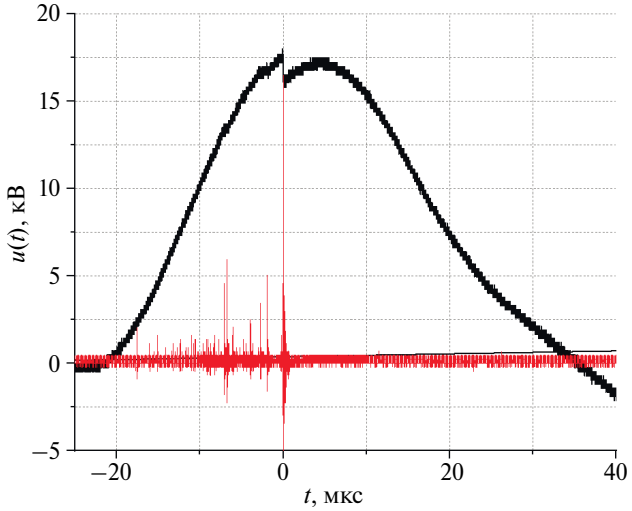


Рис. 4. Импульс испытательного напряжения электроискрового дефектоскопа амплитудой 17,5 кВ (черный) и сигнал на токоизмерительном шунте электроискрового дефектоскопа (красный) при возникновении частичных разрядов

Fig. 4. Test-voltage pulse of the high voltage flaw detector with an amplitude of 17.5 kV (black) and the signal across the current-measuring shunt of the high voltage flaw detector (red) during the occurrence of partial discharges

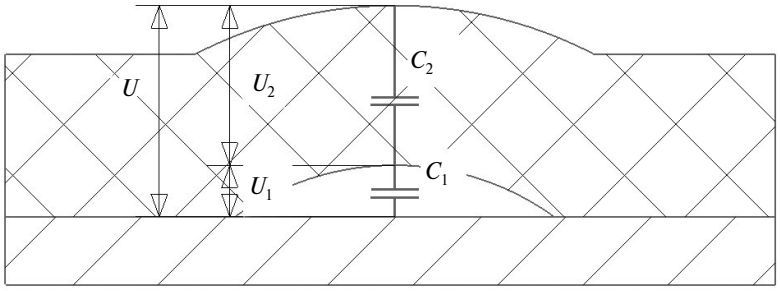


Рис. 5. Схема замещения покрытия с придонным дефектом (отслоением и вздутием) на электропроводящем основании
Fig. 5. Equivalent circuit of a coating with an interfacial defect on a conductive substrate

Рассчитаем кажущийся заряд q системы с придонным дефектом. На воздушный промежуток емкостью C_1 приложена часть общего напряжения U. Напряжение делится обратно пропорционально емкостям C_1 и C_2, при этом

$$U_1 = U \cdot \frac{C_2}{C_1 + C_2}. \quad (1)$$

При достижении в воздушном промежутке (полости) напряжения пробоя $U_{пв}$ происходит частичный разряд. В момент пробоя заряд, накопленный на «обкладках» конденсатора C_1, образованного стенками полости, нейтрализуется. Этот разряд вызывает перераспределение заряда во внешней цепи, которое регистрируется прибором как импульс. Измеряемый заряд равняется величине кажущегося заряда.

Для соединенных C_1 и C_2 и подключенных к источнику U при пробое C_1 (модель короткого замыкания) кажущийся заряд q рассчитывается по формуле:

$$q = U_1 \cdot \frac{C_2 \cdot C_1}{C_1 + C_2}, \quad (2)$$

где U_1 — изменение напряжения на конденсаторе C_1 при разряде.

В момент пробоя напряжение U_1 падает от $U_{пв}$ почти до 0. Следовательно, $U_1 \approx U_{пв}$.

Например, для полости высотой $d_1 = 2$ мм:

$$U_{пв} = \approx E_в \cdot d_1 = 3 \cdot 10^6 \left(\frac{В}{м}\right) \cdot 0,002 \text{ м} = 6000 \text{ В},$$

где $E_в$ – электрическая прочность воздуха.

Следовательно, если принять $d_1 = 0{,}001$ м, то:

$$q = U_1 \cdot \frac{C_2 \cdot C_1}{C_1 + C_2} =$$

$$= 6 \cdot 10^3 \cdot \frac{1,771 \cdot 10^{-10} \cdot 0,49 \cdot 10^{-10}}{0,49 \cdot 10^{-10} + 1,771 \cdot 10^{-10}} = 0,21 \text{ мкКл}.$$

На рис. 6 показана расчетная зависимость кажущегося заряда q от высоты полости d_1.

Однако, как говорилось выше, не каждый частичный разряд может вызывать изменение формы импульса испытательного напряжения на электроде – достаточное, чтобы выделить его на фоне шумов. На рис. 7 представлены форма импульса на электроде и сигнал на токоизмерительном шунте для двух частичных разрядов, один из них может быть достоверно зафиксирован по изменению формы импульса испытательного напряжения (*а*), другой – нет (*б*). При этом для каждого конкретного приборного решения (каждого конкретного аналого-цифрового преобразователя) можно определить величину кажущегося

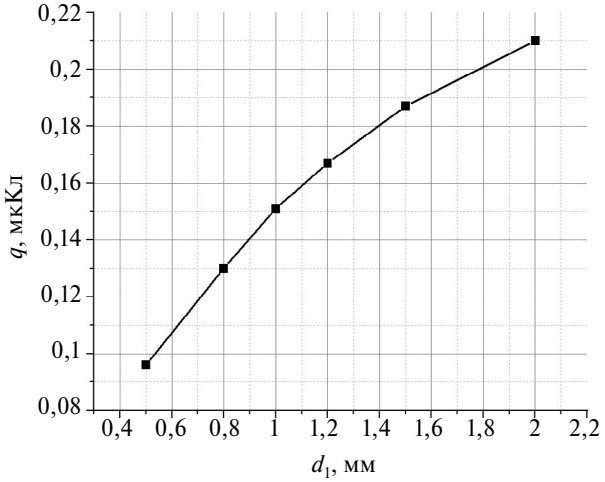


Рис. 6. Зависимость кажущегося заряда q от высоты полости d_1
Fig. 6. Dependence of the apparent charge q on the cavity height d_1

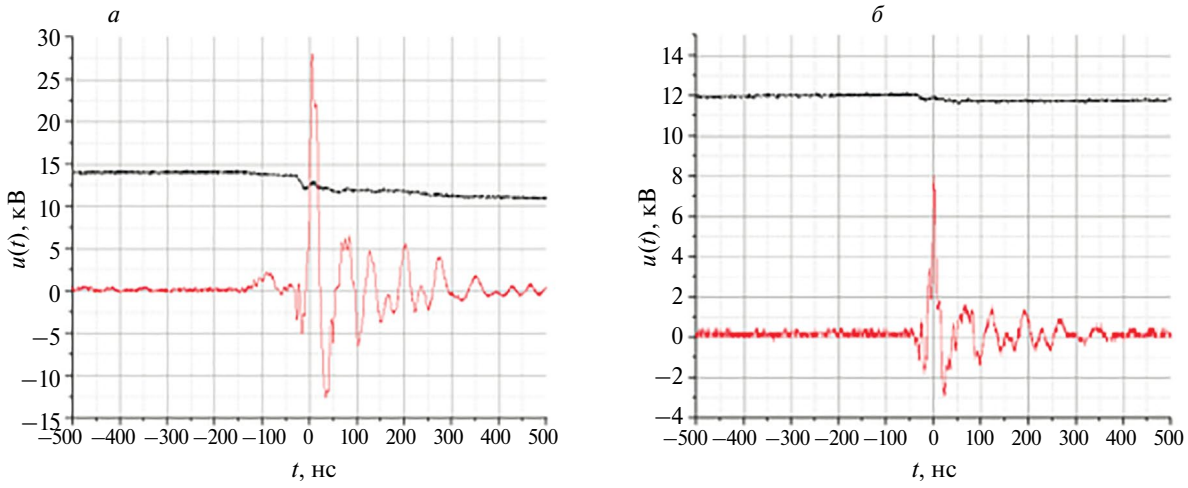


Рис. 7. Осциллограммы импульса испытательного напряжения электроискрового дефектоскопа амплитудой 17,5 кВ (черный) и сигнала на токоизмерительном шунте электроискрового дефектоскопа (красный) при возникновении частичных разрядов

Fig. 7. Oscillograms: spark-discharge defect detector test-voltage pulse, 17.5 kV amplitude (black); signal at the current-measuring shunt during partial discharges (red)

заряда (зависящего от размера дефекта), при котором влияние частичного разряда будет различимо на осциллограмме импульса испытательного напряжения.

Из расчета видно, что частичные разряды для больших размеров ∅ на рис. 1 и d_1 рис. 2 обусловлены большим электрическим зарядом на границах воздушной полости, что приводит к увеличению мощности частичного разряда соответственно, за счет чего сигналы от них легче выделяются на фоне внешних шумов. Это подтверждается результатами моделирования распределения внешнего электрического поля численным моделированием в среде Comsol (рис. 8) для различных типов и толщин покрытий, в том числе для покрытия толщиной 3 мм с цилиндрическим плоскодонным искусственным дефектом (воздушной полостью). Испытательное напряжение при моделирования было выбрано равным 10 кВ. В качестве материала диэлектрика из библиотеки материалов Comsol был выбран PMMA (органическое стекло) с относительной диэлектрической проницаемостью ε = 3.

Результаты моделирования (распределения напряженности E электрического поля вдоль оси искусственного дефекта) показаны на рис. 9.

Из рис. 9 видно, что с увеличением воздушного зазора d_1 увеличивается и максимальная напряженность E электрического поля в зазоре, что свидетельствует о уменьшении электрической прочности воздушных промежутков при увеличении параметра d_1.

Для верификации вышеописанной модели была проведена серия экспериментов, в которых анализировалось изменение напряжения возникновения частичных разрядов на придонных дефектах и возможность выделения импульса частичного разряда на импульсе испытательного напряжения. Экспериментальная модель придонного дефекта и образцы покрытия с искусственными дефектами, аналогичными рассматриваемым при моделировании напряженности электрического поля для придонного дефекта, приведены на рис. 10. Ниже приведены результаты экспериментов, в которых заготовка выполнялась из

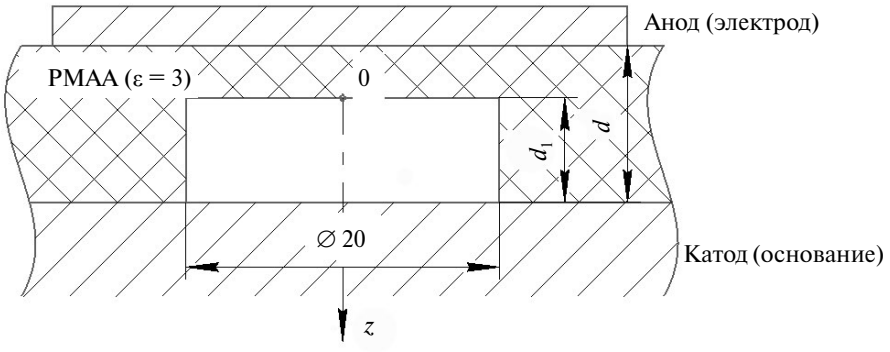


Рис. 8. Модель искусственного дефекта диэлектрического покрытия при моделировании распределения напряженности электрического поля

Fig. 8. Model of an artificial defect in a dielectric coating used for simulating the electric-field strength distribution

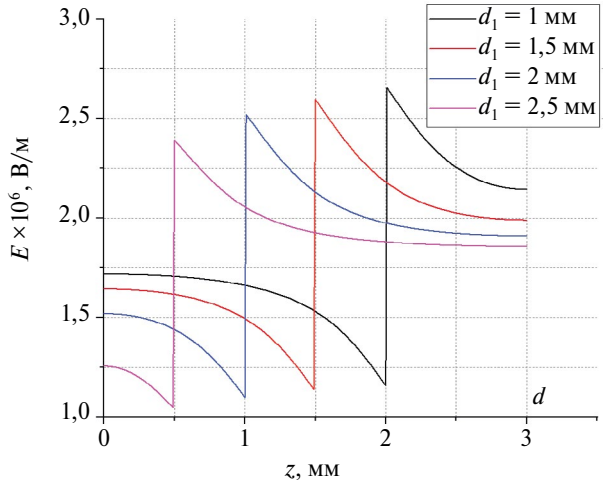


Рис. 9. Распределение напряженности электрического поля вдоль оси дефекта. Постоянная толщина покрытия. Переменный воздушный зазор
Fig. 9. Distribution of the electric-field strength along the defect axis: constant coating thickness and variable air gap

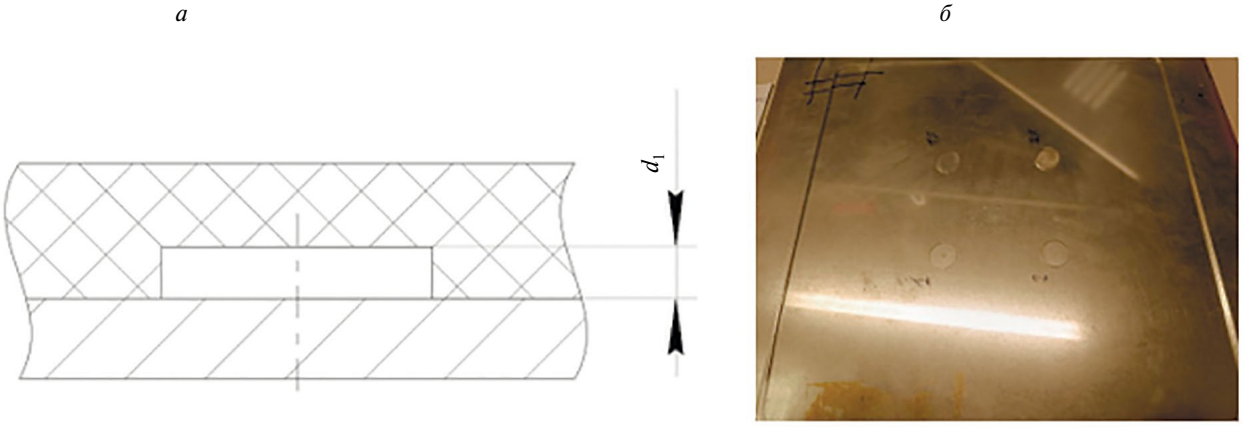


Рис. 10. Экспериментальная модель придонного дефекта (*а*); образец покрытия с искусственными придонными дефектами переменной толщины (*б*)
Fig. 10. Experimental model of an interfacial defect (*а*); coating specimen with artificial interfacial defects of variable thickness (*б*)

оргстекла, при этом расстояние между соседними глухими отверстиями составляло 80 мм, чтобы исключить их взаимное влияние в процессе эксперимента. Было изготовлено 2 пластины толщиной 5 мм, каждая из которых содержала по 4 глухих отверстия переменной глубины – от 1 до 4,5 мм с шагом 0,5 мм.

Осциллограммы импульса испытательного напряжения (рис. 11) фиксировались с помощью триггера осциллографа по превышению некоторого порога напряжения (6,8 В, 7,2 В, 11 В, 15 В соответственно).

Представленные данные демонстрируют практически линейную зависимость напряжения U_m возникновения частичных разрядов от глубины глухого отверстия d_1. Разброс экспериментальных точек хорошо согласуется с аппроксимирующей прямой и укладывается в погрешность 1,5 %, что указывает на устойчивый характер зависимости. Это означает, что при заданной общей толщине системы решающим фактором для возникновения частичных разрядов является увеличение доли воздушного промежутка d_1: по мере роста d_1 эффективная электрическая прочность покрытия с внутренним объемным дефектом уменьшается, а разряды инициируются при меньшем напряжении U_m.

Таким образом, при разработке алгоритма выявления сигнала частичного разряда при нарастании испытательного напряжения можно получить информацию о наличии в покрытии объемного или придонного дефекта и о величине d_1.

Авторами статьи предлагается алгоритм выявления сигнала частичного разряда, обусловленного внутренним объемным дефектом, на основе взвешенной суммы приращений средних квадратичных отклонений (СКО) [19].

Для нахождения отклонений формы сигнала от нормальных целесообразно использовать вторую производную импульса испытательного напряжения:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum (U_i'' - (U_i'')_{\text{ср}})^2}{n-1}}, \qquad (3)$$

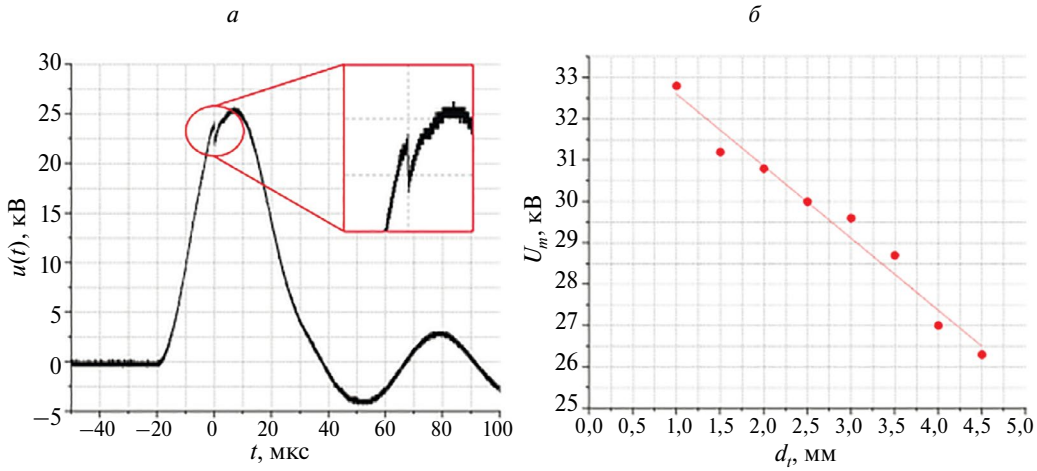


Рис. 11. Импульс испытательного напряжения, на котором видно влияние частичного разряда в виде искажения («просадки») (*а*); зависимость напряжения U_m возникновения частичного разряда от глубины d_1 глухого отверстия (*б*)
Fig. 11. Test-voltage pulse showing the effect of a partial discharge as a distortion ("sag") (*а*); dependence of the partial-discharge inception voltage U_m on the depth d_1 of the blind hole (*б*)

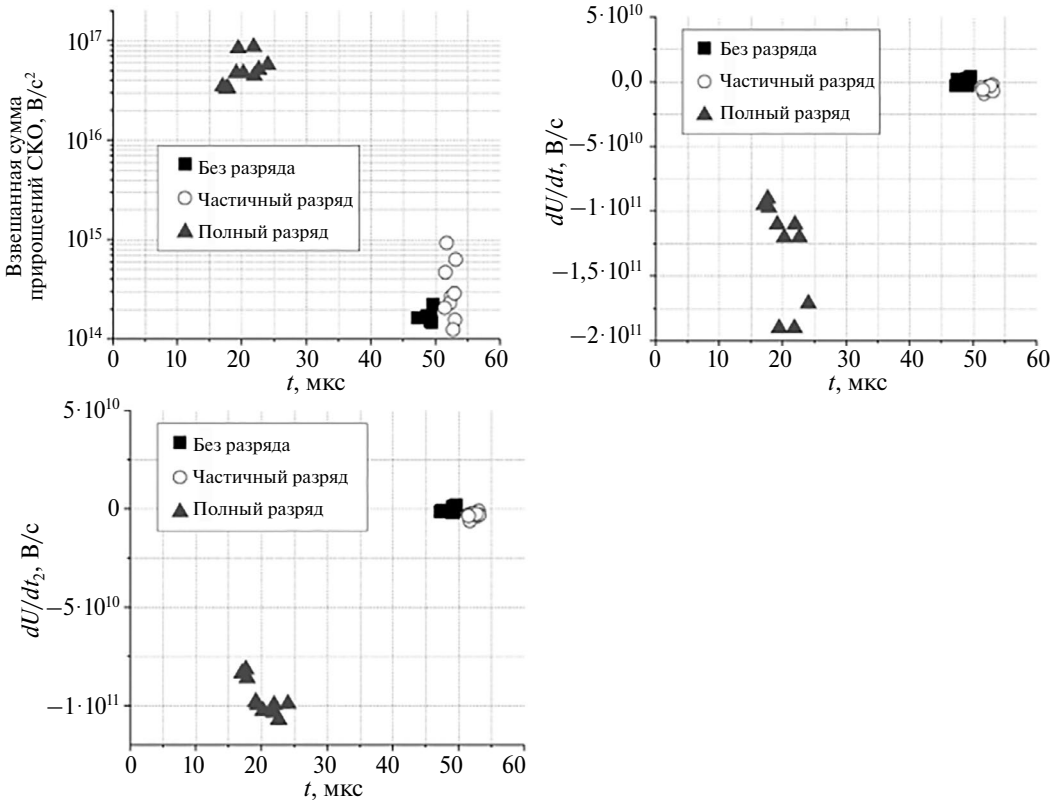


Рис. 12. Распределение классифицирующих параметров импульсов испытательного напряжения амплитудой 20 кВ
Fig. 12. Distribution of classification parameters for test-voltage pulses with an amplitude of 20 kV

где σ_i – СКО *i*-го элемента массива; *n* – количество точек в рассматриваемом интервале; U_i'' – вторая производная для *i*-го элемента массива; $(U_i'')_{ср}$ – среднее значение U_i''.

Чтобы определить степень отклонения от среднего значения второй производной испытательного напряжения в определенный момент времени рассмотрены значения [20]:

$$\sigma_{iLEFT} = |\sigma_{Li} - \sigma_{Li-1}|; \quad (4)$$

$$\sigma_{iRIGHT} = |\sigma_{Ri} - \sigma_{Ri+1}|, \quad (5)$$

σ_{iLEFT}, σ_{iRIGHT} – стандартные отклонения i-го измерения в момент времени $t \in [0, i]$ и $t \in [i, T]$ соответственно, где T – время измерений на интервале $(n - 1)$ импульсов испытательного напряжения. σ_{iLEFT} отражает степень влияния измерения по сравнению с предыдущими значениями испытательного напряжения и является эволюцией временного ряда, σ_{iRIGHT} показывает влияние измерения на формирование последующих значений испытательного напряжения.

Для выделения влияющих точек всего сигнала в совокупности, вычисляется поточечно взвешенная сумма приращений СКО:

$$W_i = \frac{t_i}{T}\sigma_{iLEFT} + \frac{T - t_i}{T}\sigma_{iRIGHT}, \quad (6)$$

где $\frac{t_i}{T}$ и $\frac{T - t_i}{T}$ – весовые коэффициенты, масштабирующие полученные значения.

На примере эксперимента (измерений) при использовании импульсов испытательного напряжения амплитудой 20 кВ и емкости системы «электрод – покрытие – токопроводящее основание» 10 пФ можно заметить, что импульсы полного разряда достоверно идентифицируются по всем представленным параметрам. Далее в массиве W_i вычисляется максимум всего массива, по значению которого можно сделать вывод о принадлежности импульса к одному из членов классификации (рис. 12). Для выделения частичного разряда целесообразно соблюдение минимум двух признаков классификации, поскольку параметры импульсов испытательного напряжения и импульсов с частичным разрядом имеют узкую границу.

Импульс полного разряда имеет однозначно выделенную локализацию параметров, не перекрывающуюся с остальными типами импульсов. Классификационные параметры импульсов испытательного напряжения и импульсов с частичным разрядом расположены близко, поэтому целесообразно проводить анализ по всем перечисленным параметрам и делать вывод о типе импульса, исходя из комплексного результата измерений: как минимум два параметра выходят за границы своей классификации.

Значения классификационных параметров зависят от значения импульсного испытательного напряжения и емкости системы «электрод – покрытие – токопроводящее основание». Между ними существует зависимость, исходя из которой возможно производить калибровку электроискровых дефектоскопов на стандартных образцах и расчет граничных параметров для конкретных условий контроля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные теоретический и экспериментальный анализы процессов формирования полных и частичных разрядов при импульсном электроискровом контроле подтвердил возможность достоверного выявления несквозных дефектов диэлектрических покрытий.

На основании характерного изменения формы импульса приложенного испытательного напряжения и момента возникновения частичного разряда возможно определение остаточной толщины покрытия h_1 для объемных дефектов и высоты d_1 отслоения в области дефектного участка.

Показано, что разрешающая способность предлагаемой технологии контроля зависит от соотношения сигнал/шум измерительных каналов напряжения на электроде и шунте, а также от встроенного алгоритма обработки полученной информации и определяется конкретными приборной и программной реализациями.

Результатом измерений параметров импульсов испытательного напряжения и напряжения токоизмерительного элемента является выборка двумерных массивов для классификатора, алгоритм которого может быть реализован на базе технологий машинного обучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Hellier C.* et al. Handbook of nondestructive evaluation. Mcgraw-hill, 2003. No. 19496.

2. ГОСТ 34395–2018. Материалы лакокрасочные. Электроискровой метод контроля сплошности диэлектрических покрытий на токопроводящих основаниях. М.: Стандартинформ, 2018.

3. *Ибрагимов Н.Ю., Ибрагимова Э.Н.* Дефектоскопическая установка трещиномер силикатных покрытий труб // Дефектоскопия. 2017. №11. С. 55–57.

4. ASTM D5162-08(2015) Standard Practice for Discontinuity (Holiday) Testing of Nonconductive Protective Coating on Metallic Substrates. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2015.

5. NDT Resource Center. Spark Testing. Available online: https://www.nde-ed.org/ (accessed on 10 December 2025).

6. *Mills D. J., Mabbutt S.* Investigation of defects in organic anti-corrosive coatings using electrochemical noise measurement // Progress in Organic Coatings. 2000. 39.1. P. 41–48.

7. *Syasko V. A., Musikhin A.S.* The high voltages spark testing method for protective and functional dielectric coatings on a conductive substrate. Increasing sensitivity and results reliability // Proceedings of 58th Annual Conference of the British Institute of Non-Destructive Testing, NDT. 2019. No. 58. P. 265–274.

8. ASTM G62-14. Standard Test Methods for Holiday Detection in Pipeline Coatings, 2014.

9. ASTM D6747-15. Standard Guide for Selection of Techniques for Electrical Leak Location of Leaks in Geomembranes, 2015.

10. NACE SP0188-2006. Discontinuity (Holiday) Testing of New Protective Coatings on Conductive Substrates, 2006.

11. *Мусихин А.С., Сясько В.А.* Электроискровой контроль сплошности защитных лакокрасочных покрытий // В мире неразрушающего контроля. 2018. Т. 21. № 2. С. 42–45.

12. *Danikas M.G., Morsalin S.* Foreign Inclusions, Enclosed Cavities, Partial Discharge Models and Discharge Energy: A Short Review Regarding Solid Dielectrics and Composite Insulating Systems // Engineering, Technology & Applied Science Research. 2019. Т. 9. № 5.

13. *Мусихин А.С.* Электроискровой контроль сплошности и недопустимых утонений диэлектрических покрытий: специальность 2.5.9 / диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург, 2023.

14. *Varivodov V.N., Kovalev D.I., Zhulikov S.S.* et al. Prevention of partial discharges in the solid insulation of high-voltage current conductors // Electr. Eng. 2021. No. 8. P. 30–34.

15. *Starikova N.S., Redko V.V.* Investigation of methods for testingling the integrity of insulation in the area of weak and strong electric fi elds // Bull. Sib. Sci. 2013. No. 3. P. 55–59.

16. *Syasko V., Musikhin A., Gnivush I.* Improvement of methods and devices for multi-parameter high-voltage testing of dielectric coatings // Coatings. 2024. V. 14. No. 4. P. 427.

17. IEC 60270:2000. High-voltage test techniques: partial discharge measurements. International Electrotechnical Commission (IEC), Geneva, 2000.

18. *Сергеев И.И.* Об измерении частичных разрядов // Энергетик. 2016. № 9. С. 41–46.

19. *Martínez-Tarifa J. M., Granado J., Robles G.* Efficient metrics for the detection of partial discharges under steep-fronted voltage pulses // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2022. V. 141. Art. 108159. DOI:10.1016/j.ijepes.2022.108159

20. *Heckert N. A.* et al. Handbook 151: Nist/sematech e-handbook of statistical methods. 2002.

REFERENCES

1. Hellier C. et al. *Handbook of nondestructive evaluation*. Mcgraw-hill, 2003. No. 19496.

2. GOST 34395-2018; Paint Materials. Spark Test Method for Continuity Inspection of Dielectric Coatings on Conductive Substrates. Moscow, Russia: FSUE “STANDARTINFORM”, 2018.

3. Ibragimov N.Yu., Ibragimova E.N. Flaw-detection system for measuring cracks in silicate pipe coatings. *Russian Journal of Nondestructive Testing (Defectoskopiya)*. 2017. No. 11. P. 55–57.

4. ASTM D5162-08; Standard Practice for Discontinuity (Holiday) Testing of Nonconductive Protective Coating on Metallic Substrates. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2015.

5. NDT Resource Center. Spark Testing. Available online: https://www.nde-ed.org/ (accessed on 10 December 2025).

6. Mills D. J., Mabbutt S. Investigation of defects in organic anti-corrosive coatings using electrochemical noise measurement. *Progress in Organic Coatings*. 2000. 39.1. Pp. 41–48. https://doi.org/10.1016/S0300-9440(00)00098-9

7. Syasko V. A. The high voltages spark testing method for protective and functional dielectric coatings on a conductive substrate. Increasing sensitivity and results reliability. *Proceedings of 58th Annual Conference of the British Institute of Non-Destructive Testing, NDT*. 2019. Vol. 58. Pp. 265–274.

8. ASTM G62–14; Standard Test Methods for Holiday Detection in Pipeline Coatings. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2014.

9. ASTM D6747-15; Standard Guide for Selection of Techniques for Electrical Leak Location of Leaks in Geomembranes, 2015.

10. NACE SP0188-2006. Discontinuity (Holiday) Testing of New Protective Coatings on Conductive Substrates, 2006.

11. Musikhin A.S., Syasko V.A. Electrospark testing of the continuity of protective paint coatings. *In the World of Non-Destructive Testing*. 2018. Vol. 21. Pp. 42–45.

12. Danikas M. G., Morsalin S. Foreign Inclusions, Enclosed Cavities, Partial Discharge Models and Discharge Energy: A Short Review Regarding Solid Dielectrics and Composite Insulating Systems. *Engineering, Technology & Applied Science Research*. 2019. No. 9. P. 5. https://doi.org/10.48084/etasr.2958

13. Musikhin A. S. Electrospark testing of continuity and unacceptable thinning of dielectric coatings: specialty 2.5.9: dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / Musikhin Aleksei Sergeevich. Saint Petersburg, 2023.

14. Varivodov V.N., Kovalev D.I., Zhulikov S.S. et al. Prevention of partial discharges in the solid insulation of high-voltage current conductors. *Electr. Eng*. 2021. No. 8. Pp. 30–34. https://doi.org/10.3103/S1068371221080125

15. Starikova N.S., Redko V.V. Investigation of methods for controlling insulation integrity in the region of weak and strong electric fields. *Vestnik nauki Sibiri*. 2013. No. 3. Pp. 55–59.

16. Syasko V., Musikhin A., Gnivush I. Improvement of methods and devices for multi-parameter high-voltage testing of dielectric coatings. *Coatings*. 2024. Vol. 14. P. 427. https://doi.org/10.3390/coatings14040427

17. IEC 60270:2000; High-voltage test techniques: partial discharge measurements. International Electrotechnical Commission (IEC), Geneva, 2000.

18. Sergeev I.I. On the measurement of partial discharges. *Energetik*. 2016. No. 9. Pp. 41–46.

19. Martínez-Tarifa J.M., Granado J., Robles G. Efficient metrics for the detection of partial discharges under steep-fronted voltage pulses. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2022. Vol. 141. P. 108159. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108159

20. Heckert N. A. et al. *Handbook 151: Nist/sematech e-handbook of statistical methods*. 2002.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Владимир Александрович Сясько — д-р техн. наук, профессор, Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, Санкт-Петербург, Российская Федерация
e-mail: 9334343@gmail.com

Алексей Сергеевич Мусихин — канд. техн. наук, инженер, ООО «Константа», Санкт-Петербург, Российская Федерация
e-mail: musihinalexei@mail.ru

Игорь Сергеевич Гнивуш — аспирант, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Российская Федерация
e-mail: klin4_g@mail.ru

Мария Сергеевна Степанова — аспирант, Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, Санкт-Петербург, Российская Федерация
e-mail: mar1a.s.s@yandex.ru

ABOUT THE AUTHORS

Vladimir Alexandrovich Syasko – Dr. of Sci. in Engineering, Professor, D.I. Mendeleev Institute for Metrology (VNIIM), Saint Petersburg, Russian Federation
e-mail: 9334343@gmail.com

Aleksei S. Musikhin – Cand. of Sci. in Engineering, Engineer, LLC “KONSTANTA”, Saint Petersburg, Russian Federation
e-mail: musihinalexei@mail.ru

Igor S. Gnivush – Postgraduate Student, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation
e-mail: klin4_g@mail.ru

Maria S. Stepanova – Postgraduate Student, D.I. Mendeleev Institute for Metrology (VNIIM), Saint Petersburg, Russian Federation
e-mail: mar1a.s.s@yandex.ru

Поступила в редакцию 12.02.2026
После доработки 12.03.2026
Принята к публикации 13.03.2026

Received Febuary 12, 2026
Revised March 12, 2026
Accepted March 13, 2026