

На правах рукописи

**МУСИХИН Алексей Сергеевич**

**ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ КОНТРОЛЬ СПЛОШНОСТИ И НЕДОПУСТИМЫХ  
УТОНЕНИЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ**

2.5.9. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2023

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии Всероссийском научно-исследовательском институте метрологии имени Д.И. Менделеева.

**Научный руководитель:** **Литвинов Борис Яковлевич**, доктор технических наук, доцент главный научный сотрудник, профессор кафедры «Теоретическая и прикладная метрология» в федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева», г. Санкт-Петербург.

**Официальные оппоненты:** **Назарычев Александр Николаевич**, доктор технических наук, профессор, заместитель проректора по подготовке научных кадров Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет», профессор кафедры «Электроэнергетики и электромеханики», г. Санкт-Петербург.

**Титков Василий Васильевич**, доктор технических наук, профессор «Высшей школы высоковольтной энергетики» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург.

**Ведущая организация:** Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт Транснефть», г. Москва.

Защита состоится «15» июня 2023 г. в 11 ч. 00 мин. на заседании объединенного диссертационного совета 99.1.087.02 по адресу: 620077, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФМ УрО РАН и на сайте [www.imp.uran.ru](http://www.imp.uran.ru).

Автореферат разослан «14» апреля 2023 г

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук

Василенко Ольга Николаевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Научно-технический прогресс в областях, связанных с защитой различных систем от атмосферных и антропогенных воздействий, способствовал расширению применения диэлектрических антикоррозионных и гидроизоляционных покрытий. Одновременно с ростом применения диэлектрических покрытий большое практическое значение приобретает проблема оценки их технического состояния и продления срока службы изделий, что подтверждается опытом эксплуатации различных типов промышленных металлических изделий, в том числе на объектах магистрального трубопроводного транспорта [1, 2].

Одним из основных требований к таким покрытиям является обеспечение стопроцентной сплошности покрытий, нарушениями которой являются такие дефекты как непрокрасы, сквозные и несквозные поры, трещины, отрывы, проколы и т.д. Также в силу того, что рост промышленного использования защитных покрытий привел к расширению их номенклатуры, все большее распространение получают новые типы лакокрасочных покрытий, наносимых в несколько визуально неразличимых слоев. Но в случае нарушения технологии нанесения количество слоев покрытия может не соответствовать заявленному, что значительно сокращает срок службы покрытия и изделия в целом. Таким образом, помимо выявления сквозных дефектов сплошности существует задача контроля количества слоев конечной системы – недопустимых утонений покрытия.

На сегодняшний день в мировой практике для выявления сквозных дефектов диэлектрических покрытий используется ряд методов электрического, теплового и визуального неразрушающего контроля (НК). Из них наибольшее распространение получил электроискровой метод НК [3]. Метод имеет ряд преимуществ в скорости, достоверности и удобстве проведения контроля. Однако согласно существующим методикам НК, в которых должным образом не проработаны вопросы выбора испытательного напряжения, метод не может применяться для покрытий толщиной менее 500 мкм [4, 5]. Современные методики выбора испытательного напряжения, прикладываемого с использованием электрода к поверхности покрытия, отраженные в отечественных и зарубежных стандартах, применимы для выявления только сквозных дефектов покрытий, при этом не уделяется внимания несквозным порам и недопустимым утонениям покрытий при существенном ограничении нижней границы диапазона толщин покрытий, что особенно актуально для выявления сквозных дефектов во внутренних покрытиях трубопроводов различного назначения [6, 7].

С другой стороны, в настоящее время для выявления недопустимых утонений производятся измерения толщины сухого слоя диэлектрических покрытий с использованием электромагнитных, вихретоковых и акустических методов НК. Однако измерения, осуществляемые этими методами, как правило, проводятся только

в отдельных точках покрытия, то есть на изделиях большой площади и протяженности существует риск недобраковки (пропуска недопустимых утонений), в то время как при электроискровом контроле испытанию подвергается 100 % площади объекта контроля. Поэтому представляется эффективным производить допусковый контроль утонений электроискровым методом одновременно с выявлением сквозных дефектов покрытий при снижении минимальной контролируемой толщины покрытий.

**Степень разработанности темы исследования.** Изучением теоретических и практических основ формирования искрового разряда в газе и твердом диэлектрике, а также теоретическими основами электроискрового метода НК занимались ряд российских и зарубежных ученых: Г.А. Воробьев, А.С. Смирнов, Н.С. Галеева, В.В. Редько, Ю.П. Райзер, В.Ю. Чертищев, Э.Н. Ибрагимова, Я.М. Гаджиев, J.M. Meek, J.D. Griggs, D.D. Byerley, A.S. Davies.

Однако до настоящего времени применительно к электроискровому методу НК практически не исследовались зависимость электрической прочности воздушного промежутка сквозного дефекта от его размера, влияние ряда геометрических и электрофизических параметров электродов на чувствительность и достоверность контроля (вероятность выявления дефектов покрытия). В существующих стандартных методиках не уделяется должное внимания вопросам формирования испытательного напряжения (постоянного или импульсного), полярности его приложения, влиянию неоднородности электрического поля на величину необходимого испытательного напряжения, что значительно ограничивает применение данного метода. Предполагается, что учет вышеописанных факторов, определяющих характер и протекание процессов электроискрового пробоя дефектных участков покрытия, позволит производить электроискровой НК покрытий в расширенном диапазоне толщин (от 50 мкм до 25 мм) с большей эффективностью.

**Целью** данной работы является повышение эффективности электроискрового НК (расширение номенклатуры и диапазона толщин покрытий, увеличение количества типов выявляемых дефектов), а также достоверности электроискрового НК, характеризуемой вероятностью обнаружения дефекта для заданных параметров испытательного напряжения, при контроле диэлектрических покрытий, нанесенных на электропроводящее основание, путем совершенствования методических принципов электроискрового метода НК, разработки моделей процессов контроля, а также оптимизации конструктивных решений и режимов работы оборудования.

В соответствии с поставленной целью сформулированы и решены следующие **задачи:**

1. Теоретическое обоснование применимости электроискрового метода НК для выявления мест несплошности и недопустимых утонений диэлектрических покрытий в широком диапазоне их электрических параметров и толщин.

2. Теоретический и экспериментальный анализ физических процессов формирования искрового разряда в дефектных и бездефектных областях диэлектрических покрытий с учетом параметров объекта контроля, воздушной среды, конструкции и режимов работы оборудования, реализующего электроискровой метод НК, влияющих на эффективность и достоверность контроля.

3. Разработка новых подходов к конструированию устройств формирования сильнонеоднородного электрического и приложения импульсного электрического напряжения к контролируемому покрытию, повышающих чувствительность и расширяющих диапазон толщин и номенклатуру типов контролируемых покрытий.

4. Разработка проекта методики электроискрового контроля диэлектрических покрытий, позволяющей выявлять сквозные и несквозные дефекты диэлектрических покрытий в расширенном диапазоне их электрических параметров и толщин.

5. Экспериментальные исследования разработанных методик электроискрового контроля диэлектрических покрытий в лабораторных и производственных условиях.

**Объект исследования** – диэлектрические покрытия на электропроводящих основаниях.

**Предмет исследования** – физические механизмы формирования искрового разряда в дефектных областях диэлектрических покрытий при проведении электроискрового контроля.

**Научная новизна работы:**

Научная новизна полученных в диссертации результатов может быть сформулирована в виде следующих положений:

1. Установлено, что применение сильнонеоднородного электрического поля в системе «электрод – диэлектрическое покрытие – электропроводящее основание» позволяет расширить диапазон толщин (в меньшую сторону до 50 мкм) и увеличить номенклатуру контролируемых покрытий. Предложены принципы формирования и расчета таких полей.

2. Впервые разработаны модели распределения напряженности однородных и сильнонеоднородных полей систем «электрод – покрытие с дефектом – электропроводящее основание» для различных форм и размеров электродов, позволившие расширить диапазон покрытий, доступных для контроля за счет формирования в зоне контроля сильнонеоднородного электрического поля.

3. Установлены теоретические и экспериментальные зависимости электрической прочности сквозных цилиндрических дефектов от электрических параметров диэлектрических покрытий и параметров воздушной среды в однородных и сильнонеоднородных электрических полях.

4. Получены теоретические и экспериментальные зависимости величины испытательного напряжения от электрических и геометрических параметров диэлектрического покрытия при проведении допускового контроля его толщины для сильнонеоднородных электрических полей.

5. Установлена и обоснована необходимость учета полярности испытательного напряжения при проведении контроля в зависимости от неоднородности формируемого электрического поля и толщины покрытия.

#### **Теоретическая значимость работы.**

1. Полученные в работе результаты моделирования распределения напряженности электрического поля в контролируемых бездефектных и дефектных областях покрытий, а также экспериментальные результаты измерения пробивного напряжения сквозных дефектов покрытий, позволяют расширить диапазон толщин диэлектрических покрытий доступных для контроля электроискровым методом, до значений 50 мкм ÷ 25 мм.

2. Формирование сильнонеоднородного электрического поля в процессе электроискрового контроля, а также приложение к контролируемому покрытию напряжения положительной полярности позволяют понизить пробивное напряжение сквозных дефектов диэлектрических покрытий в широком диапазоне толщин.

3. Разработанный алгоритм получения данных об электрической прочности контролируемых диэлектрических покрытий позволяет производить допусковой контроль толщины таких покрытий и повышает эффективность исследуемого метода.

4. Полученные теоретические и экспериментальные зависимости электрической прочности диэлектрических покрытий от их толщины, позволяют оценить вероятность выявления дефектов покрытия с заданными параметрами при выбранных режимах контроля.

#### **Практическая значимость работы.**

1. Разработан проект методики, позволяющей выявлять сквозные и несквозные дефекты диэлектрических покрытий на электропроводящих основаниях электроискровым методом неразрушающего контроля.

2. Разработаны конструкции дефектоскопа и электродов, а также разработаны методики их применения, которые позволяют выявлять сквозные дефекты в покрытиях, имеющих электрическую прочность, близкую к электрической прочности воздуха.

3. Полученные практические результаты использованы при разработке серии ручных и автоматизированных электроискровых дефектоскопов «Корона», производимых ООО «КОНСТАНТА». Дефектоскопы используются для выявления сквозных дефектов покрытий в диапазоне толщин от 50 мкм до 25 мм на таких предприятиях, как ПАО «Транснефть», «Ижевский завод изоляции труб»,

«Выксунский металлургический завод», «НПО Выбор», ПАО «Газпром» и на многих других производственных и эксплуатирующих организациях.

**Методология и методы исследований.** Теоретические исследования основаны на положениях физики процессов образования искрового разряда в газах и твердом теле. Исходя из этих исследований произведена оценка влияния параметров контроля на его результат. Основные положения предложенных методик и разработанного оборудования основаны на теоретическом анализе, расчетах и требованиях нормативно-технической документации.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Формирование сильнонеоднородного электрического поля между электродом и электропроводящим основанием обеспечивает возникновение искрового разряда в зонах нарушения сплошности (воздушных промежутках) при амплитуде испытательного напряжения, исключая пробой диэлектрического покрытия, расширяет диапазон контролируемых толщин и увеличивает количество типов материалов.

2. Научно-методические принципы построения систем электродов и аналитические зависимости расчета их параметров, а также режимов формирования электрического поля для предложенной вероятностной оценки метрологических параметров позволили создать семейство электроискровых импульсных дефектоскопов и методик их применения для электроискрового контроля диэлектрических покрытий на электропроводящих основаниях в расширенном диапазоне толщин от 50 мкм до 25 мм, а также увеличить достоверность выявления дефектов.

**Достоверность результатов диссертационной работы** базируется на строгих теоретических подходах, теоретически и экспериментально обоснованных физико-математических моделях, подтверждается теоретическим обоснованием процесса искрообразования в газах и твердых телах, сравнением с результатами, полученными в работах В.В. Редько, Н.С. Галеевой, Я.М. Гаджиева, а также проверкой результатов многочисленными экспериментами.

Результаты диссертационной работы использованы при разработке серии электроискровых дефектоскопов «Корона», производитель ООО «КОНСТАНТА», и методик контроля. Полученные результаты позволили применить разработанные электроискровые дефектоскопы для контроля лакокрасочных и других покрытий малой толщины, а также для выявления недопустимых утонений, в частности недопустимого количества слоев лакокрасочных покрытий.

**Личный вклад автора в работу.** Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы.

Все представленные в диссертации результаты получены лично автором. Постановка цели и задач исследования проводилась автором совместно с научным руководителем. Автором проведен теоретический анализ процессов искрообразования в воздухе и твердом теле диэлектрических покрытий, получены расчетные и экспериментальные данные, выполнена статистическая обработка, проведен анализ параметров объекта контроля, метода и оборудования на результаты контроля. Автором было выявлено влияние неоднородности и полярности электрического поля в межэлектродном промежутке на пробивное напряжение сквозных дефектов покрытия, проведено математическое моделирование распределения напряженности электрического поля в сквозных и несквозных дефектах покрытия для электродов разной формы, предложены общие конструктивные принципы создания контролируемых электродов для электроискровых дефектоскопов, было предложено перейти от индикаторной оценки результатов контроля к оценке вероятности обнаружения дефекта покрытия с заданной остаточной толщиной покрытия. Автором была разработана методика экспериментальной оценки вероятности обнаружения дефекта в покрытии известной толщиной при заданном испытательном напряжении на основании стандартного образца.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы доложены на 58-ой и 59-ой Британских конференциях по неразрушающему контролю (Телфорд, Великобритания, 2019, 2020), Европейских днях неразрушающего контроля ENDT & CM 2021 (Прага, 2021), XXXII и XXXIII Уральских конференциях «Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)» (молодежная секция) (Екатеринбург, 2020, 2022), международной конференции «Коррозия в нефтегазовой отрасли» (Санкт-Петербург, 2019), II Международной научно-практической конференции «Измерительная техника и технологии контроля параметров природных и техногенных объектов минерально-сырьевого комплекса» (Санкт-Петербург, 2019), XXII Всероссийской научно-технической конференции по неразрушающему контролю и технической диагностике (Москва, 2020), молодежной научно-технической конференции в рамках форума «Территория НДТ 2021» (Москва, 2021).

**Публикации.** Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 6 печатных работах, в том числе в 3 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент на полезную модель.

**Соответствие паспорту научной специальности.** Полученные автором научные результаты соответствуют области исследования специальности 2.5.9. «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и

природной среды)», так как посвящены усовершенствованию электроискрового метода неразрушающего контроля диэлектрических покрытий на электропроводящих основаниях, что соответствует п.1 перечня направлений исследований научной специальности.

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка и трех приложений. Содержит 139 страниц машинописного текста, 69 рисунков, 7 таблиц, библиографический список из 93 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** дана общая характеристика работы, обоснована ее актуальность, сформулированы цель, задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы, представлены выносимые на защиту научные положения.

**В первой главе** представлен обзор объектов контроля и дефектов диэлектрических покрытий электропроводящих оснований. Проведен сравнительный анализ методов неразрушающего контроля и приборов, позволяющих выявлять дефекты сплошности покрытия, измерять его толщину.

В настоящее время электроискровой метод НК используется для выявления сквозных дефектов в защитных покрытиях широкого ряда электропроводящих (в том числе, металлических и бетонных) изделий магистрального трубопроводного транспорта, транспортного и промышленного машиностроения, объектов капитального строительства и др.

В процессе контроля электроискровым методом НК в области покрытия формируется электрическое поле высокой напряженности. За счет того, что дефектные участки покрытия имеют электрическую прочность меньшую, чем бездефектное покрытие, при соответствующей напряженности формируемого электрического поля в области дефектов формируется искровой разряд (рисунок 1) [8].

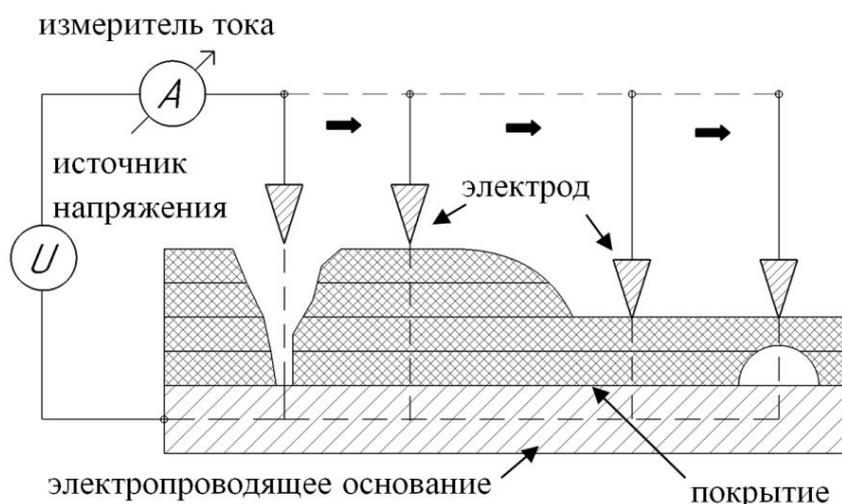


Рисунок 1 – Схематичное изображение принципа электроискрового контроля диэлектрических покрытий

При этом, по сравнению с другими методами НК, позволяющими выявлять сквозные дефекты покрытий и контролировать их толщину, электроискровой метод НК имеет преимущество в скорости и технологичности проведения контроля, что активно используется при контроле внешних и внутренних покрытий труб различного назначения, металлических резервуаров, кровельных покрытий и т.д.

С другой стороны, недостатки принципов формирования электрического поля и методик применения метода, недоработки нормативных аспектов эксплуатации и имеющиеся на данный момент оборудование накладывают ряд ограничений на использование метода. Так, существующие методики НК не позволяют проводить контроль сплошности покрытий толщиной менее 500 мкм (т.е. большинства лакокрасочных покрытий) и не позволяют выявлять такие дефекты, как недопустимые утонения.

Исходя из выполненного анализа обозначенных проблем в конце первой главы были сформулированы цель и задачи научного исследования.

**Во второй главе** Рассчитаны зависимости испытательного напряжения, обуславливающие возникновение искрового разряда в сквозном и несквозном дефектах диэлектрических покрытий электропроводящих изделий с учетом параметров воздушной среды и покрытий. Выделены информативные параметры и влияющие параметры, определяющие достоверность процесса контроля.

Так как различия в механизмах формирования пробоя в различных видах дефектов объекта контроля накладывают ограничения на выбор  $U_{и}$ , то, для его определения необходимо рассматривать отдельно выявление сквозных (формирование пробоя в воздухе) и несквозных дефектов покрытий (формирование пробоя в покрытии).

В работе воздух рассматривается как среда, которая заполняет область в, которой покрытие отсутствует, в силу того, что электроискровой метод НК используется при атмосферном давлении на открытом воздухе либо в помещении. И так как сквозные дефекты покрытия, как правило, заполнены воздухом и толщина подавляющего большинства диэлектрических покрытий лежит в диапазоне от 50 мкм до 15 мм, для анализа механизмов формирования искрового разряда в воздушных (разрядных) межэлектродных промежутках с расстоянием  $d_{п}$  между ними представляется оптимальным использование Таунсендовской теории электрического пробоя газов [9].

Согласно этой теории пробивное напряжение  $U_{пв}$  зависит от состава и давления газа, межэлектродного расстояния (толщины покрытия  $d_{п}$ ):

$$U_{пв} = \frac{B_0 \cdot P \cdot d_{п}}{\ln \frac{A_0 \cdot P \cdot d_{п}}{\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}}$$

где  $P$  – давление газа,  $A_0$  – коэффициент, зависящий от состава газа,  $B_0$  – коэффициент, зависящий от энергии ионизации газа,  $d_{\text{п}}$  – толщина покрытия,  $\gamma$  – коэффициент вторичной ионизации. Для воздуха формула дает результаты, согласующиеся с результатами экспериментов в диапазоне толщин покрытий от 0,1 до 50 мм (при  $P = 10^5$  Па).

Также следует учитывать, что при  $P = \text{const}$ , определяемом атмосферным давлением, уменьшение  $d_{\text{п}}$  до 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, при традиционных методиках контроля для возникновения ударной ионизации (пробоя воздушного промежутка) необходимо увеличивать величину испытательного напряжения  $U_{\text{и}}$  (увеличивать напряженность поля  $E$  в межэлектродном промежутке). В свою очередь, выполненный теоретический анализ показал, что на локальное увеличение напряженности воздушных промежутков влияет неоднородность электрического поля и его полярность, при том, что на пробивное напряжение твердых диэлектриков (покрытия)  $U_{\text{пр}}$  вышеуказанные параметры влияния практически не оказывают.

Для гарантированного исключения возможности получения ложноположительного результата при контроле, а также для обнаружения дефектов покрытий типа недопустимое утонение, необходимо знать электрическую прочность контролируемого покрытия. В силу того, что электрическая прочность диэлектрика сильно зависит от его структуры (структуры кристаллической решетки, химического состава, анизотропии свойств и т.д.) [10], то расчет электрической прочности необходимо производить для каждого покрытия отдельно.

Анализируя существующие эмпирические и полуэмпирические уравнения, основные на теории возникновения пробоя вследствие ударной ионизации электронами, описывающие электрическую прочность твердых диэлектриков, можно выделить уравнение, которое позволяет учесть внутреннюю структуру диэлектрика можно учесть с помощью энергетической характеристики  $A_c^0$  называемой энергией каналообразования. На базе этого утверждения Ю.Н. Вершининым была предложена зависимость для расчета  $E_{\text{пр}}$  для широкого круга электроизоляционных материалов:

$$E_{\text{пр}} = K \cdot K_B \cdot (A_c^0)^{1.1} \cdot \exp\left(\frac{a}{b + \lg(d)} + \frac{m}{n + \lg(\tau)}\right),$$

где  $K$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от толщины диэлектрика  $d$ ,  $\tau$  – длительность воздействия приложенного напряжения [мкс],  $K_B$  – вероятность пробоя,  $A_c^0$  – энергия каналообразования,  $a$ ,  $b$ ,  $n$ ,  $m$  – некоторые постоянные, полученные при статистической обработке данных электрической прочности диэлектриков.

Зависимость достаточно универсальна и может применяться при расчетах условия пробоя для различных электроизоляционных материалов толщиной от 0,01 до 40 мм при длительности импульса приложенного контрольного напряжения  $\tau_{\text{имп}} = 0,1 - 10$  мкс.

Так, для покрытия Parylene-N изготавливаемого из поли-*n*-ксилена (ППК) расчётная электрическая прочность составила  $E_{\text{пр}} = 324,8$  кВ/мм.

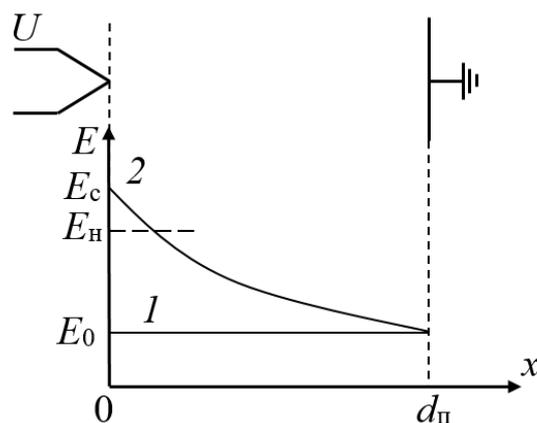
При этом, справочные данные экспериментально полученных значений  $E_{\text{пр}} = 260-300$  кВ/мм. При сравнении результатов расчета и эксперимента видно, что в основном имеется удовлетворительное количественное совпадение данных эксперимента и расчета.

Следует отметить, что определение  $E_{\text{пр}}$  по приведенной зависимости применимо для однокомпонентных одно- или многослойных покрытий, параметры которых возможно найти в справочной литературе. Такие покрытия, как правило находят узкоспециализированное применение для объектов, к которым применяются повышенные требования по температурной стойкости, влагозащите или диэлектрическим характеристикам. Вместе с тем следует учесть, что требуемые параметры многокомпонентных покрытий (например, лакокрасочных), которые массово применяются для защиты от влаги и атмосферных воздействий металлических объектов, в ряде случаев не нормируются [11]. Поэтому  $E_{\text{пр}}$  многокомпонентных покрытий или покрытий,  $E_{\text{пр}}$  которых не удастся определить расчетным путем, должны определять экспериментально.

Результаты второй главы опубликованы в работах [А1] и [А5].

**В третьей главе** исследовано влияние неоднородности распределения электрического поля, формируемого системой электродов в зоне контроля, на пробивное напряжение воздушных промежутков сквозных дефектов покрытий. Также исследовано влияние полярности импульсного испытательного напряжения на величину пробивного напряжения воздушных промежутков сквозных дефектов покрытий. Показано влияние формы электрода на выявляемость дефектов при электроискровом контроле. Теоретически и экспериментально подтверждена возможность выявления недопустимых утонений диэлектрических покрытий электроискровым методом НК в расширенном диапазоне толщин покрытий – от 50 мкм до 25 мм при соответствующей неоднородности электрического поля и его полярности.

В общем случае, в неоднородном поле напряженность  $E$  в различных точках межэлектродного промежутка отличается по величине и по направлению. Такие поля могут создаваться при использовании пар электродов стержень – стержень, стержень – плоскость (рисунок 2).



1 – система электродов плоских электродов; 2 – система электродов, заостренный стержень – плоскость на оси стержня.

Рисунок 2 – Система электродов заостренный стержень – плоскость и соответствующие ей зависимости напряженности электрического поля в межэлектродном промежутке

Для рассматриваемых задач наибольший интерес представляет пара стержень – плоскость, так как контролирующий электрод в подавляющем большинстве случаев имеет размер, много меньший размера электропроводящего основания.

Известно, что в однородных полях, например, в системе плоских электродов, у которых напряженность  $E_0$  меньше некоторой напряженности  $E_n$ , соответствующей возникновению самостоятельной формы разряда, коронный и искровой разряды не возникают. Однако в сильнонеоднородном поле (например, в системе электродов заостренный стержень – плоскость) возможна ситуация, при которой в области, прилегающей к стержню, напряженность поля  $E_c > E_n$ . При этом возникает самостоятельный коронный разряд, локализованный в этой области. При небольшом повышении напряженности поля в промежутке ( $E_{\text{ср}} < E_n$ ) область коронного разряда будет продвигаться от стержня к плоскому электроду. При достижении плоского электрода во всем воздушном промежутке образуется стример.

В главе показано, что, формируя в межэлектродном промежутке сильнонеоднородное распределение напряженности электрического поля, можно при фиксированной толщине контролируемого покрытия и прочих равных условиях формировать искровой разряд при меньшем испытательном напряжении. Следовательно, форма контролирующего электрода может оказывать влияние на минимальное испытательное напряжение, а значит, и на диапазон покрытий, доступных для контроля, что особенно актуально для контроля покрытий толщиной менее 500 мкм (в том числе лакокрасочных).

Для подтверждения влияния неоднородности электрического поля были построены конечно элементные модели электродов, формирующих квазиоднородное и резконеоднородное электрические поля в сквозном дефекте покрытия (рисунок 3).

Также были проведены измерения пробивного напряжения на образцах толщиной 100, 180, 290, 470 и 1000 мкм. Результаты исследований приведены на рисунке 4.

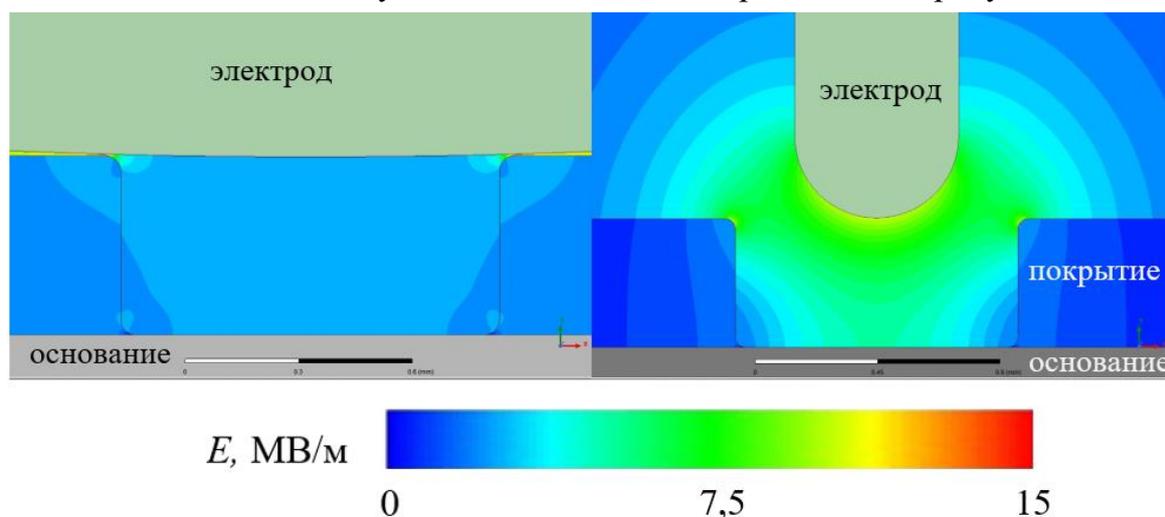


Рисунок 3 – Конечно-элементная модель распределения напряженности электрического поля в покрытии со сквозным дефектом диаметром 1 мм. стержень диаметром 0,6 мм, шар диаметром 40 мм

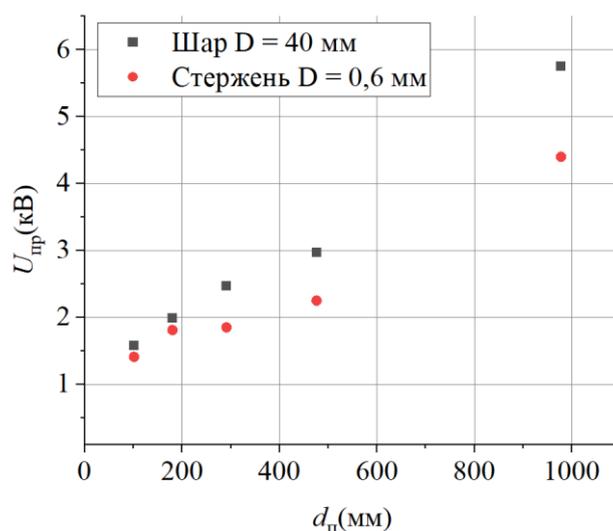


Рисунок 4 – Зависимость пробивного напряжения сквозного дефекта покрытия от толщины покрытия для электродов шар диаметром 40 мм и стержень диам. 0,6 мм

Измерения показали, что значения  $U_{пр}$  для электрода в форме шара превышают аналогичные значения для стержня. Причем разница в значениях  $U_{пр}$  уменьшается при уменьшении толщины образцов, что согласуется с теорией. Экспериментально полученные значения пробивного напряжения меньше во всем диапазоне для обоих электродов (расчетное значение  $U_{пр} = 8,84$  кВ для  $d_n = 1000$  мкм). Также результаты моделирования показали, что градиент напряженности поля на оси стержня больше, чем на оси шара (рисунок 5).

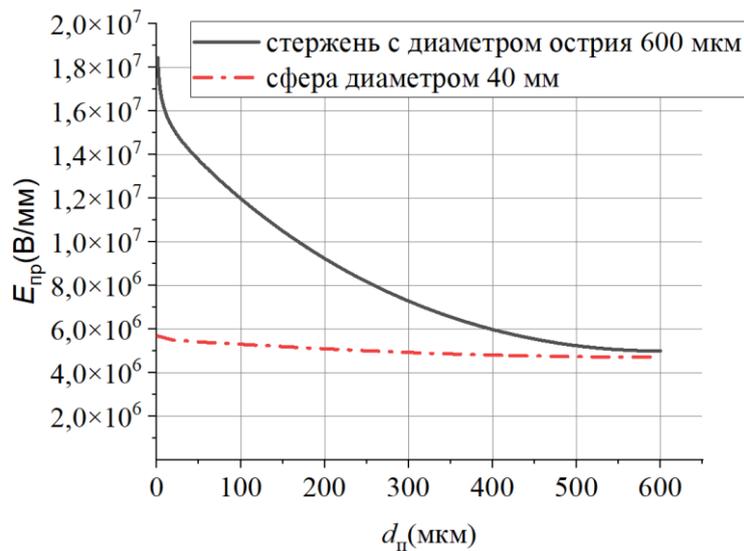
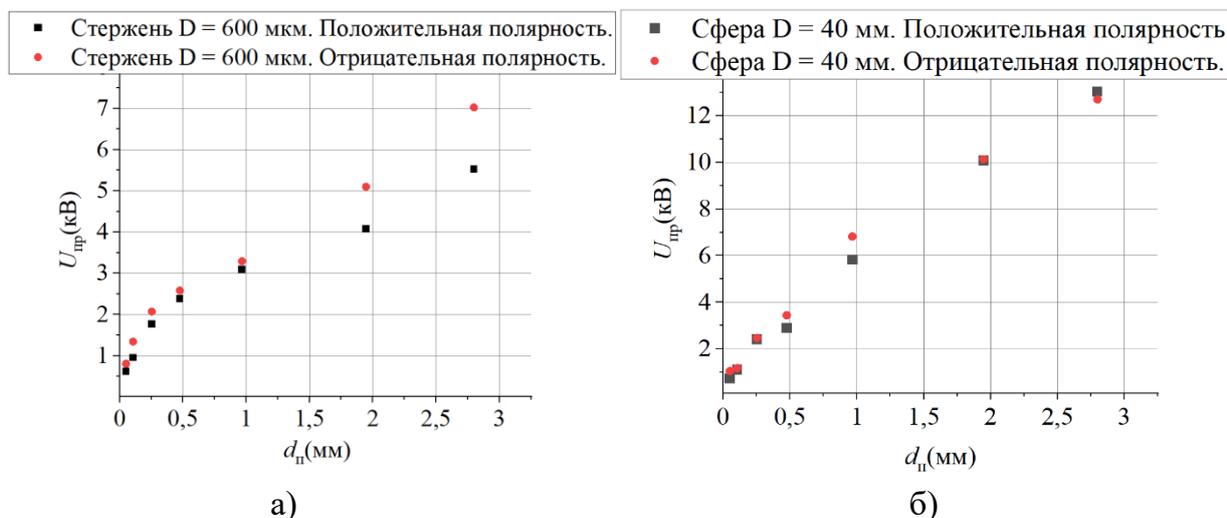


Рисунок 5 – Распределение напряженности электрического поля на оси стержня в межэлектродном промежутке

Переходя к анализу влияния полярности испытательного напряжения как фактора, влияющего на результаты контроля, стоит отметить, что в процессе контроля на электрод может подаваться напряжение различной формы и длительности. Отмечено, что влияние полярности в однородных и слабонеоднородных полях (например, при выявлении сквозных дефектов покрытий протяженными резиновыми электродами), где минимальный и средний градиенты напряжения мало отличаются друг от друга, невелико. В сильнонеоднородных полях при несимметричных электродах (например, контроле с использованием веерных или щеточных электродов) полярность  $U_{и}$  оказывает существенное влияние на величину  $U_{пр}$ . При положительной полярности острия имеющиеся в промежутке электроны, двигаясь к острию в область сильного поля, совершают ударную ионизацию и образуют лавину электронов. Когда лавина доходит до острия, электроны лавины нейтрализуются на аноде, а положительные ионы вследствие малой скорости движения остаются у острия и создают положительный объемный заряд, который обладает собственным электрическим полем. Взаимодействуя с внешним полем в промежутке, положительный объемный заряд будет ослаблять поле вблизи острия и усиливать его в остальной части промежутка. 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. Зажигается стримерный коронный разряд. Положительные заряды этой лавины будут располагаться на головке стримера и создавать область повышенной напряженности во внешнем пространстве. Таким образом, наличие области сильного поля обеспечивает образование новых лавин, электроны которых втягиваются в канал стримера, постепенно удлиняя его. Стример прорастает к катоду, вызывая пробой промежутка (искровой разряд) при

сравнительно малой величине разрядного напряжения. Все это приводит к тому, что  $U_{пр}$  при положительной полярности острия меньше, чем при отрицательной полярности (рисунок 6).



а) для системы электродов стержень – плоскость при положительной и отрицательной полярности стержня, б) для системы электродов шар – плоскость при положительной и отрицательной полярности стержня.

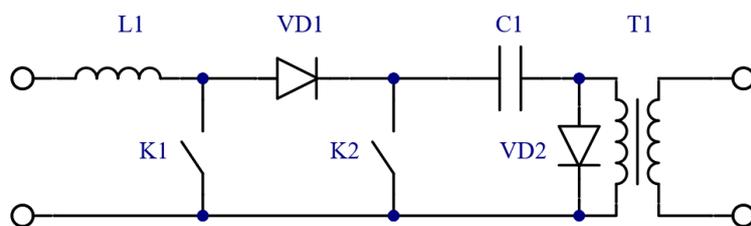
Рисунок 6 – Зависимости пробивного напряжения сквозного дефекта покрытия от толщины покрытия

Все вышеперечисленное было подтверждено данными экспериментов по определению пробивного напряжения сквозных дефектов покрытий заданной толщины в зависимости от полярности приложенного импульсного напряжения. Длительность импульса была уменьшена до 18 мкс, амплитуда импульса изменялась от 0,5 до 15 кВ. Полученные зависимости показали увеличение  $U_{пр}$  при смене полярности контролирующего электрода на отрицательную примерно в 2 раза.

Результаты третьей главы опубликованы в работах [А3] и [А4].

**В четвертой главе** разработаны общие конструктивные принципы построения электродов, формирующих сильнонеоднородное поле, а также усовершенствованы конструкции плоских резиновых электродов. Разработана схема формирования импульсного испытательного напряжения, позволяющая формировать одиночный импульс положительной полярности длительностью не более 30 мкс. Показана возможность оценки вероятности обнаружения недопустимых утонений электроискровым методом НК различных типов дефектов покрытия при заданном испытательном напряжении и разработаны основные положения методики выбора испытательного напряжения для контроля недопустимых утонений покрытия.

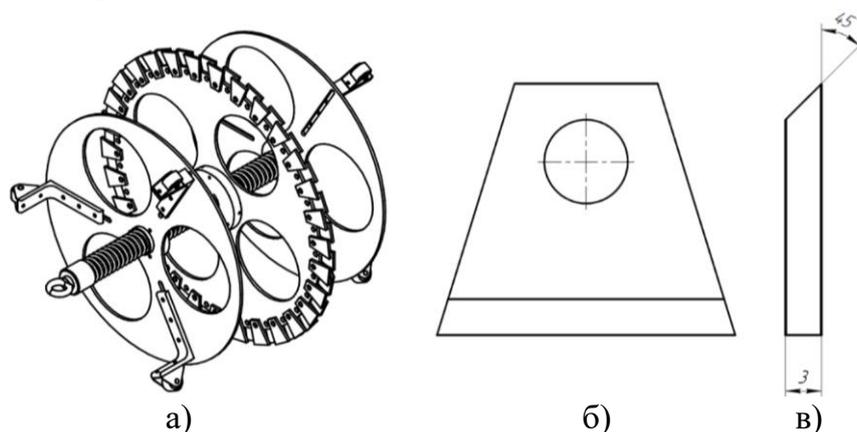
Схема формирования импульсного испытательного напряжения на электроде для электроискровых дефектоскопов представлена на рисунке 7.



$L1$  – индуктивность,  $K1, K2$  – ключи,  $VD1, VD2$  – блокирующие диоды,  $C1$  – батарея накопительных конденсаторов,  $T1$  – высоковольтный повышающий трансформатор  
Рисунок 7 – Структурная схема формирователя высокого напряжения на электроде электроискровых дефектоскопов

Схема позволяет формировать униполярный импульс высокого напряжения на электроде дефектоскопа, повышающий неоднородность электрического поля в контролируемой области покрытий, снижающий пробивное напряжение сквозных дефектов покрытий. Максимальная амплитуда выходного импульса – 45 кВ.

В соответствии с изложенным в главе 3 для формирования сильнонеоднородного электрического поля в дефекте покрытия требуется создание системы электродов типа острие – плоскость, при этом сильнонеоднородное поле должно формироваться именно в объеме сквозного дефекта, т.е. диаметр острия электрода должен быть существенно меньше, чем диаметр контролируемого дефекта (рисунок 3). С учетом вышесказанного был разработан внутритрубный электрод для контроля внутренних покрытий отводных соединений сложной формы (рисунок 8), а также предложены конструктивные принципы создания прочих электродов для электроискровых дефектоскопов.



а) аксонометрическая проекция, б) чертеж лепестка электрода. Вид спереди, в) чертеж лепестка электрода. Вид сбоку.

Рисунок 8 – Схематичное изображение конструкции гибкого внутритрубного электрода

Контролирующие лепестки, выполненные из электропроводящей резины, затачиваются под углом  $45^\circ$ . При этом диаметр острия электрода составляет  $50 \pm 17$  мкм. Особенностью электрода является удержание ориентации электродной части под

прямым углом к внутреннему покрытию трубы, минимизируя таким образом потери мощности, связанные с увеличением емкостной нагрузки.

Как было показано ранее, результаты измерения пробивных напряжений в разных точках покрытия имеют достаточно большой разброс, достигающий до 40 % от среднего значения, что связано с неоднородностью покрытия по толщине, вероятностным характером возникновения разряда, а также невозможностью определения точного местоположения пробоя диэлектрического покрытия. Поэтому целесообразно говорить о выявлении недопустимых утонений заданной толщины с определенной доверительной вероятностью при выбранном испытательном напряжении.

Для экспериментального определения пробивного напряжения бездефектного покрытия и недопустимых утонений был выбран и изготовлен образец ЛКП эмаль MLS 306. Эмаль наносилась в 3, 6 и 9 слоев, имитируя тем самым дефекты типа “недопустимое утонение”. Результаты измерения пробивного напряжения приведены на рисунке 9.

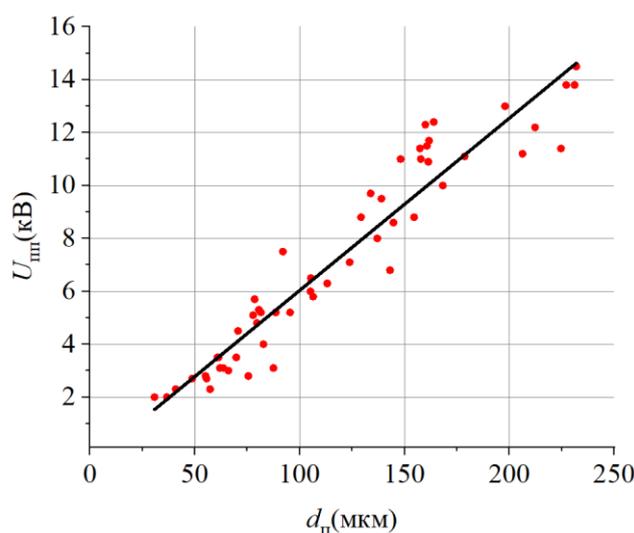


Рисунок 9 – Зависимость пробивного напряжения покрытий  $U_{пр}$  от толщины покрытия  $d_{п}$

Полученные данные имеют явный линейно возрастающий тренд, но достаточно широкий разброс значений относительно среднего значения. Поэтому для оценки вероятности выявления недопустимых утонений заданной толщины предлагается использовать один из математических алгоритмов вероятностной оценки для бинарных данных контроля по критерию «пропущен/выявлен». Для этого был использован алгоритм с численным откликом [12, 13], основанный на регрессионной модели зависимости  $U_{пр}(d_{п})$  и построении на ее основе нормальных функций распределения с заданными параметрами.

На исследуемом участке зависимость  $U_{пр}(d_{п})$  имеет квазилинейный вид. Исходя из этого, по полученным экспериментальным данным была построена линейная регрессия вида  $U = k \cdot d + b$ .

Далее, производилось вычисление дисперсии линии регрессии по формуле:

$$D = \frac{1}{n-2} \cdot \sum_{i=1}^n (U_i - U(d_i))^2$$

Полученная линия регрессии транслировалась в вероятностную зависимость путем использования порога обнаружения и нормальной функции распределения вероятностей вида (рисунок 10):

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

где  $d_n$  – толщина покрытия,  $U_n$  – испытательное напряжение,  $k$ ,  $b$  – параметры линии регрессии,  $\mu$  – математическое ожидание,  $\sigma$  – СКО.

Границы доверительного интервала  $P(U_n)$  для регрессионной модели определялись в соответствии с:

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

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

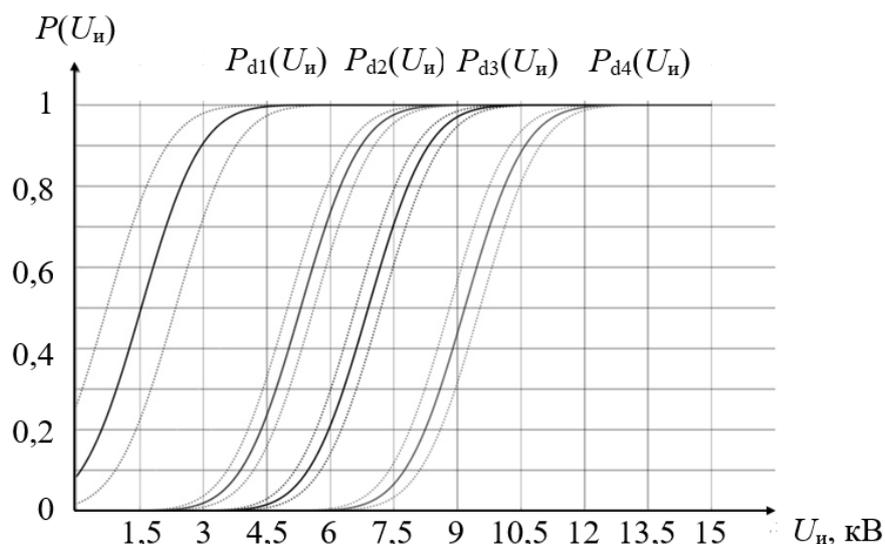


Рисунок 10 – Распределение вероятности пробоя покрытия в зависимости от приложенного напряжения для  $d_1=38$  мкм,  $d_2=89$  мкм,  $d_3=113$ ,  $d_4=148$  мкм

Таким образом, при известном значении электрической прочности покрытия (определенном расчетно или экспериментально) можно с заданной вероятностью выявлять недопустимые утонения, производя контроль испытательным напряжением, величина которого равна  $U_n = E_n / d_n$ . Стоит добавить, что для экспериментального определения электрической прочности контролируемого покрытия необходимо изготовление образцов с параметрами дефектов, идентичных выявляемым.

Результаты четвертой главы опубликованы в работе [А3]. Также получен патент на полезную модель конструкции электрода [А6].

**В пятой главе** выполнены экспериментальные исследования электрической прочности дефектных участков покрытий и методики расчета испытательного напряжения, подтвердившие основные теоретические положения, описаны общие конструктивные принципы создания оборудования, реализующего основные результаты исследований, на основании которых разработана серия электроискровых импульсных дефектоскопов «Корона» с расширенными техническими характеристиками для применения в ручных приборах и автоматизированных системах, позволяющих проводить контроль широкого ряда диэлектрических покрытий на электропроводящих и слабопроводящих основаниях. Разработан проект методики выявления сквозных и несквозных дефектов диэлектрических покрытий, отраженной в ГОСТ 34395 – 2018, применение которой позволяет производить стопроцентный контроль диэлектрических покрытий квазиплоских и сложнопрофильных изделий в диапазоне толщин от 50 мкм до 25 мм без повреждения покрытия испытательным напряжением при ручном и автоматизированном контроле.

Результаты пятой главы опубликованы в работе [А3].

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертации решена актуальная научно-техническая задача повышения эффективности и достоверности электроискрового контроля диэлектрических покрытий, нанесенных на электропроводящее основание, путем совершенствования методических принципов электроискрового метода НК, основанных на разработке моделей распределения напряженности электрического поля в области бездефектных и дефектных участков покрытия, оптимизации режимов формирования и приложения импульсного испытательного напряжения, обработки первичной измерительной информации, также применении новых схмотехнических и конструктивных решений. Выполненные исследования позволили реализовать аппаратную (средства НК) и методическую (нормативные документы) базу для расширения областей применений электроискрового контроля широкой номенклатуры диэлектрических покрытий металлических и бетонных изделий в диапазоне толщин от 50 мкм до 25 мм при повышении чувствительности. На основании проведенных исследований получены нижеперечисленные научные результаты работы.

1. На основании анализа электроискрового метода электрического вида неразрушающего контроля были разработаны модели процессов образования пробоя участков диэлектрического покрытия с типовыми сквозными и несквозными дефектами, учитывающие информативные и влияющие параметры.

2. Обоснована возможность использования электроискрового метода НК для выявления сквозных дефектов в нижнем диапазоне толщин (от 50 мкм и выше) диэлектрических покрытий без нарушения сплошности бездефектных участков при использовании сильнонеоднородных электрических полей и сформулированы практические рекомендации по учету полярности и расчету величины пониженного испытательного напряжения.

3. Полученные теоретические и экспериментальные зависимости электрической прочности покрытий от их толщины, позволяющие определить режимы контроля для выявления недопустимых утонений и оценить вероятность выявления недопустимых утонений при выбранном испытательном напряжении.

4. Сформулированы конструктивные принципы создания электродов для контроля, а также рассчитана и разработана схема формирования коротких импульсов высокого напряжения положительной полярности, исключая эффект реверберации, что позволяет, в том числе, выявлять сквозные дефекты в покрытиях, имеющих электрическую прочность, близкую к электрической прочности воздуха.

5. Разработан проект методики выявления сквозных и несквозных дефектов диэлектрических покрытий, изложенной в ГОСТ 34395 – 2018, применение которой позволяет производить стопроцентный ручной и автоматизированный контроль диэлектрических покрытий квазиплоских и сложнопрофильных изделий в диапазоне толщин от 50 мкм до 25 мм без их повреждения испытательным напряжением.

Внедрение полученных в ходе диссертационной работы результатов в электроискровые дефектоскопы серии «Корона» производства ООО «КОНСТАНТА» позволило повысить эффективность и достоверность стопроцентного ручного и автоматизированного электроискрового контроля широкой номенклатуры покрытий, что, в свою очередь, увеличит срок службы изделий, конструкций и сложных технических сооружений, контроль покрытий которых ранее не осуществлялся с применением электроискрового метода электрического вида НК.

## СПИСОК РАБОТ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ:

А1. Сясько, В.А. Совершенствование электроискрового метода неразрушающего контроля / В.А. Сясько, С.С. Голубев, **А.С. Мусихин** // Контроль. Диагностика. – 2019. – № 12. – С. 4-14.

А2. Сясько В.А. Электроискровой контроль толщины диэлектрических покрытий / В.А. Сясько, С.С. Голубев, **А.С. Мусихин** // Контроль. Диагностика. – 2020. – № 9. – С. 12-17.

А3. Сясько, В.А. Комплексный электроискровой контроль сплошности и недопустимых утонений диэлектрических покрытий / В.А. Сясько, Б.Я. Литвинов, **А.С. Мусихин** // Дефектоскопия. – 2022. – №9. – С. 49-55.

### Публикации в изданиях, индексируемых в базе Scopus:

А4. Syasko, V.A. High voltage testing of functional dielectric coatings with thickness from 25  $\mu\text{m}$  and more / V.A. Syasko, **A.S. Musikhin** // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – №1636(1). DOI:10.1088/1742-6596/1636/1/012008

А5. Syasko, V.A. The high voltages spark testing method for protective and functional dielectric coatings on a conductive substrate. Increasing sensitivity and results reliability / V.A. Syasko, **A.S. Musikhin** // Proceedings of 58th Annual Conference of the British Institute of Non-Destructive Testing, NDT. – 2019. – №58. – pp. 265-274.

### Результаты интеллектуальной деятельности:

А6. Патент № 213724. Российская Федерация, МПК G 01 R 31/12, СПК G 01 R 31/12. Устройство для дефектоскопии внутреннего покрытия труб / В.А. Сясько, **А.С. Мусихин**, А.Ю. Васильев. – № 2021129903; заявл. 13.10.2021; опубл. 26.09.2022, – 2 с.

## СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лакокрасочные покрытия для защиты металлических и полимерных композиционных материалов от старения, коррозии и биоповреждения / Н. И. Нефедов, Л. В. Семенова, В. А. Кузнецова, Н. П. Веренинова // Авиационные материалы и технологии. – 2017. – № 5. – С. 393–404.

2. Гиллер, Г.А. Контроль качества и диагностика магистральных трубопроводов / Г.А. Гиллер, Л.Ю. Могильнер // В мире неразрушающего контроля. – 2001. – № 1(11). – С. 4–9. – EDN XUCLRR.

3. Гаджиев Я.М. Экспериментальное исследование измерения размеров трещин силикатно-эмалевого покрытия трубы / Я.М. Гаджиев, Э.Н. Ибрагимова // Дефектоскопия. – 2020. – № 1. – С. 61–65.

4. ASTM G62 – 14. Standard Test Methods for Holiday Detection in Pipeline Coatings.
5. ГОСТ Р51164 – 98. Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии. – Москва : Изд-во стандартов, 1998. – 46 с.
6. Применение заводских эпоксидных покрытий для антикоррозионной защиты подземных трубопроводов / А.М. Ефремов, П.Д. Волянский, П.О. Ревин, С.В. Ануфриев // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2021. – Т. 11. – № 3. – С. 293-303. – DOI 10.28999/2541-9595-2021-11-3-293-303. – EDN ISZZMD.
7. ГОСТ 9.602- 2016. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. – Москва : ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2016. – 87 с.
8. Ибрагимов, Н.Ю. Дефектоскопическая установка трещиномер силикатных покрытий труб / Н.Ю. Ибрагимов, Э.Н. Ибрагимова // Дефектоскопия. – 2017. – №11. – С. 55-57.
9. Райзер, Ю.П. Физика газового разряда: учебное руководство / Ю.П. Райзер. – 2-е изд. – М. : Наука. 1992. – 536 с.
10. Закревский, В.А. Электрическое разрушение тонких полимерных пленок / В.А. Закревский, Н.Т. Сударь // Физика твердого тела. – 2005. – Т.47(5). – С. 931-936.
11. Редько, В.В. Повышение информативности электроискрового технологического контроля изоляции кабельных изделий/ В.В. Редько, Л.А. Редько, Н.С. Старикова // Ползуновский вестник. – 2013. – № 2. – С. 164-167.
12. Чертищев, 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 / В.Ю. Чертищев // Авиационные материалы и технологии. – 2018. – № 3 (52). – DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-65-79.
13. Вероятностная оценка достоверности результатов ультразвукового неразрушающего контроля конструкций из ПКМ, применяемых в авиационной промышленности / А.С. Бойчук, А.С. Генералов, М.А. Далин, А.В. Степанов // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2013. – №9. – С. 36–39.

МУСИХИН Алексей Сергеевич

**ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ КОНТРОЛЬ СПЛОШНОСТИ  
И НЕДОПУСТИМЫХ УТОНЕНИЙ  
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ**

Автореферат

Подписано к печати 12.04.2023 г.  
Формат 60 × 90 1 /16. Усл. печ. л. 1,5.  
Тираж 85 экз. Заказ № 7616

Отпечатано в типографии ООО «Издательство УМЦ УПИ»  
г. Екатеринбург, ул. Гагарина, 35 а, оф. 2