

Федеральное государственное унитарное предприятие  
«Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии  
имени Д.И. Менделеева»

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

Диссертация  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель –  
доктор технических наук, доцент  
**Литвинов Б.Я.**

Санкт-Петербург – 2023

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	6
<b>ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ (НК) ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ</b> .....	15
1.1. Классификация диэлектрических покрытий изделий из электропроводящих материалов по назначению и анализ задач их контроля.....	15
1.2. Классификация дефектов диэлектрических покрытий и задачи их выявления.....	20
1.2.1. Дефекты лакокрасочных покрытий.....	20
1.2.2. Дефекты битумно-мастичных покрытий.....	23
1.2.3. Дефекты полиэтиленовых покрытий.....	24
1.2.4. Дефекты рулонных гидроизоляционных покрытий.....	25
1.2.5. Обобщенная классификация дефектов диэлектрических покрытий .....	26
1.3. Возможности применения видов и методов НК для выявления дефектов диэлектрических покрытий на электропроводящих основаниях.....	29
1.4. Современное состояние электроискровых приборов НК диэлектрических покрытий.....	37
1.5. Постановка задач исследований .....	45

<b>ГЛАВА 2. ФОРМИРОВАНИЕ ОДНОРОДНЫХ И СИЛЬНОНЕОДНОРОДНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ И РАСЧЕТ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ЭЛЕКТРОИСКРОВОМ КОНТРОЛЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ В РАСШИРЕННОМ ДИАПАЗОНЕ ТОЛЩИН .....</b>	<b>47</b>
2.1. Моделирование однородных и сильнонеоднородных электрических полей в дефектных и бездефектных участках диэлектрических покрытий с учетом параметров и режимов формирования испытательного напряжения .....	48
2.2. Расчет испытательных напряжений при выявлении сквозных и несквозных дефектов в расширенном диапазоне толщин диэлектрических покрытий электроискровым методом НК .....	54
2.3. Влияние электрических и геометрических параметров покрытий и параметров воздушной среды на результаты контроля .....	60
2.4. Выводы к главе 2.....	68
<b>ГЛАВА 3. МЕТОДИЧЕСКИЕ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПОВЫШЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И РАСШИРЕНИЯ ДИАПАЗОНА ТОЛЩИН КОНТРОЛИРУЕМЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО МЕТОДА НК.....</b>	<b>69</b>
3.1. Параметры формируемых неоднородных электрических полей, определяющие чувствительность, диапазон контролируемых толщин покрытий и информативность электроискрового контроля.....	69
3.2. Повышение информативности электроискрового контроля использовании сильнонеоднородных электрических полей .....	71

3.3.	Расширение диапазона контролируемых толщин покрытий при учете полярности испытательного напряжения .....	76
3.4.	Экспериментальное определение пробивных напряжений несквозных дефектов структуры и утонений диэлектрических покрытий при электроискровом контроле .....	81
3.5.	Подавление влияния частичных разрядов на результаты электроискрового контроля .....	84
3.6.	Выводы к главе 3.....	93
<b>ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ, АЛГОРИТМОВ РАБОТЫ И МЕТОДИК ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ДЕФЕКТОСКОПОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ УВЕЛИЧЕНИЕ ИНФОРМАТИВНОСТИ И ДОСТОВЕРНОСТИ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО КОНТРОЛЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ.....</b>		<b>94</b>
4.1.	Разработка схемы формирования импульса испытательного напряжения положительной полярности малой длительности .....	94
4.2.	Разработка конструкции электродов для создания сильнонеоднородного электрического поля.....	97
4.3.	Методики оценки вероятности обнаружения сквозных и несквозных дефектов диэлектрических покрытий электроискровым методом НК	100
4.4.	Оценка вероятности выявления дефектов с заданными параметрами.....	105
4.5.	Выводы по главе 4.....	109

<b>ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИБОРОВ И МЕТОДИКИ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО НК ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ.....</b>	<b>110</b>
5.1. Приборы для выявления сквозных дефектов и недопустимых утонений диэлектрических покрытий на электропроводящих основаниях .....	110
5.2. Системы электроискрового автоматизированного контроля сплошности диэлектрических покрытий в поточном производстве...	115
5.3. Проект методики электроискрового контроля диэлектрических покрытий .....	118
5.4. Выводы по главе 5.....	121
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>122</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>124</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А Акт внедрения ООО «КОНСТАНТА».....</b>	<b>134</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б Патент на полезную модель «Устройство для дефектоскопии внутреннего покрытия труб».....</b>	<b>135</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В Калибровочные сертификаты электроискровых дефектоскопов серии «Корона».....</b>	<b>136</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**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 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. Graggs, 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.

#### **Задачи исследования.**

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.

**Идея работы.** Формирование сильнонеоднородных импульсных электрических полей при соответствующей конструкции электродов с учетом полярности испытательного напряжения и диэлектрических параметров покрытий, позволяет повысить эффективность и достоверность электроискрового метода неразрушающего контроля диэлектрических покрытий на электропроводящих основаниях.

#### **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 сильнонеодородных 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 сильнонеодородного 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 сильнонеодородных 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 сильнонеодородных 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 сильнонеодородного 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

допусковый 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, исключающего 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 контролирующих 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.

# ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

## 1.1. Классификация диэлектрических покрытий изделий из электропроводящих материалов по назначению и анализ задач их контроля

Современные темпы развития мировой промышленности вызывают существенный рост применения диэлектрических покрытий различного назначения. Требования к качеству диэлектрических покрытий также постоянно повышаются [6, 8].

Как известно, покрытия формируют слой с особыми функциональными физическими свойствами и используются для придания этих свойств объекту, на который наносятся. Наиболее часто применяемыми являются диэлектрические покрытия, изготовленные из материалов, обладающих относительно слабой электрической проводимостью, хорошей адгезией к поверхности покрываемого объекта и имеющие способность к поляризации под действием внешнего электрического поля.

Диэлектрические покрытия можно классифицировать по ряду признаков [9, 10, 11, 12, 13].

По функциональным признакам:

1. Защитные – износостойкие, коррозионностойкие, жаростойкие, эрозионно-стойкие, радиационно-стойкие, жаростойкие.
2. Механико-прочностные – прочностные, контактные, вязкопластичные, усталостные.
3. Декоративные – информативные, фактурные, декоративно-защитные.
4. Теплотехнические – изоляционные, холодостойкие, теплопроводные.
5. Светотехнические – отражательные, светопоглощающие, светостойкие.
6. Электроизоляционные.

7. Физико-химические – генерирующие, аккумулирующие, фиксирующие, поглощающие, экранирующие.

8. Биохимические – ядохимикатные, санитарно-химические, биологические.

По типу применяемых материалов: пластмассовые, гуммировочные, битумные, лакокрасочные, силикатные, полиэтиленовые.

По деформационным свойствам: упругие, упругоэластичные, эластичные и пластичные.

По состоянию в момент поставки или по выпускаемой форме материала: монолитные, пастообразные, пленочные, листовые, порошковые, в виде штучных материалов.

По толщине покрытия ( $d$ ):

1. Ультратонкие,  $d$  менее 1 мкм.
2. Высокотонкие – 1...10 мкм.
3. Микротонкие – 10...40 мкм.
4. Миллитонкие – 40...300 мкм.
5. Тонкие – 300...1000 мкм.
6. Средние – 1...3 мм.
7. Толстые – 3...8 мм.
8. Сверхтолстые – более 8 мм.

По значению электрической прочности ( $E_{пр}$ ) покрытия относительно  $E_{пр}$  воздуха:

1. Меньше атмосферного воздуха –  $E_{пр} < 2,5$  кВ/мм.
2. Сравнимой с атмосферным воздухом –  $2,5 < E_{пр} < 3,5$  кВ/мм.
3. Больше атмосферного воздуха –  $E_{пр} > 3,5$  кВ/мм.



По типу конструкций, оборудования и изделий, на которые покрытие наносится:

1. Трубопроводы различного назначения.
2. Электротехнические, электромеханические и электронные изделия.
3. Металлические конструкции.
4. Дорожные конструкции.
5. Кровельные системы.
6. Цистерны, хранилища, резервуары.
7. Железобетонные конструкции.
8. Изделия для широких областей машиностроения и кораблестроения.

Как правило, современные диэлектрические покрытия совмещают в себе несколько назначений, например, антикоррозионные покрытия корпусов кораблей являются одновременно противообрастающими и радиопоглощающими покрытиями.

Вместе с тем для диэлектрических покрытий важны их электрические параметры, в свою очередь зависящие от условий применения. Так, удельная объемная проводимость твердых материалов лежит в пределах  $10^{-8} - 10^{-16}$  См/м и зависит от температуры:

$$\gamma_T = \gamma_0 \cdot \exp[\alpha \cdot (T - 293)], \quad (1.1)$$

где  $\gamma_0$  – проводимость при 20 °С;  $\gamma_T$  – проводимость при данной температуре;  $\alpha$  – температурный коэффициент, колеблется в пределах 0,01 - 0,04 в зависимости от вида материала.

Рост проводимости наблюдается и при высоких напряженностях поля [8]:

$$\gamma_E = \gamma_0 \cdot \exp[\alpha \cdot (E - E_0)], \quad (1.2)$$

где  $\gamma_0$  - проводимость в слабых полях (при  $E < E_0$ ).

Проводимость в твердых диэлектриках, так же, как и в жидкостях, определяется в основном перемещением ионов и зависит от агрегатного состояния,

наличия примесей, нарушений кристаллической решетки, а также небольшой концентрацией свободных носителей заряда. При высоких напряженностях внешних электрических полей быстрое нарастание тока вызывается электронной проводимостью [14].

Поверхностная проводимость твердых материалов зависит от состояния поверхности, степени ее увлажнения и загрязнения и может изменяться для одного и того же материала в пределах нескольких порядков. При этом поверхностные токи утечки могут значительно превысить объемные токи.

Относительная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$  неполярных ( $\varepsilon = 2...4$ ) и слабополярных ( $\varepsilon = 3...6$ ) твердых диэлектриков в условиях рабочих температур меняется в сравнительно нешироких пределах.

Удельные потери  $p$  в диэлектрике при переменном приложенном напряжении выражаются формулой [14]:

$$p = \omega \cdot \varepsilon \cdot E^2 \cdot \operatorname{tg}(\delta), \quad (1.3)$$

где  $\omega$  – угловая частота напряжения,  $\text{с}^{-1}$ ;  $E$  – напряженность поля, В/мм;  $\operatorname{tg}(\delta)$  – тангенс угла диэлектрических потерь.

$\operatorname{tg}(\delta)$ , а, следовательно, и  $p_T$  с ростом  $T$  возрастают по экспоненциальному закону:

$$p_T = \omega \cdot \varepsilon \cdot E^2 \cdot \operatorname{tg}(\delta)_{T_0} \cdot \exp[\alpha \cdot (T - T_0)], \quad (1.4)$$

где  $\operatorname{tg}(\delta)_{T_0}$  соответствует начальной условной температуре  $T_0$ ;  $\alpha$ - температурный коэффициент.

Вышеперечисленные электрические параметры диэлектрических покрытий оказывают значительное влияние на методики применения метода НК, в рамках которого в покрытии создается внешнее электрическое поле высокой напряженности. Также существенное влияние на методики контроля оказывает толщина диэлектрических покрытий. Таким образом, применительно к

электроискровому методу НК диэлектрических покрытий, классификацию можно представить следующим образом (рисунок 1.1.1).

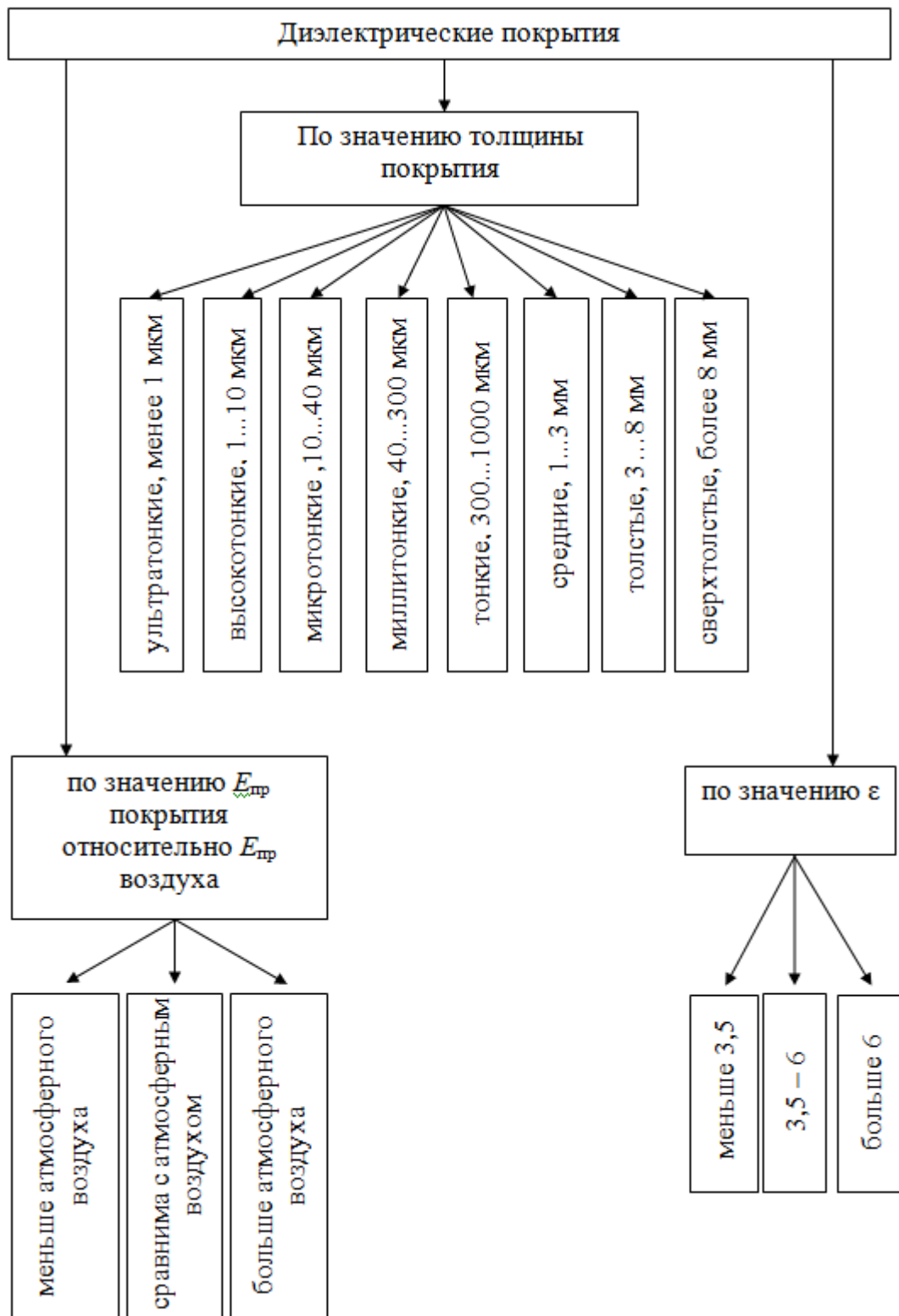


Рисунок 1.1.1 – Классификация диэлектрических покрытий по толщине и электрическим параметрам

## **1.2. Классификация дефектов диэлектрических покрытий и задачи их выявления**

С учетом приведенной выше классификации покрытий по назначению под дефектом покрытия будем понимать любое несоответствие его свойств, параметров и характеристик заданным в нормативной документации [15, 16].

Вместе с тем, необходимо выделить параметры и характеристики диэлектрических покрытий, являющихся ключевыми (основными) с точки зрения их основного назначения. Существует множество видов дефектов, возникающих в процессе нанесения и эксплуатации защитных покрытий. Вид, форма, количество и размер этих дефектов могут зависеть от разных факторов: качества материалов, параметров технологического процесса, условий эксплуатации и хранения готовой продукции.

По технологическим процессам нанесения и формирования покрытия, во многом определяющим специфику применения электроискрового метода НК, покрытия можно разделить на:

1. Лакокрасочные покрытия широкого назначения.
2. Битумно-мастичные покрытия.
3. Полиэтиленовые покрытия.
4. Рулонные и листовые гидроизоляционные покрытия.

### **1.2.1. Дефекты лакокрасочных покрытий**

Традиционно под лакокрасочными покрытиями (ЛКП) понимают многокомпонентные составы, способные при нанесении тонким слоем на поверхность изделий высыхать с образованием пленки, удерживаемой силами адгезии, при этом основное назначение указанных пленок – обеспечение защитных, декоративных и электроизоляционных свойств металлических и неметаллических электропроводящих материалов [17, 18, 19].

ЛКП широко применяются как защитные, антикоррозионные покрытия внешней и внутренней поверхности трубопроводов, объектов гражданской инфраструктуры (остановки общественного транспорта, ограждения), объектов транспортного машиностроения (корпуса кораблей, поездов), объектов капитального строительства (металлические опоры мостов, стеновые и кровельные панели) и др. В ЛКП следует выделить следующие виды дефектов, представляющих интерес для проводимого исследования:

1. Белесоватость. Молочно-белая опалесценция прозрачного лакокрасочного покрытия, появление которой вызвано конденсацией влаги из воздуха при его сушке.

2. Пузыри. Закрытые или открытые поры сферической формы в лакокрасочном покрытии, часто вызванные испарением растворителя.

3. Наплывы. Локальные неоднородности толщины лакокрасочного покрытия, образующиеся в результате стекания вниз лакокрасочного материала во время сушки в вертикальном или наклонном положении.

4. Потек. Небольшой наплыв от стекания лакокрасочного материала на вертикальной или наклонной окрашенной поверхности, похожий на слезу.

5. Сморщивание. Образование складок на ЛКП во время сушки/отверждения.

6. Кратер. Образование в ЛКП маленьких круглых углублений, сохраняющихся после сушки.

7. «Рыбий глаз». Присутствие на поверхности лакокрасочного покрытия кратеров, в центре которых находятся инородные частицы.

8. Инородные включения. Наличие в лакокрасочном покрытии посторонних частиц.

9. Вспучивание. Размягчение, набухание или отслоение высохшего лакокрасочного покрытия от окрашиваемой поверхности, которое может произойти при нанесении последующего слоя или действии растворителя.

10. Булавочные проколы. Наличие в лакокрасочном покрытии мелких пор, напоминающих проколы, сделанные булавкой.

11. Растрескивание. Образование трещин в высохшем лакокрасочном покрытии или его слое.

12. Шагрень. Лакокрасочное покрытие, напоминающее по внешнему виду текстуру кожуры апельсина.

13. Неоднородная окраска. Неоднородный внешний вид лакокрасочного покрытия, зависящий от хаотически расположенных участков лакокрасочного покрытия, отличающихся по цвету и/или блеску и функциональным параметрам.

14. Царапина. Порез или бороздка на поверхности лакокрасочного покрытия, полученные при контакте с острым предметом.

15. Растворение ЛКП. Разрушение лакокрасочного покрытия в результате действия жидких агрессивных сред.

Вышеперечисленные дефекты могут образовываться в покрытии как в процессе его нанесения, так и в процессе эксплуатации покрытых изделий. Также если рассматривать ЛКП на электропроводящем основании как объект контроля с применением электроискрового метода, все указанные выше виды дефектов можно привести к четырем обобщенным видам:

1. Сквозной дефект, представляющий собой поверхность покрываемого объекта, на которую должно быть нанесено покрытие, однако покрытие по тем или иным причинам отсутствует.

2. Недопустимое утонение – область покрытия, конечная толщина которого меньше допустимого значения.

3. Инородное включение – область покрытия, в которой имеется локальная объемная неоднородность состава покрытия.

4. Фальсификат – покрытие, эксплуатационные характеристики которого не соответствуют заявленным.

### 1.2.2. Дефекты битумно-мастичных покрытий

Как известно, битумы представляют собой твердые или смолоподобные продукты, состоящие из смеси углеводородов и их азотистых, кислородистых, сернистых и металлосодержащих производных.

В настоящее время битумно-мастичные покрытия широко используются для защиты от коррозии соединения труб на нефте- и газопроводах, при формировании слоя дорожной одежды и ремонте асфальтового полотна, капитальном строительстве (кровельные покрытия) и др. [20, 21, 22].

Основными дефектами битумно-мастичных покрытий являются:

1. Вздутие одного из слоев покрытия. Может возникать вследствие низкой адгезии покрытия к подложке, что может быть вызвано плохой подготовкой подложки, нарушением правил хранения и нанесения покрытия.

2. Трещины на поверхности и в объеме покрытия. Возникают в покрытии в процессе высыхания, а также под действием механических воздействий. Могут быть вызваны испарением одного из компонентов покрытия при хранении или нарушением правил эксплуатации готового покрытия.

3. Мелкие вкрапления, посторонние частицы. Возникают вследствие нанесения покрытия на грязную поверхность или нанесения покрытия в ненадлежащих условиях.

4. Расслаивание покрытия.

5. Бугры и впадины.

6. Пузыри с жидкостью. Возникают при нанесении покрытия на влажную поверхность.

7. Выбоины. Сквозные дефекты, возникающие при ненадлежащей эксплуатации покрытия.

8. Кратеры. Возникают при наличии локальных масляных загрязнений на покрываемом объекте, а также при нанесении покрытия при сильном ветре.

9. Несоответствие функциональных качеств покрытия заявленным. Нарушение технологии изготовления и нанесения покрытия.

Так же, как и в случае ЛКП, дефекты битумно-мастичных покрытий сводятся к четырем обобщенным видам: сквозной дефект, недопустимое утонение, инородное включение, фальсификат (несоответствие функциональных качеств покрытия заявленным).

### **1.2.3. Дефекты полиэтиленовых покрытий**

Известно, что полиэтилен – это органическое соединение, термопластичный полимер. Полиэтиленовые покрытия широко используются для защиты трубопроводов различного назначения от коррозии и агрессивного воздействия внешних сред. Как правило, имеют многослойную структуру, состоящую из эпоксидного праймера, адгезионного подслоя и слоя полиэтиленовой пленки [5, 23].

Широкое применения полиэтиленовые покрытия нашли как антикоррозионные покрытия надземных и подземных трубопроводов за счет своих прочностных, диэлектрических и пассивирующих свойств.

Основными дефектами полиэтиленовых покрытий являются:

1. Вздутие покрытия. Возникает при плохой подготовке подложки, нарушении правил хранения и нанесения покрытия.
2. Механические повреждения покрытия, сдиры, царапины. Возникают при нарушении правил эксплуатации.
3. Отслаивание. Возникает при ненадлежащей подготовке подложки к нанесению покрытия, в частности может возникать из-за избыточной запыленности труб после зачистки верхнего слоя;
4. Непроклей. Возникает при нарушении технологий термообработки покрытия при нанесении.
5. Пузырь. Может содержать как газ, так и жидкость, возникает при ненадлежащей подготовке объекта контроля к нанесению покрытия.
6. Складки, морщины, гофры. Возникают при нарушении технологии нанесения покрытия, в частности, при нанесении рулонных покрытий на трубу



могут возникать из-за избыточного или недостаточного натяжения прокручивающего валика.

Классификация дефектов полиэтиленовых покрытий во многом схожа с битумно-мастичными, за исключением условий возникновения этих дефектов. Так, полиэтиленовые покрытия достаточно широко используются для защиты трубопроводов различного назначения от коррозии. Трубы, в свою очередь, покрываются на заводах, и монтируются в трубопровод в более жестких условиях, что также приводит к возникновению дефектов в покрытии.

#### **1.2.4. Дефекты рулонных гидроизоляционных покрытий**

Рулонные гидроизоляционные покрытия, как правило, имеют полимерную или битумно-мастичную основу, схожую с битумными или полиэтиленовыми покрытиями. Основной сферой применения таких покрытий является гидроизоляция кровельных систем объектов капитального строительства. Таким образом, способ укладки и условия эксплуатации таких покрытий создают условия для формирования специфических, характерных только для них, дефектов покрытий [22, 24]:

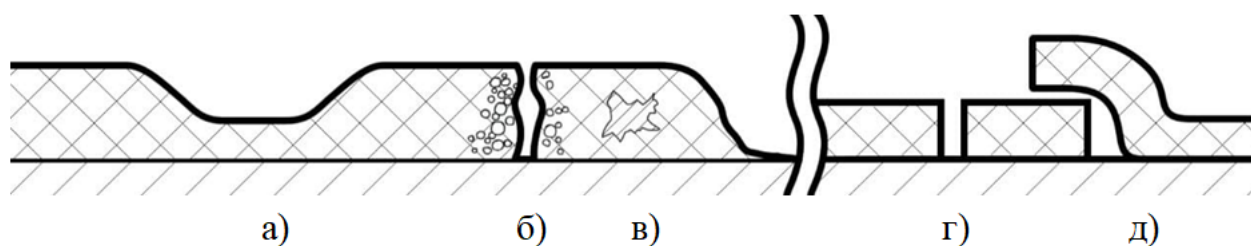
1. Продольные и поперечные трещины в рулонах.
2. Вздутия, пузыри.
3. Сквозные отверстия, каверны.
4. Разрыв материала в слое ковра.
5. Выпирание плит, вспучивание.
6. Отслоение и расслоение материалов.
7. Отклеивание листов материалов на стыке.
8. Инеродные включения в покрытии швов.
9. Выветривание, выкрошивание материала.
10. Засорение, мусор.
11. Прораствание сорняков, грибов, микроорганизмов.

Дефекты рулонных гидроизоляционных покрытий отличаются от вышечисленных наличием структурных дефектов за счет постоянного

контакта покрытия с водой и дефектов, возникающих на стыках листов вследствие некачественного соединяющего состава, нарушений технологии нанесения и т.д. Вместе с тем стоит отметить, что некоторые из вышеприведенных дефектов не снижают эксплуатационных характеристик покрытий и являются допустимыми.

**1.2.5. Обобщенная классификация дефектов диэлектрических покрытий**  
 Анализируя вышеизложенное, можно утверждать, что все вышеперечисленные дефекты покрытия упрощаются до нескольких обобщенных моделей и подразделяются на:

1. Сквозные дефекты – области, где слой/слои покрытия полностью отсутствует, и защищаемый объект контактирует с внешней средой (рисунок 1.2.1 б, г, д).
2. Несквозные дефекты – области покрытия, где толщина конечной системы покрытия меньше допустимой (рисунок 1.2.1 а, в).
3. Объемные дефекты – области покрытия с объемными включениями, ухудшающими функциональные свойства покрытия (рисунок 1.2.1 в).
4. Фальсификат – покрытие ненадлежащего качества, функциональные свойства которого отличаются от заявленных свойств в худшую сторону (рисунок 1.2.1 г).

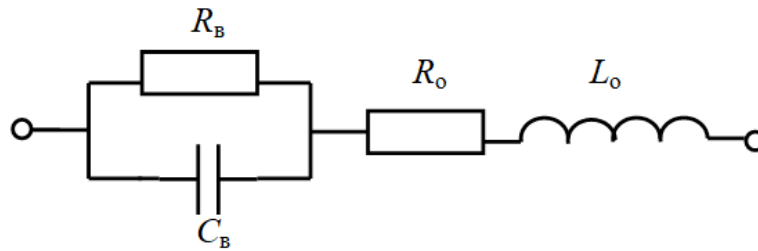


а) недопустимое утонение, б) сквозная пора или трещина, в) металлическое включение, г) отсутствие покрытия (механическое повреждение), д) сквозное отверстие в области нахлеста листов покрытия.

Рисунок 1.2.1 – Схематичное изображение обобщенных видов дефектов диэлектрических покрытий

Как было показано выше, для каждого вида покрытия характерны свои виды дефектов, наличие которых, является критическим и значительно ухудшает эксплуатационные характеристики покрытия (рисунок 1.2.4).

Электрические схемы замещения сквозных дефектов имеют вид (рисунок 1.2.2) [23, 25]:



$R_B$  – электрическое сопротивление воздуха в сквозном дефекте покрытия,

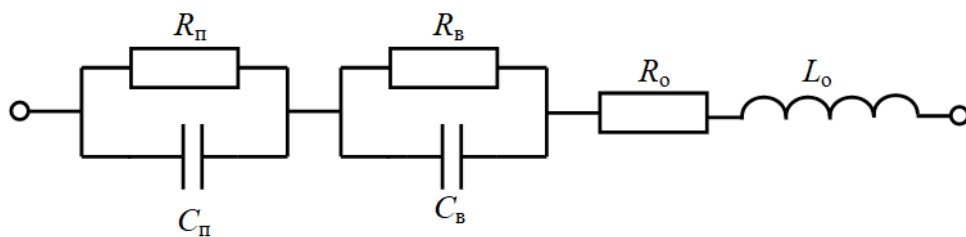
$C_B$  – электрическая емкость воздуха в сквозном дефекте покрытия,

$R_o$  – электрическое сопротивление основания, на которое покрытие нанесено,

$L_o$  – электрическая индуктивность основания.

Рисунок 1.2.2 – Упрощенная электрическая эквивалентная схема замещения сквозного дефекта в диэлектрическом покрытии на электропроводящем основании

Для несквозных дефектов покрытий (недопустимые утонения, инородные включения), электрическая схема замещения имеет вид (рисунок 1.2.3):



$R_п$  – электрическое сопротивление участка покрытия,  $C_п$  – электрическая емкость

участка покрытия,  $R_B$  – электрическое сопротивление воздуха участка

несплошности покрытия,  $C_B$  – электрическая емкость воздуха участка

несплошности покрытия,  $R_o$  – электрическое сопротивление основания, на

которое покрытие нанесено,  $L_o$  – электрическая индуктивность основания.

Рисунок 1.2.3 – Упрощенная электрическая эквивалентная схема замещения несквозного дефекта покрытия на электропроводящем основании

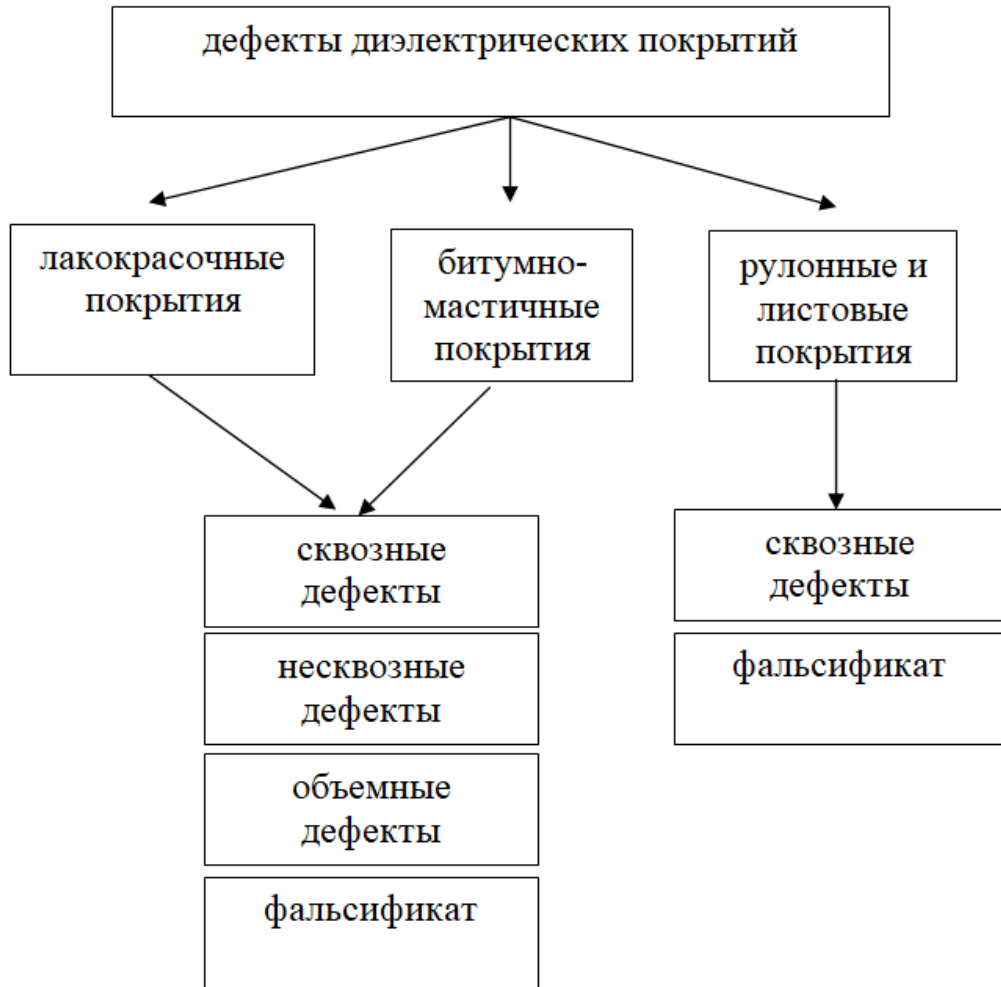


Рисунок 1.2.4 – Обобщенные виды выявляемых дефектов

Таким образом, актуальной является задача выявления и устранения вышеописанных дефектов в широком ряде диэлектрических покрытий как на стадии производства, так и на стадии эксплуатации покрытий. В настоящее время выявление вышеперечисленных дефектов осуществляется с использованием ряда методов неразрушающего контроля.

### **1.3. Возможности применения видов и методов НК для выявления дефектов диэлектрических покрытий на электропроводящих основаниях**

К методам НК относят методы, в которых используют физические поля, излучения и вещества, проникающие в исследуемый объект и формирующие информацию о качестве функциональных параметров исследуемых материалов и

объектов, не ухудшая при этом их последующую эксплуатационную пригодность и надежность, которые, в соответствии с ГОСТ Р 56542-2019, в зависимости от физических явлений, положенных в его основу, объединяются в девять видов: проникающими веществами, акустический, электрический, вихретоковый, оптический, радиационный, магнитный, радиоволновой, тепловой [26, 27, 28, 29, 30, 31, 32]. При этом методы классифицируются по следующим признакам:

- по характеру взаимодействия физических полей или веществ с контролируемым объектом;
- по способу получения первичной информации;
- по первичному информативному параметру.

Для контроля толщины и сплошности диэлектрических покрытий используются ряд методов НК, объединенных в следующие виды:

**Акустический** вид НК, основанный на регистрации параметров упругих колебаний, возбуждаемых и (или) возникающих в объекте контроля. Для измерения толщины диэлектрических покрытий используются резонансный метод, а также группа эхо-методов, регистрирующих параметры прохождения и отражения акустического сигнала в покрытии.

Результаты измерения толщины покрытий акустическими методами практически полностью не зависят от электрических и магнитных свойств подложки покрытия. Однако на результаты измерений оказывают влияние шероховатости поверхности покрытия, правильность задания скорости ультразвуковых колебаний в материале, изотропность его структуры и наличие хорошего акустического контакта между преобразователем и объектом контроля при измерениях.

**Проникающими веществами** – вид НК, основанный на проникновении жидких и газообразных веществ в сквозные полости на поверхности покрытия с целью их выявления. При проникновении через сквозной дефект покрытия, проникающее вещество при взаимодействии с подложкой, как правило, меняет свои свойства (например, цветной, пузырьковый, химический, люминесцентный методы) или приводит к возникновению визуально различимых эффектов

(например, метод высокочастотного разряда, галогенный метод, масс-спектрометрический метод).

Достоинствами методов можно считать относительную простоту их реализации.

Среди ограничений данной группы методов стоит выделить наличие ограничения по размерам выявляемых дефектов, связанные с ограниченной проникающей способностью веществ. Также методы способны выявлять только сквозные дефекты покрытий и требуют существенной подготовки для осуществления контроля.

**Тепловой вид НК**, основанный на регистрации температурных полей объекта контроля. В настоящее время широкое распространение получил термометрический метод выявления протечек в кровельной изоляции капитальных строений.

Достоинством термометрического метода является простота его реализации и скорость контроля. Однако метод обнаруживает только места уже существующих протечек и неоднородностей материала покрытия, имеет ряд ограничений применения. Применение активного теплового контроля предполагает создание стабильных климатических условий в зоне контроля, практически недостижимых в полевых условиях.

**Вихретоковый вид НК**, основанный на анализе взаимодействия внешнего электромагнитного поля с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в объекте контроля этим полем. Широко применяется для измерения толщины диэлектрических покрытий на электропроводящих подложках. В зависимости от задачи и свойств материала контролируемого объекта и покрытий могут применяться различные первичные информативные параметры, определяемые способом получения первичной информации. Так, выделяют параметрический, амплитудный, фазовый, амплитудно-фазовый методы.

Достоинствами вихретокового вида НК можно считать относительно высокую точность измерений и возможность измерения толщины покрытий в диапазоне от единиц мкм до десятков мм с возможностью подавления влияния

шероховатости покрытия и основания, а также их радиуса. К ограничениям следует отнести зависимость показаний от электропроводности и магнитной проницаемости изделий, а также дискретность проводимых изменений.

**Магнитный вид НК**, основанный на регистрации магнитных полей рассеяния, возникающих над дефектами, или на определении магнитных свойств объекта контроля. Магнитный вид НК применим для контроля толщины диэлектрических покрытий изделий на ферромагнитных основаниях.

В зависимости от задачи и свойств материала изделия и покрытия могут применяться различные функции изменения во времени магнитного поля (пробной энергии) и различные первичные информативные параметры, определяемые используемым способом получения первичной информации.

Достоинством методов магнитного вида НК является практически полная независимость результатов измерения от электропроводности изделий и покрытий, анизотропии структуры изделий и покрытий. Следует отметить нечувствительность к изменению влажности, давления и загрязненности газовой среды. Ограничением является зависимость показаний от магнитных свойств основания, радиуса и шероховатости поверхности изделий и покрытий, а также дискретность проводимых изменений.

**Электрический контроль** – вид НК, основанный на регистрации параметров электрического поля, взаимодействующего с объектом контроля или возникающего в объекте контроля в результате внешнего воздействия.

Электрические методы получили наибольшее распространение в области решения задач контроля сплошности и выявления сквозных и несквозных дефектов структуры диэлектрических покрытий. Так, первичными информативными параметрами для методов являются: электрический ток (электролитический, электроискровой методы НК) или импеданс диэлектрического покрытия (электропотенциальный, электроемкостной методы) [3, 33, 34, 35].

С использованием методов электрического вида НК возможно:

- выявление дефектов различных диэлектрических материалов и покрытий;

- измерение толщины стенок изделий, покрытий и слоев структуры из диэлектрических материалов;
- сортирование материалов по маркам (электростатический, импедансный методы);
- контроль электрических параметров электрических, диэлектрических и полупроводниковых материалов.

Достоинствами перечисленных методов электрического НК являются высокая скорость контроля, независимость параметров контроля от магнитных свойств объекта контроля, нечувствительность к шероховатости поверхности покрытий, а также возможность осуществления многопараметрового контроля. Недостатками перечисленных методов электрического НК являются необходимость контакта с объектом контроля или обеспечение стабильного зазора с покрытием, зависимость результатов измерения от параметров окружающей среды и, в ряде случаев, диэлектрических параметров материала покрытий. Также к недостаткам можно отнести отсутствие в настоящее время практик применения электрических методов для контроля толщины диэлектрических покрытий.

Из всех вышеперечисленных методов НК, можно выделить наиболее часто используемые при контроле сплошности диэлектрических покрытий электропроводящих оснований (рисунок 1.3.1).





Рисунок 1.3.1 – Методы НК сплошности диэлектрических покрытий

Выбор оптимального метода НК следует осуществлять исходя из его:

- реальных особенностей;
- физических основ;
- степени разработки;
- возможной области применения;
- чувствительности и разрешающей способности в нормальных условиях и в условиях воздействия мешающих параметров.

Система НК, обеспечивающая заданную достоверность результатов, должна быть скомплектована из прибора, методик их применения и стандартных образцов [36].

Среди вышперечисленных методов стоит выделить электроискровой метод НК, который, для задачи выявления сквозных дефектов диэлектрических

покрытий, обладает наибольшей производительностью. По сравнению с методами, перечисленными на рисунке 1.3.1, электроискровой метод НК обладает рядом преимуществ: площадь контролируемой поверхности может достигать до 2 погонных метров за один проход, нет необходимости в работе с жидкими электролитами, метод позволяет выявлять как сквозные, так и несквозные дефекты покрытий.

В процессе контроля с использованием электроискрового метода НК между поверхностью покрытия и электропроводящим основанием формируется электрическое поле высокой напряженности  $E$ . В случае, если дефектные участки покрытия имеют электрическую прочность меньшую, чем бездефектное покрытие, при соответствующей напряженности электрического поля в них возникает искровой разряд (рисунок 1.3.2) [37].

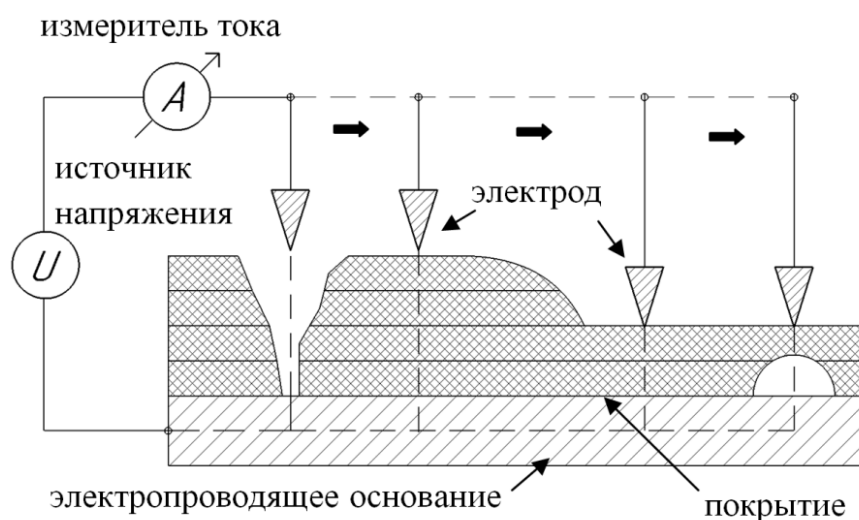


Рисунок 1.3.2 – Схематичное изображение принципа электроискрового контроля диэлектрических покрытий

Так как рассмотренные выше дефекты покрытия могут быть как сквозными, так и несквозными, то при теоретических и экспериментальных исследованиях электроискрового метода НК следует учитывать специфику физических процессов, происходящих при приложении высокого напряжения между электропроводящим

основанием и поверхностью диэлектрического покрытия на бездефектных и дефектных участках.

Важнейшими параметрами диэлектрических покрытий электропроводящих оснований как объектов контроля являются толщина покрытия  $d$  [38], электрическое сопротивление покрытия  $R$  и электрическая прочность покрытия  $E$ , которая определяет удельное пробивное напряжение покрытия заданной толщины.

Основываясь на том, что  $d$  является параметром, определяющим режимы испытаний [39, 40, 41], то метод, основанный на формировании искрового разряда в диэлектрическом промежутке (покрытии) или в области дефекта покрытия, а также его селективность (способность метода отличать дефектный участок покрытия от бездефектного) основаны на различии электрической прочности дефектных и бездефектных участков покрытия.

Параметр  $E$  диэлектрических покрытий зависит от агрегатного состояния и материала. С учетом того, что в рамках использования электроискрового метода, средой, которая заполняет дефект диэлектрического покрытия, является атмосферный воздух [42], то в первую очередь следует рассмотреть процессы формирования искрового разряда в нем.

Таким образом, при приложении возрастающего напряжения к сквозному дефекту покрытия, заполненному воздухом, зависимость протекающего тока может быть представлена вольтамперной характеристикой (рисунок 1.3.3) в координатах плотности тока  $j$  и напряженности электрического поля  $E$  [43].

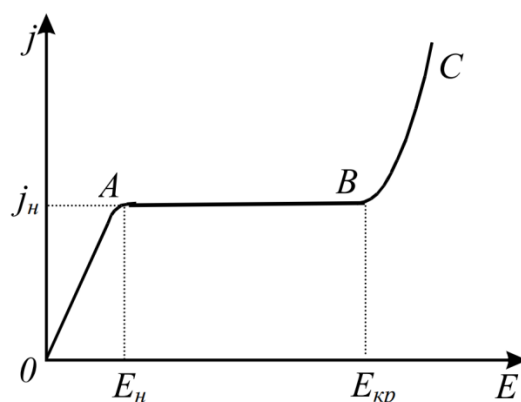


Рисунок 1.3.3 – Зависимость плотности тока  $j$  через дефект от напряженности внешнего электрического поля  $E$

Как видно из рисунка. 1.3.3, зависимость делится на три области. Область  $\theta$ - $A$  относится к закону Ома,  $A$ - $B$  к насыщению тока. Участок  $\theta$ - $B$  можно условно назвать участком слабого поля, потому что здесь напряженности электрического поля  $E$  недостаточно для начала развития ударной ионизации. В области  $C$  наблюдается резкое возрастание плотности тока за счет развития ионизационных процессов в газе. В этой области и происходит пробой межэлектродного промежутка, формирование которого необходимо в рамках применения метода.

С другой стороны, если в качестве дефекта рассматривать недопустимые утонения или инородные включения в объеме покрытия, то необходимо рассматривать процессы, происходящие при пробое диэлектрических покрытий. В отличие от воздушных промежутков, пробой покрытий сопровождается образованием сквозного канала пробоя (отверстия), который является результатом механического разрушения покрытия или его проплавления за счет выделяемого тепла. Из-за этого факта некоторые исследователи [44, 45] относят электроискровой метод неразрушающего контроля к разрушающим. Однако стоит отметить, что при правильно подобранном испытательном напряжении, разрушению подвергаются исключительно дефектные участки покрытия, что не приводит к выходу из строя всего изделия.

Развитие той или иной формы пробоя определяется преобладающим влиянием электрических, тепловых или электрохимических явлений, проявляющихся в процессе развития пробоя. В настоящее время принято выделять три основные формы пробоя: 1 – электрический, 2 – тепловой, 3 – электрохимический [46]. Однако учитывая малое время взаимодействия электрического поля высокой напряженности и покрытия в рамках электроискрового метода НК (обычно до нескольких секунд), целесообразно рассматривать только электрическую форму пробоя покрытия.

Различия в механизмах формирования пробоя в различных видах дефектов объекта контроля накладывает ограничения на выбор технологии и методологии

контроля электроискровым методом. Таким образом, необходимо рассматривать отдельно выявление сквозных и несквозных дефектов покрытий.

#### **1.4. Современное состояние электроискровых приборов НК диэлектрических покрытий**

В настоящее время для выявления сквозных дефектов диэлектрических покрытий широко используются приборы, реализующие электроискровой и электролитический методы контроля.

**Электролитический метод** применим для выявления исключительно сквозных дефектов покрытия, так как основан на регистрации электролитического тока, протекающего через электролит, проникающий к заземленному основанию через несплошность покрытия.

Большинство электролитических дефектоскопов конструктивно состоят из источника постоянного напряжения значением до 100 В и подсоединяемого к нему электрода-губки, пропитанной электролитом. Ведущие позиции среди производителей электролитических дефектоскопов занимают следующие компании: Elcometer и DeFelsko.

Elcometer – британская фирма, выпускающая широкий спектр контрольно-измерительных приборов для задач неразрушающего контроля.

Прибор Elcometer 270 Pinhole Detector реализует электролитический метод НК по средствам подачи испытательного напряжения на электрод губку, смоченную электролитом (рисунок 1.4.1). В процессе контроля электролит замыкает электрическую цепь, затекая в сквозной дефект. При протекании тока по цепи, в приборе активируется светозвуковая сигнализация.



Рисунок 1.4.1 – Внешний вид дефектоскопа Elcometer 270 Pinhole Detector

Основные технические характеристики прибора Elcometer 270 Pinhole Detector приведены в таблице 1.4.1.

Таблица 1.4.1. Технические характеристики прибора Elcometer 270 Pinhole Detector

Испытательное напряжение	9 В; 67,5 В; 90 В
Диапазон толщин контролируемых покрытий, мкм	0 – 500
Порог срабатывания (чувствительность), кОм	400
Габаритные размеры электронного блока, мм	210 x 42 x 37
Масса, г	300
Диапазон рабочих температур, °С	от плюс 10 до плюс 50

Сервисные характеристики прибора: автоматическая регулировка чувствительности, встроенный регулятор напряжения на электроде.

К недостаткам прибора можно отнести: относительно большие габариты и, применительно к российским условиям, узкий температурный диапазон узкий диапазон толщин контролируемых покрытий, необходимость в использовании жидких электролитов.

DeFelsko – североамериканская фирма, выпускающая широкий спектр контрольно-измерительных приборов для задач НК.

Прибор PosiTest LPD (рисунок 1.4.2) реализует электролитический метод НК, принцип действия и конструкция схожи с Elcometer 270. Основным отличием является наличие матричного индикатора, отображающего испытательное напряжение и индицирующего о наличии дефекта в покрытии.



Рисунок 1.4.2 – Внешний вид дефектоскопа PosiTest LPD

Основные технические характеристики прибора PosiTest LPD приведены в таблице 1.4.2.

Таблица 1.4.2. Технические характеристики прибора PosiTest LPD

Испытательное напряжение	9 В; 67,5 В; 90 В
Диапазон толщин, контролируемых покрытий, мкм	0 – 500
Порог срабатывания чувствительности, кОм	400
Габаритные размеры электронного блока, мм	270 x 60 x 55
Масса, не более, г	240
Диапазон рабочих температур, °С	от минус 10 до плюс 50

К преимуществам прибора можно отнести: меньший вес, наличие органов регулировки сигнализации прибора, встроенный регулятор напряжения на электроде.

К недостаткам прибора относятся относительно большие габариты, необходимость в использовании жидких электролитов и достаточно высокая стоимость оборудования.

Также существенным недостатком всех приборов, реализующих электролитический метод НК, является возможность выявления исключительно сквозных дефектов покрытия.

Переходя к рассмотрению приборов, реализующих **электроискровой метод НК**, стоит отметить, что большинство электроискровых дефектоскопов конструктивно состоят из блока управления и высоковольтного блока, к которому подключается электрод требуемой формы и конструктивного исполнения. Основными техническими характеристиками прибора являются вид прикладываемого к покрытию напряжения (постоянное или импульсное) и его величина [56]. Ведущие позиции среди производителей электролитических дефектоскопов занимают следующие компании: Elcometer, Buckleys (UVRAL), PCWI, ELMED MESSTECHNIK, DeFelsko.

Elcometer 266 – электроискровой дефектоскоп формирующий постоянноточное испытательное напряжение на электроде (рисунок 1.4.3).

В процессе контроля формируемое напряжение прикладывается к диэлектрическому покрытию, при этом, в дефектных областях покрытия формируется искровой разряд, возникновение которого и является индикатором о наличии дефекта в покрытии.



Рисунок 1.4.3 – Внешний вид дефектоскопа «Elcometer 266»



Основные технические характеристики прибора «Elcometer 266» приведены в таблице 1.4.3.

Конструктивно блок управления прибора и высоковольтный блок помещены в отдельные корпуса и соединены кабелем. При этом электронный блок переносится оператором на плече, в процессе контроля. Прибор комплектуется пружинными, веерными, щеточными и плоскими резиновыми электродами.

Также в приборе, как и в других дефектоскопах с постоянным контрольным напряжением исключается понижение чувствительности при любой скорости контроля. Однако приложение к диэлектрическому покрытию высокого постоянного напряжения вызывает старение этого покрытия и ухудшение его защитных свойств [4]. Использование постоянного напряжения при контроле требует повышенных мер безопасности, также для его поддержания требуется больше энергии, что уменьшает время автономной работы прибора.

Вместе с тем к постоянноточным приборам относятся приборы британской фирмы «Buckleys (UVRAL)»- «PHD Pro» (рисунок 1.4.4).



Рисунок 1.4.4 – Внешний вид дефектоскопа «PHD Pro»

Основные технические характеристики прибора «PHD Pro1 - 30kV» приведены в таблице 1.4.3. Отличительными особенностями прибора являются высокая стабильность напряжения на электроде и небольшой вес блока управления вместе с подключаемой рукояткой.

Переходя к рассмотрению приборов, реализующих импульсный режим приложения испытательного напряжения, стоит отметить, что в большинстве импульсных дефектоскопов к покрытию прикладываются импульсы испытательного напряжения одной полярности длительностью около 10 – 100 мкс

с частотой следования 20 – 700 Гц. Скорость контроля в данном случае определяется частотой следования импульсов. С другой стороны, этот тип приборов в силу меньшего потребления электроэнергии имеет большую автономность. Существенно меньшее время приложения испытательного напряжения к покрытию практически исключает старения покрытия. Для этого типа приборов возможна реализация емкостного заземления.

Стоит также упомянуть прибор американской фирмы «DeFelsko» - PosiTest HND (рисунок 1.4.5).



Рисунок 1.4.5 – Внешний вид электроискрового дефектоскопа PosiTest HND

Прибор обладает совмещенной конструкцией блока управления и высоковольтного блока. Такая конструкция корпуса прибора повышает удобство контроля внешних покрытий труб с использованием специализированных пружинных электродов (рисунок 1.4.5). Также прибор обладает цветным матричным дисплеем, такими сервисными функциями как «запоминание программы контроля» и «калькулятор напряжений» в зависимости от требуемого стандарта, однако выбор стандартов в памяти прибора ограничен, возможность дополнить список интересующими стандартными формулами отсутствует. Прибор комплектуется пружинными, веерными, щеточными и плоскими резиновыми электродами.

Прибор, реализует импульсный режим контроля с фиксированной частотой следования импульсов – 30 Гц. Относительно низкая частота импульсов накладывает ограничение на скорость контроля прибором. Для 30 Гц она ограничена до 0,2 м/с.

Сравнение приборов по основным параметрам представлено в табл. 1.4.3.

Таблица 1.4.3. Технические характеристики электроискровых дефектоскопов различных производителей

Прибор	Производитель	Вид $U_n$	$U_n$ , кВ	$f$ , Гц	$d$ , кВ	$\Delta$ , %
<b>RHD Pro 1–30 kV</b>	Buckley	Постоянное	1-30	-	0,01 - 0,1	1%
<b>Elcometer 266</b>	Elcometer	Постоянное	0,5-30	-	0,1	5%
<b>Elcometer–280</b>	Elcometer	Импульсное	0,5-35	30	0,01 - 0,1	5%
<b>PosiTest HHD</b>	DeFelsko	Импульсное	0,5-35	30	0,01 - 0,1	5%

Примечание:  $U_n$  – испытательное напряжение,  $f$  – частота следования импульсов испытательного напряжения,  $d$  – дискретность установки испытательного напряжения,  $\Delta$  – точность поддержания испытательного напряжения.

Стоит отметить, что по требованиям современной нормативной документации [57, 58, 59, 60, 61] при расчете испытательного напряжения электроискрового метода учитывается только толщина контролируемого покрытия, при этом не учитывается влияние таких мешающих параметров, как конструкция и форма электрода, диэлектрические свойства покрытия, влажность воздуха, его температура, форма сигнала напряжения на электроде.

Таким образом, при рассмотрении приборных реализаций методов выявления рассматриваемых дефектов видно, что электроискровой метод неразрушающего контроля обладает достаточной универсальностью и способен выявлять все вышеперечисленные дефекты в отличие от электромагнитных и электролитических методов НК.

Наиболее существенным отличием приборных реализаций электроискрового метода контроля является способ формирования испытательного напряжения на электроде – постоянноточный или импульсный. Также важным аспектом электроискрового метода НК являются методики контроля и калибровки

оборудования, причем для каждого, обозначенного вида дефектов методики должны отличаться [62].

Таким образом, можно сделать следующие выводы о текущем состоянии методологии, практик применения и приборной реализации процессов выявления дефектов сплошности и отклонений толщины диэлектрических покрытий на электропроводящих основаниях:

1. В настоящее время в нормативной документации отсутствует качественное и количественное описание видов и параметров дефектов покрытий, которые требуется выявлять.

2. Не описаны электрические модели обобщенных видов дефектов диэлектрических покрытий, применительно к электроискровому методу НК, принципам формирования и приложения высокого испытательного напряжения с учетом электрических параметров покрытий и параметров окружающей среды.

3. Неявно сформулированы параметры и принципы их расчета для электроискрового метода НК для ЛКП и других диэлектрических покрытий суммарной толщиной от 50 до 500 мкм.

4. Отсутствует методическая основа для применения электроискрового метода НК для выявления несквозных дефектов диэлектрических покрытий.

### **1.5. Постановка задач исследований**

Выполненная обобщенная классификация покрытий и типов их дефектов, требований к качеству покрытий, с учетом особенностей формирования искрового разряда в них, а также современного состояния методов и приборов НК, применяемых для решения задач выявления дефектов диэлектрических покрытий на электропроводящих основаниях, позволяет сформулировать цель и задачи диссертационного исследования.

**Цель работы** – повышение эффективности (расширение номенклатуры и диапазона толщин покрытий, увеличение количества типов выявляемых дефектов), а также достоверности, 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.

#### **Задачи исследования:**

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 принципов построения и оптимизации конструктивных решений устройств формирования сильнонеоднородного электрического и приложения импульсного электрического напряжения к контролируемому

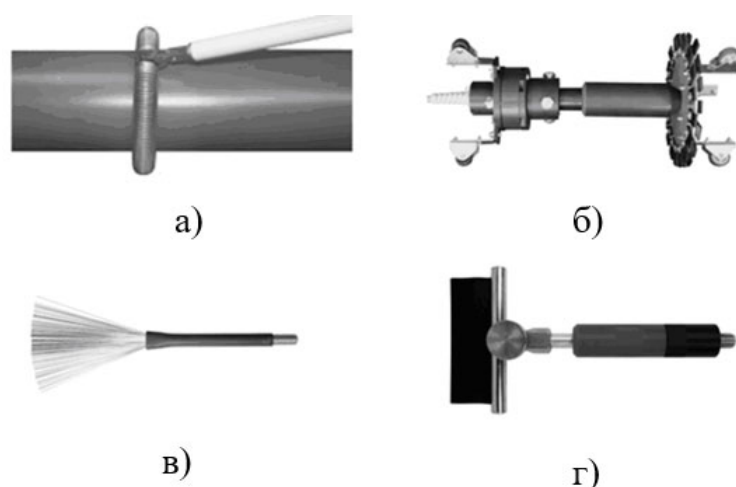
покрытию, повышающих чувствительность и расширяющих диапазон толщин и номенклатуру типов контролируемых покрытий.

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.

## ГЛАВА 2. ФОРМИРОВАНИЕ ОДНОРОДНЫХ И СИЛЬНОНЕОДНОРОДНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ И РАСЧЕТ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ЭЛЕКТРОИСКРОВОМ КОНТРОЛЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ В РАСШИРЕННОМ ДИАПАЗОНЕ ТОЛЩИН

Как было показано в разделе 1.3, электроискровой метод НК предполагает создание электрического поля высокой напряженности у поверхности покрытия. Это осуществляется путем приложения к контролируемому покрытию высокого испытательного напряжения  $U_{и}$ , с использованием электродов, имеющих различное конструктивное исполнение (рисунок 2.1.1). Электрод должен быть такой формы, чтобы обеспечивать непрерывный контакт с испытуемым покрытием, например, внутренним покрытием труб, наружным покрытием цилиндрических изделий, покрытием рельефных участков и т.п.



а) пружинный, б) внутритрубный с толкателем, в) веерный, г) плоский резиновый

Рисунок 2.1.1 – Электроды, применяемые в электроискровых дефектоскопах

Таким образом, в настоящее время для контроля сплошности наружной и внутренней изоляции труб применяются:

1. Пружинный (рисунок 2.1.1 а) и внутритрубный (рисунок 2.1.1 б) электроды. Их конструкция удобна для контроля поверхности трубы за один проход.

2. Веерный электрод, используемый для контроля сплошности покрытия сложнопрофильных изделий (рисунок 2.1.1 в). Конструкция и материалы электрода позволяет контролировать покрытия с малой механической прочностью.

3. Плоские щеточные или резиновые электроды, используемые для контроля поверхностей малой кривизны (рисунок 2.1.1 г).

Существуют и другие конструктивные решения специальных электродов, однако вышеописанные электроды являются наиболее распространенными.

В свою очередь, для обнаружения дефекта покрытия необходимо сформировать такую напряжённость электрического поля в области контроля, при которой произойдет пробой дефектного участка покрытия. Таким образом, ключевую роль в процессе испытания покрытий электроискровым методом играет выбор значения испытательного напряжения  $U_n$ , формирующее напряженность электрического поля, достаточную для возникновения искрового разряда.

## **2.1. Моделирование однородных и сильнонеоднородных электрических полей в дефектных и бездефектных участках диэлектрических покрытий с учетом параметров и режимов формирования испытательного напряжения**

Для разработки методики НК, позволяющей выявлять указанные выше дефекты диэлектрических покрытий, и расчета параметров электроискровых дефектоскопов, а также для выявления закономерностей формирования электрического поля электродами различной формы и исполнения, было выполнено моделирование электрических полей (распределения напряженности) в межэлектродном промежутке методом конечных элементов.

Для расчета двухмерной задачи этим методом пространство модели «электрод – покрытие со сквозным дефектом – основание» разбивалось с помощью



прямых или кривых линий на отдельные части (рисунок 2.1.2), имеющие остаточно малые, но конечные размеры (конечные элементы) [63, 64].

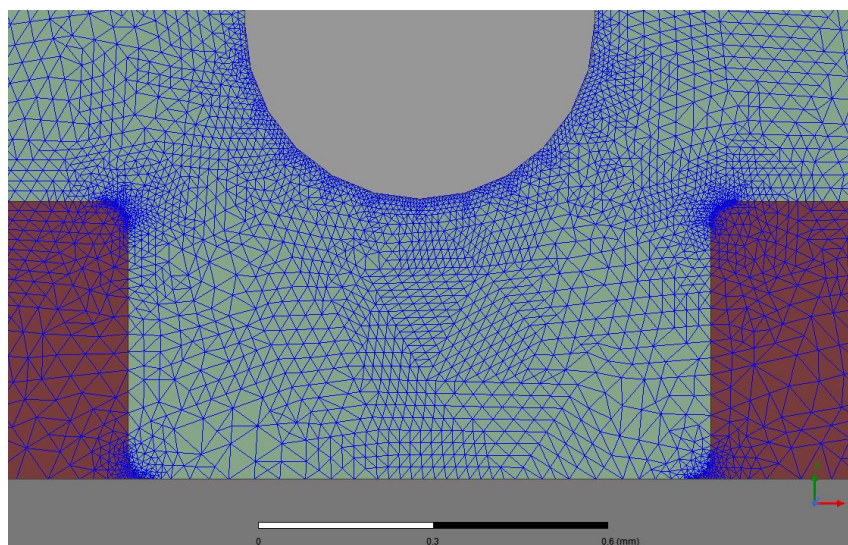


Рисунок 2.1.2 – Разбиение пространства модели «сферический металлический электрод – покрытие со сквозным дефектом – основание» на конечные элементы

Конечные элементы не должны перекрывать друг друга. Искомые значения параметров будем рассчитывать в узловых точках (узлах) – общих точках конечных элементов. Скалярная напряженность поля  $\varphi^E$  каждого элемента представима в виде полинома, с постоянными в пределах этого элемента коэффициентами [65]:

$$\varphi^E = a_i + b_i x + c_i y \quad (2.2)$$

Основная задача расчета методом конечных элементов – определить коэффициенты  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$ . После нахождения коэффициентов появляется возможность рассчитать напряженность поля в любой точке пространства модели.

Формирование системы уравнений для расчета поля методом конечных элементов допустимо выполнить несколькими способами: методом минимизации некоторого функционала; методом взвешенных невязок (например, методом Галеркина); методом наименьших квадратов [66]. Исходные данные, дополненные граничными условиями, и энергетические зависимости приводят к системе алгебраических уравнений, которая позволяет рассчитать искомые коэффициенты полиномов во всех конечных элементах.

При использовании программных продуктов, реализующих метод конечных элементов, разработаны конечно-элементные модели электродов над бездефектными участками покрытия и над дефектами, и рассчитано распределение напряженности электрического поля в межэлектродном промежутке при использовании электродов различной формы.

В частности, для пружинного электрода конечно-элементные модели и картины распределения напряженности электрического поля на оси витка, при нахождении над дефектом, выглядит следующим образом (рисунок 2.1.3). При этом, диаметр пружины электрода – 19 мм, толщина покрытия  $d = 600$  мкм, диаметр дефекта – 1 мм, испытательное напряжение электрода  $U = 2,5$  кВ.

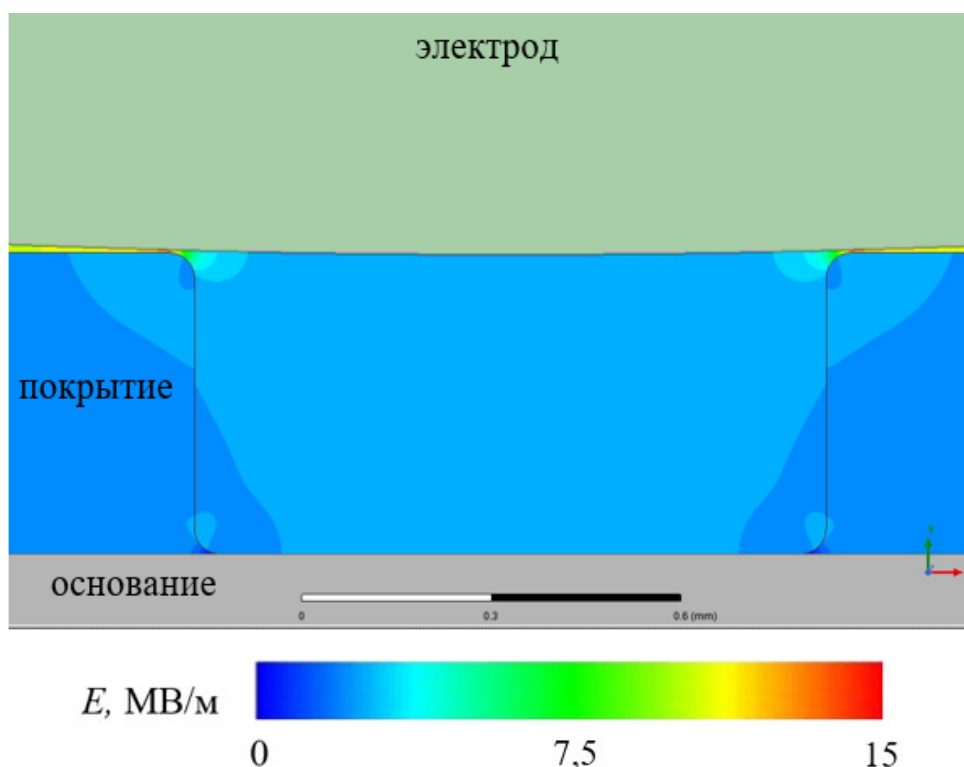


Рисунок 2.1.3 – Конечно-элементная модель распределения напряженности электрического поля в сквозном дефекте покрытия диаметром 1 мм, создаваемом пружинным электродом. Крупный план дефекта

Как видно из конечно-элементной модели для пружинного электрода, находящегося над дефектом покрытия, в воздушном промежутке сквозного

дефекта будет создаваться квазиоднородное электрическое поле. Так происходит вследствие того, что диаметр пружинного электрода много больше диаметра сквозного дефекта. Также при увеличении диаметра дефекта или уменьшении размера электрода, соотношение размера электрода к площади дефекта будет уменьшаться. Так, конечно-элементные распределения напряженности электрического поля в сквозном дефекте покрытия для электродов с диаметром острия приведены на рисунках 2.1.4 и 2.1.5.

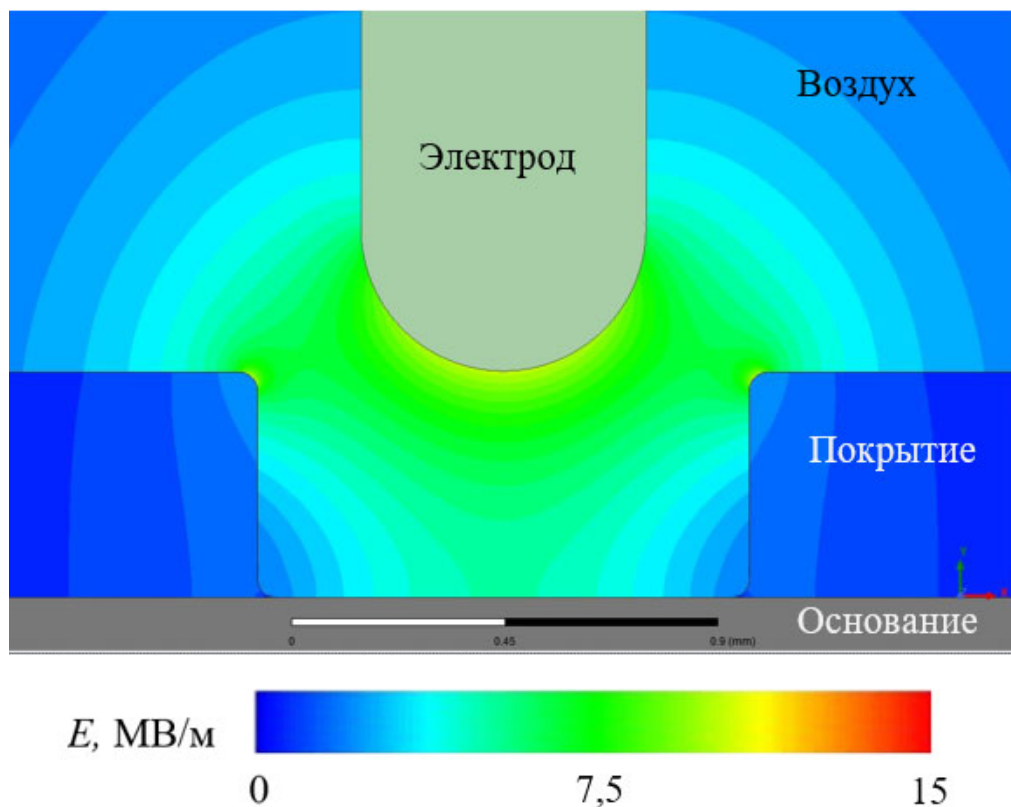


Рисунок 2.1.4 – Конечно-элементная модель распределения напряженности электрического поля в сквозном дефекте покрытия диаметром 1 мм, создаваемом электродом типа стержень с диаметром острия 0,5 мм

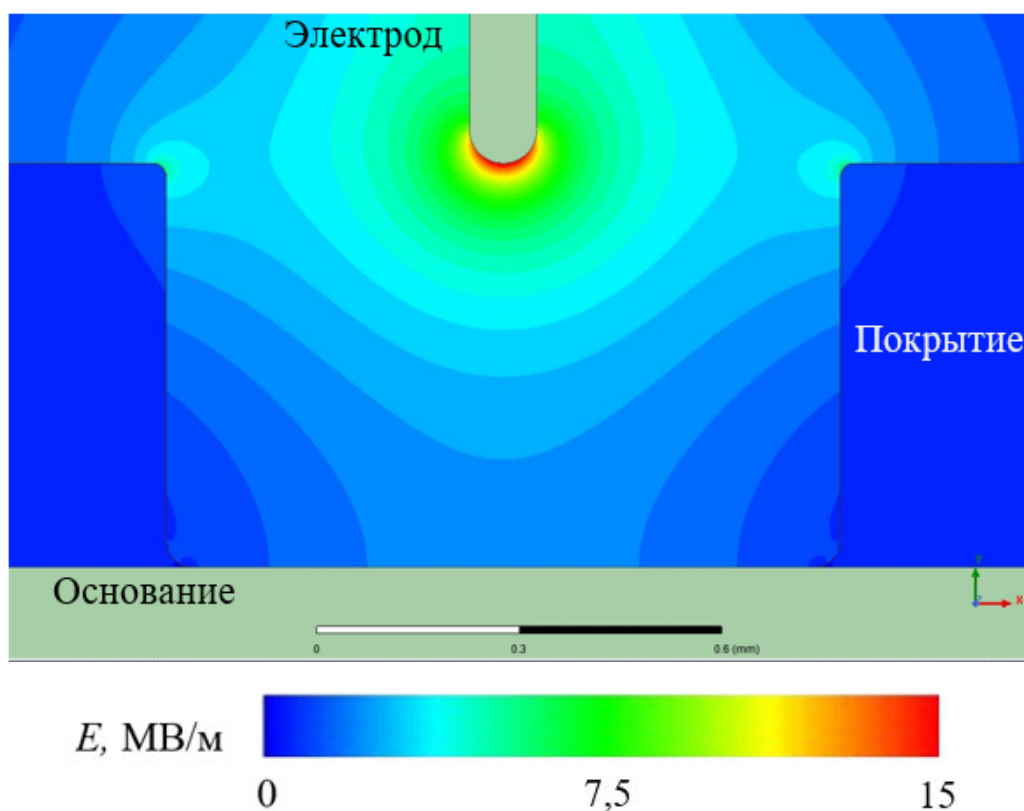


Рисунок 2.1.5 – Конечно-элементная модель распределения напряженности электрического поля в сквозном дефекте покрытия диаметром 1 мм, создаваемом электродом типа стержень с диаметром острия 0,1 мм

Как видно из вышеприведенных моделей, форма электрода оказывает значительное влияние на неоднородность электрического поля в области дефекта. Так как вероятность формирования искрового разряда наибольшая в области наименьшего межэлектродного расстояния, то представляет интерес исследовать распределение напряженности именно в этой области дефектного участка покрытия (рисунок 2.1.6).

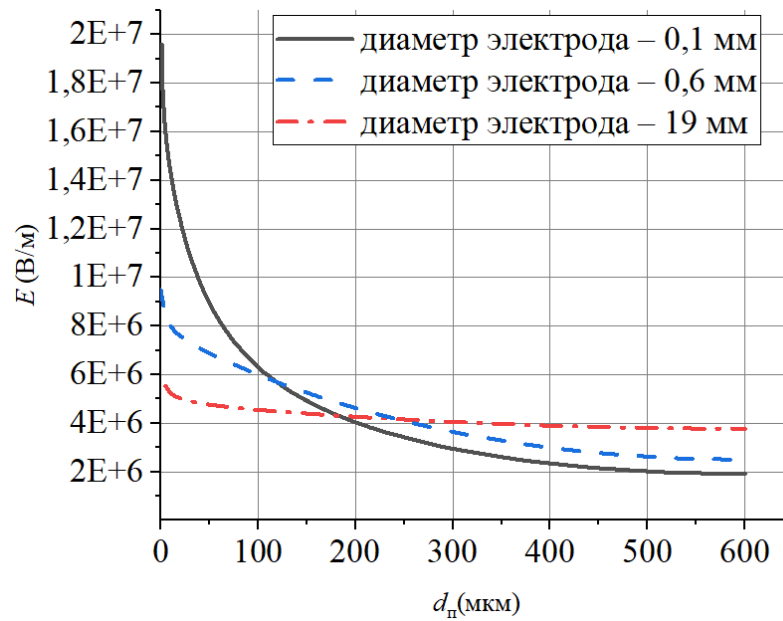


Рисунок 2.1.6 – Зависимости распределения напряженности электрического поля в области наименьшего межэлектродного расстояния

Из рисунка 2.1.6. видно, что при проведении контроля электроискровым методом, форма электрода оказывает значительное влияние на неоднородность электрического поля в межэлектродном промежутке. Результаты моделирования показывают, что при уменьшении соотношения диаметра острия контролирующего электрода к диаметру дефекта, неоднородность электрического поля в межэлектродном промежутке возрастает, что, в свою очередь, будет влиять на величину необходимого (минимального) испытательного напряжения для гарантированного выявления сквозных дефектов малого диаметра и снижения нижней границы толщин покрытий. Установление этих зависимостей может расширить область применения электроискрового контроля и повысить его достоверность, чему будет посвящена третья глава работы.

## 2.2. Расчет испытательных напряжений при выявлении сквозных и несквозных дефектов в расширенном диапазоне толщин диэлектрических покрытий электроискровым методом НК

Так как различия в механизмах формирования пробоя в различных видах дефектов объекта контроля накладывает 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 [47].

Из основных положений этой теории выведена зависимость для расчета пробивного напряжения воздушного межэлектродного промежутка в однородном электрическом поле:

$$U_{пр} = \frac{B_0 \cdot P \cdot d_{п}}{\ln \frac{A_0 \cdot P \cdot d_{п}}{\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}} \quad (2.1)$$

здесь  $P$  – давление газа;  $A_0$  – коэффициент, зависящий от состава газа;  $B_0$  – коэффициент, зависящий от энергии ионизации газа;  $\gamma$  – коэффициент вторичной ионизации (второй коэффициент Таунсенда).

Из (2.1) следует, что при неизменной внешней температуре  $U_{пр}$  в однородном поле является нелинейной функцией произведения давления газа  $P$  на величину межэлектродного промежутка  $d_{п}$ , т.е.  $U_{пр} = f(P \cdot d_{п})$ . Для воздуха формула дает

результаты, согласующиеся результатами экспериментов в диапазоне толщин покрытий от 0,1 до 50 мм (при  $P = 10^5$  Па).

В свою очередь, отсюда следует, что электрическая прочность воздушного промежутка  $E_{\text{пр}} = U_{\text{пр}} / d_{\text{п}}$ , определяемая при нормальном атмосферном давлении, равна (рисунок 2.2.1):

$$E_{\text{пр}} = \frac{B_0 \cdot P}{\ln \frac{A_0 \cdot P \cdot d_{\text{п}}}{\ln(1 + \frac{1}{\gamma})}} \quad (2.2)$$

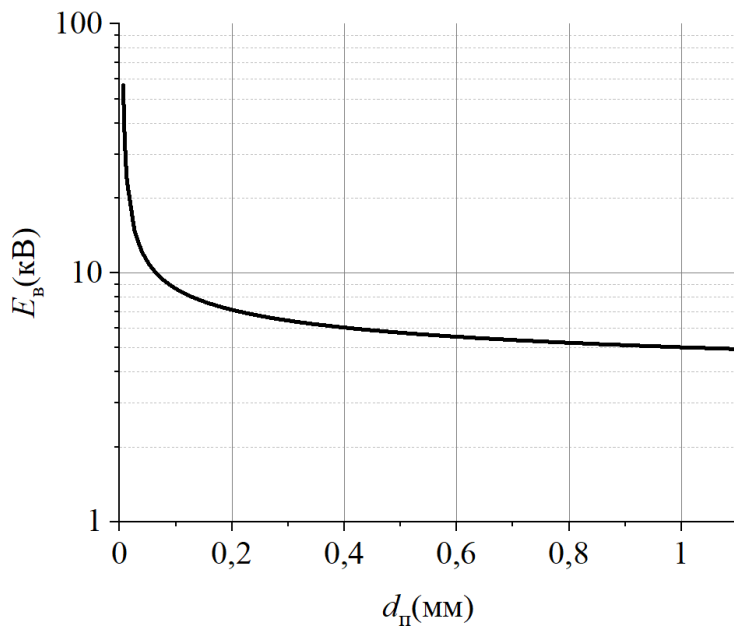


Рисунок 2.2.1 – Кривая Пашена для атмосферного воздуха при нормальных условиях

Также следует учитывать, что при  $P = \text{const}$  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, для возникновения ударной ионизации (пробоя воздушного промежутка) необходимо увеличивать величину испытательного напряжения  $U_{\text{и}}$ . С другой стороны, при  $d$  большем, чем некое минимальное значение, увеличиваются длина свободного пробега электронов и накапливаемая ими энергия, и при этом количество столкновений не

уменьшается, что, в свою очередь, увеличивает вероятность возникновения акта ударной ионизации.

Таким образом, для увеличения вероятности ударной ионизации электронов в воздухе необходимо, чтобы как можно большее число столкновений заканчивалось ионизацией, для чего необходимо увеличивать энергию электронов на длине свободного пробега, т. е. увеличивать  $U_{и}$  (увеличивать напряженность поля  $E$  в межэлектродном промежутке). Особенно важно это учитывать при контроле покрытий малой толщины ( $d_{п} < 1$  мм), в области существенно нелинейной зависимости  $U_{пр}(P \cdot d_{п})$ .

С другой стороны, стандартные методики определения испытательного напряжения предлагают расчет  $U_{пр}$  на основе эмпирических зависимостей [39, 57]:

$$U_{пр} = M \cdot \sqrt{d}, \quad (2.3)$$

где,  $M$  - постоянный эмпирический коэффициент, зависящий от толщины покрытия.

Таблица 2.1.1. Значение коэффициента  $M$  для различных толщин покрытий

Диапазон толщины покрытия, мм	Значение $M$
$\leq 1,00$	$M_1=3294$
$> 1,00$	$M_2=7843$

На рисунке 2.2.2 приведены зависимости  $U_{пр}(d)$ , рассчитанные по (2.1) и (2.3).



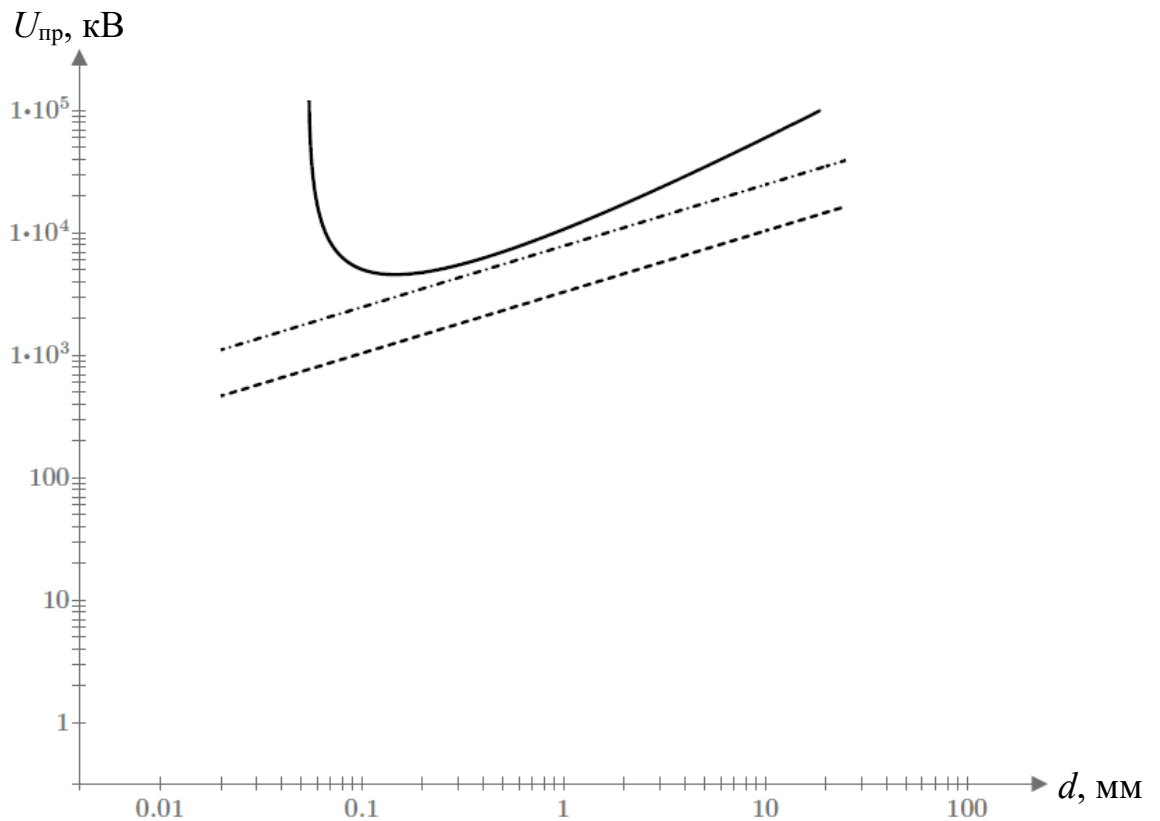


Рисунок 2.2.2 – Расчетные характеристики испытательного напряжения:  $U_{пр1}(d)$  – расчет по эмпирической формуле (2.3) для  $M_1$ ;  $U_{пр2}(d)$  – расчет по эмпирической формуле (2.3) для  $M_2$ ;  $U_{пр3}(d)$  – расчет по формуле (2.1) для атмосферного воздуха при нормальных условиях

Как видно из рисунка 2.1.2, результаты расчета по (2.1) в достаточной степени согласуются с эмпирическими зависимостями (2.3) в диапазоне  $d_{п} = 0,5 \dots 1$  мм и только для выявления сквозных дефектов покрытий. При меньших толщинах покрытий, проявляется эффект электрического упрочнения, который не учитывается Таунсендовской теорией. В диапазоне толщин покрытий  $d_{п} = 1 \dots 25$  для выявления сквозных дефектов покрытий допустимо использование как (2.1) так и (2.3) для расчета  $U_{пр}$ , так как электрическая прочность промышленных покрытий в этом диапазоне толщин превышает электрическую прочность воздуха на несколько порядков и пробой бездефектных участков покрытия практически исключен. Однако при повышении испытательного напряжения возрастает амплитуда частичных разрядов, что следует учитывать при разработке методик выбора испытательного напряжения и оборудования.

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.) 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 [91]. На базе этого утверждения Ю.Н. Вершининым была предложена зависимость для расчета  $E_{пр}$  для широкого круга электроизоляционных материалов:

$$E_{пр} = K \cdot K_B \cdot (A_c^0)^{1.1} \cdot \exp\left(\frac{a}{b + \lg(d)} + \frac{m}{n + \lg(\tau)}\right), \quad (2.4)$$

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.

Выражение (2.4) достаточно универсально и может применяться при расчетах условия пробоя для различных электроизоляционных материалов толщиной от 0,01 до 40 мм при длительности импульса приложенного контрольного напряжения  $\tau_{имп} = 0,1 - 10$  мкс.

Где

$$A_c^0 = A_c \cdot \frac{\gamma}{M} = 1,08 \cdot W_c \cdot \frac{\gamma}{M}, \text{ где } A_c = W_c + B_c = 1,08 \cdot W_c, \quad (2.5)$$

а  $W_c$ , в свою очередь, определяется выражением:

$$W_c = \sum_{i=1}^n n_i \cdot D_i + m \cdot J, \quad (2.6)$$

где  $\gamma$  – плотность;  $M$  – молекулярная масса;  $n_i \cdot D_i$  – энергия диссоциации связей;  $m \cdot J$  – энергия ионизации атомов.

Так, для покрытия Parylene-N изготавливаемого из поли-*n*-ксилена (ППК), используемого в качестве защитного антикоррозионного покрытия печатных плат [88], структурная формула которого приведена на рисунке 2.2.3, приведен расчёт электрической прочности по (2.4).

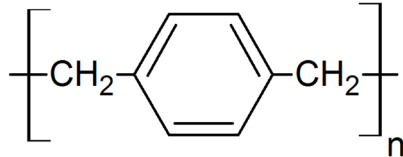


Рисунок 2.2.3 – Структурная формула поли-*n*-ксилена

Согласно (3.4 – 3.6), для расчета электрической прочности ППК необходимо знать энергию диссоциации связей  $\sum_{i=1}^n n_i \cdot D_i$  и энергию наименьшую энергию ионизации атомов  $m \cdot J$ , а также плотность  $\gamma$  и молекулярную массу  $M$  [90, 91,].

$$E_{\text{пр}} = K \cdot K_B \cdot (A_c^0)^{1,1} \cdot \exp\left(\frac{a}{b + \lg(b)} + \frac{m}{n + \lg(\tau)}\right) = *$$

$$* = 5,3 \cdot 0,5 \cdot (1522 \cdot 1,08 \cdot \frac{1,1}{47,2})^{1,1} \cdot \exp\left(\frac{31}{5,32 + \lg(0,1)} + \frac{1,5}{2,13 + \lg(5)}\right) = *$$

$$* = 324,8 \text{ кВ/мм}$$

В [89] указан диапазон значений электрической прочности ППК, полученных экспериментально 260-300 кВ/мм. При сравнении результатов расчета и эксперимента видно, что в основном имеется удовлетворительное количественное совпадение данных эксперимента и расчета. Важно, что расчет дает правильную зависимость  $E_{\text{пр}}$  от  $d$ .

Следует отметить, что определение  $E_{\text{пр}}$  по (2.4) 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. Поэтому  $E_{пр}$  многокомпонентных покрытий или покрытий,  $E_{пр}$  которых не удастся определить расчетным путем, должны определить экспериментально. Однако (2.4) позволяет построить вольт-секундные характеристики таких покрытий, основываясь на экспериментально полученном значении электрической прочности (при известных параметрах  $U_{пп}$ ,  $\tau$ ,  $d$ ,  $K_B$ ). Для экспериментального определения  $U_{пп}$  предлагается использовать образец покрытия, идентичный или близкий контролируемому по составу и толщине, нанесенный на металлическое основание.

### **2.3. Влияние электрических и геометрических параметров покрытий и параметров воздушной среды на результаты контроля**

Как было указано выше, задачей электроискрового метода НК является выявление дефектных участков диэлектрических покрытий на электропроводящих основаниях. Однако в процессе испытаний могут возникать ситуации перебраковки, когда за дефект принимается бездефектная область диэлектрического покрытия, и недобраковки, когда дефектная область покрытия не выявляется. В этом случае под достоверностью НК будем понимать вероятность принятия безошибочных решений о наличии или отсутствии дефектов [69]. Достоверность определяется численными (расчетными) методами или экспериментально и зависит от соотношения испытательного напряжения метода  $U_n$  электрической прочности покрытия  $E_n$  и атмосферного воздуха  $E_b$  в области контроля. Также на достоверность результатов электроискрового контроля существенное влияние оказывают различные параметры (которые будем именовать мешающими) метода и объекта контроля, такие как: электрическая прочность

покрытия, разнотолщинность покрытия, соотношение размеров дефекта и электрода, вид дефекта, испытательное напряжение, температура, давление и влажность окружающего воздуха.

*Электрическая прочность покрытия*  $E_{\text{п}}$  определяет способность покрытия выдерживать приложенное к нему высокое электрическое напряжение и численно определяется как отношение прикладываемого напряжения к толщине покрытия  $d$ . От значения  $E_{\text{п}}$  зависит возможность применения электроискрового метода контроля, т.к. дефектные участки покрытия выявляются по наличию или отсутствию искрового разряда в определенной области покрытия.

Также стоит учитывать, что для осуществления достоверного электроискрового контроля значение электрической прочности покрытия  $E_{\text{п}}$  должно превышать электрическую прочность дефекта покрытия  $E_{\text{в}}$ .

$$\Delta E = E_{\text{п}} - E_{\text{в}} > 0$$

в противном случае применение электроискрового метода НК будет невозможно в силу отсутствия селективности.

*Толщина диэлектрического покрытия*  $d_{\text{п}}$  является контролируемым параметром при применении электроискрового метода НК. От толщины покрытия зависит его электрическая прочность и, как следствие, селективность и возможность применения электроискрового метода НК.

При уменьшении толщины диэлектрического покрытия возрастает электрическая прочность дефектов, заполненных атмосферным воздухом, как следствие, уменьшается  $\Delta E$ , что ужесточает требования и выбору контрольного напряжения, а в некоторых случаях делает проведения контроля невозможным, в случае, когда  $\Delta E$  стремится к 0 или становится отрицательной.

Значительное влияние на результаты контроля может оказать *разнотолщинность покрытия*. Являясь влияющий параметром, разнотолщинность ограничивает диапазон применения электроискрового метода НК. В случае, если электрическая прочность покрытия в 2 – 4 раза превышает электрическую

прочность сквозного дефекта, и задача заключается в выявлении исключительно сквозных дефектов покрытия, то при уменьшении толщины до некоего минимального значения, пробой будет возникать не только в местах нарушения сплошности, но и в местах утонения покрытия до указанного значения. Помимо сквозных дефектов будут выявляться и утонения (допустимые в данном случае).

Также с учетом того, что электроискровой метод НК применяется на объектах, находящихся в различных климатических зонах земного шара, важно знать зависимости основного параметра метода – испытательного напряжения – от параметров среды, которые в данном случае следует рассматривать как мешающие: атмосферное давление, температура и влажность окружающего воздуха.

Так, от атмосферного давления существенно зависит напряжение формирования искрового разряда в межэлектродном промежутке (сквозном дефекте покрытия). Эта зависимость полностью описывается законом Пашена, который устанавливает зависимость между напряжением формирования электрической дуги, атмосферным давлением и шириной межэлектродного промежутка [70].

Из анализа кривой Пашена (рисунок 2.2.3) следует, что напряженность электрического поля  $E$ , необходимая для создания разряда в межэлектродном промежутке шириной 10 мкм, намного больше, чем та, что необходима для создания разряда в межэлектродном промежутке шириной 1 мм. Для зазора 10 мкм напряжение, необходимое для образования разряда, составляет 416 В, что составляет 41,6 кВ/мм. Это примерно в 13 раз больше, чем напряженность поля, которую следует обеспечить для образования разряда в случае межэлектродного промежутка 1 мм [71]. Уравнение теряет точность для зазоров менее 10 мкм в воздухе при давлении в одну атмосферу и неверно предсказывает бесконечное напряжение дуги при зазоре примерно 10 мкм [67].

Такое значительно увеличение электрической прочности промежутка происходит за счет существенного уменьшения длины свободного пробега  $\mu$  электронов в газе. При этом  $\mu$  обратно пропорционально давлению газа при постоянной температуре. В воздухе при стандартных условиях  $\mu$  составляет около

0,5 мкм, что сопоставимо с величиной межэлектродного промежутка 10 мкм (для минимального напряжения формирования разряда). Таким образом, электронам требуется набирать энергию, достаточную для формирования лавины за малое количество столкновений, что приводит к увеличению пробивного напряжения промежутка. Больше столкновений будет происходить на пути электронов между электродами в газе с более высоким давлением. Когда произведение  $P \cdot d$  относительно велико, электрон будет сталкиваться с множеством различных молекул газа, когда он движется от катода к аноду. Каждое из столкновений меняет направление движения электронов в случайном порядке, поэтому электрон не всегда ускоряется электрическим полем - иногда он движется, обратно к катоду и замедляется полем. Столкновения уменьшают энергию электрона и затрудняют ионизацию молекулы. Потери энергии из-за большего числа столкновений требуют больших напряжений для электронов, чтобы накапливать энергию, достаточную для ионизации многих молекул газа, что необходимо для лавинного пробоя.

Атмосферное давление также изменяется при изменении температуры воздуха. При увеличении *температуры* воздуха, уменьшается атмосферное давление и наоборот. Это связано с тем, что нагретый воздух движется только вверх, ослабляя свое давление на поверхность [47].

Также температура покрытия оказывает значительное влияние на пробивное напряжение твердых диэлектриков при увеличении времени приложения напряжения. При увеличении времени приложения испытательного напряжения к диэлектрическому покрытию и увеличению его температуры, возрастает вероятность развития теплового пробоя диэлектрического покрытия [46].

Помимо давления и температуры, на пробивное напряжение промежутка влияет влажность воздуха [49, 72, 73], находящегося в межэлектродном промежутке, особенно в условиях формирования сильнонеоднородного электрического поля. Молекула воды состоит из двух атомов водорода, связанных с атомом кислорода. Ее изогнутая форма объясняется наличием у атома кислорода, помимо связей с атомами водорода, еще и двух свободных пар электронов. Эти электронные пары, как свободные, так и участвующие в связи, отталкиваются друг

от друга. Поскольку кислород более электроотрицательный, чем водород, атом кислорода притягивает электроны и удерживает их вдали от атомов водорода. Поэтому на кислороде образуется частичный отрицательный заряд, в то время как со стороны атомов водорода – частичный положительный заряд. Следовательно, вода классифицируется как полярная молекула из-за ее ковалентных полярных связей и изогнутой формы. Вследствие чего пары воды, находящиеся во внешнем электрическом поле, захватывают медленные электроны, которые имеются в области относительно слабого электрического поля.

В случае же плоских электродов электрическое поле однородно во всем межэлектродном пространстве, поэтому электроны после ионизации быстро ускоряются, и их захват становится незначительным. Поэтому при пробое в однородном электрическом поле влияние влажности незначительно [72].

Влажность должна учитываться исходя из следующих зависимостей:

$$U_{\text{пр}} = U_0 \cdot \frac{\delta}{k}$$

где  $U_0$  – пробивное напряжение при нормальных условиях ( $P = 760$  мм рт.ст.,  $T = 20$  °С, влажность  $\omega = 11$  г/м<sup>3</sup>),  $\delta$  – коэффициент, учитывающий влияние давления и температуры воздуха на пробивное напряжение.

Например, для системы электродов «острие – плоскость» поправка на влажность составляет  $\pm 6$  % от нормальных условий (рисунок 2.3.1), кривая  $F$ ).



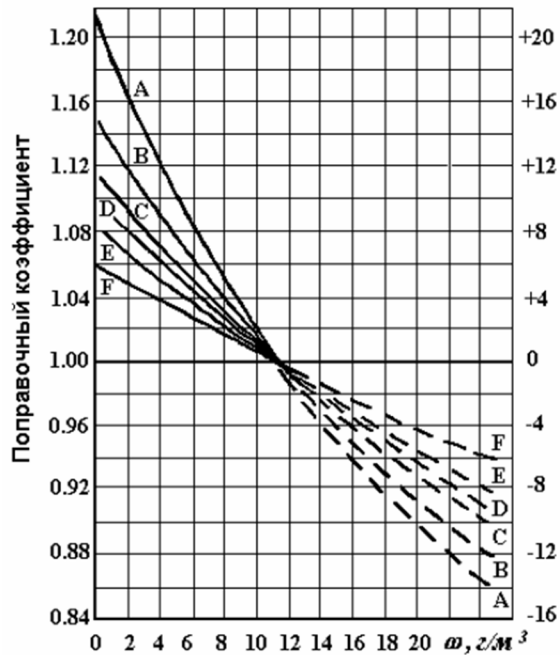


Рисунок 2.3.1 – График для определения поправочного коэффициента в зависимости от абсолютной влажности воздуха

Для определения влияния влажности и температуры воздуха на  $U_{пр}$  при использовании рассматриваемого метода была проведена серия экспериментов. В частности, при отличающихся влажности и температуре, соответствующим типичным условиям «улица, поздняя осень» и «лабораторные/цеховые условия в отапливаемом помещении» были измерены  $U_{пр}$  для межэлектродных промежутков различной  $d_{п}$ .

В качестве покрытия использовались меры толщины покрытия из органического стекла, уложенные на металлическое основание. В качестве сквозного дефекта выступало пространство между мер, уложенных таким образом, чтобы обеспечивать прохождение воздушных потоков в сквозном дефекте. Роль электрода выполнял стальной стержень с диаметром острия 0,6 мм. Толщина покрытия в районе сквозного дефекта принималась равной толщине мер. Влажность в помещении поддерживалась увлажнителем воздуха и измерялась измерителем влажности и температуры Center 315. Структурная схема экспериментальной установки представлена на рисунке 2.3.2. К покрытию прикладывался электрод на штативе, таким образом, чтобы оконечность электрода

находилась непосредственно над дефектом. Внешний вид области контроля приведен на рисунке 2.3.3. Результаты измерений приведены на рисунке 2.3.4.

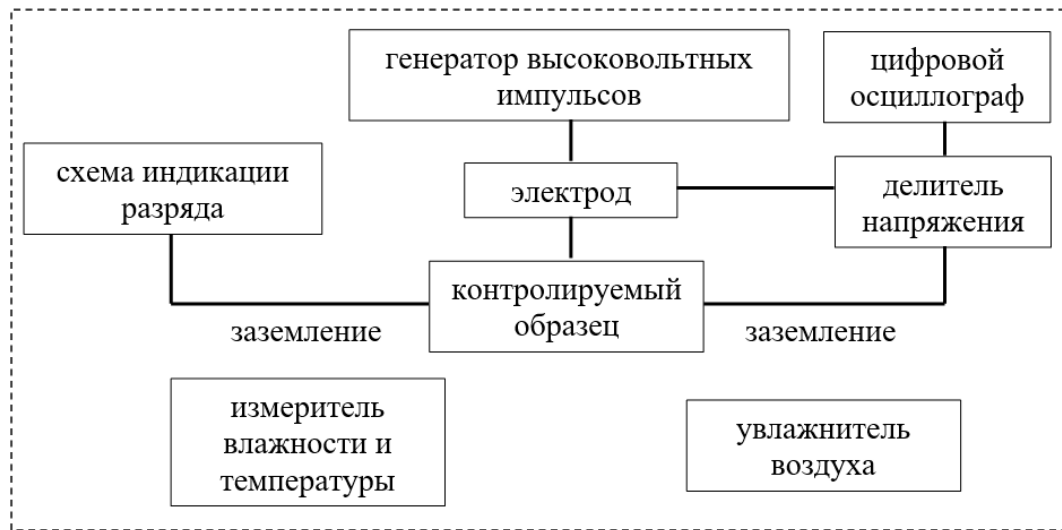


Рисунок 2.3.2 – Структурная схема экспериментальной установки.



Рисунок 2.3.3 – Экспериментальная установка. Вид электрода, образца сквозного дефекта, измерителя влажности и температуры.

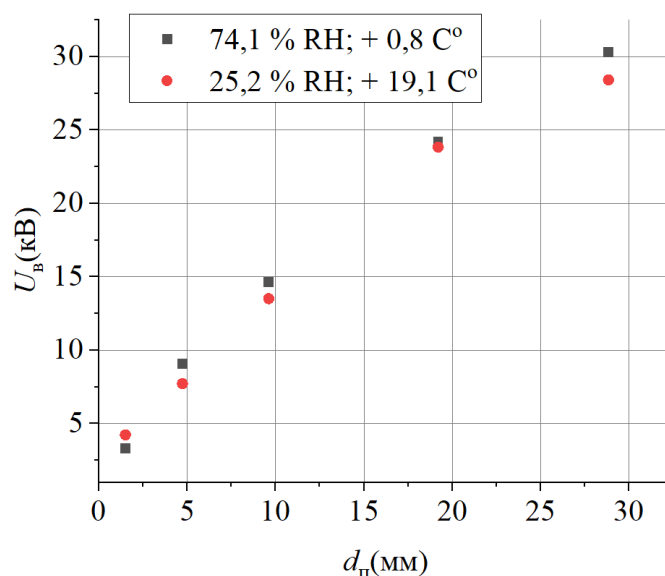


Рисунок 2.3.4 – Зависимости пробивного напряжения  $U_B$  от длины межэлектродного промежутка  $d_n$  при различных атмосферных условиях

Как видно из зависимостей, увеличение влажности и уменьшение температуры воздуха приводят к увеличению его пробивного напряжения (причины описаны выше).

*Запыленность* поверхности контролируемого объекта, обусловленная состоянием воздуха, существенно ухудшает параметры контроля за счет облегчения формирования поверхностных разрядов диэлектрика [74]. Наличие на поверхности диэлектрического покрытия электропроводящих частиц и частиц с электрической прочностью меньше, чем у окружающего воздуха может вызывать развитие частичных разрядов по поверхности диэлектрика. Электрический ток, формирующийся у поверхности, за счет емкостной связи может формировать ложный сигнал о дефекте покрытия.

## 2.4. Выводы к главе 2

1. Рассчитаны зависимости испытательного напряжения, обуславливающие возникновение искрового разряда в сквозном и несквозном дефектах диэлектрических покрытий электропроводящих изделий с учетом параметров воздушной среды и покрытий.

2. Показано влияние неоднородности электрического поля в области сквозных дефектов на возможность снижения величины необходимого испытательного напряжения в области малых толщин покрытий.

3. Установлены условия применения электроискрового метода НК для выявления сквозных дефектов и допускового контроля утонений диэлектрических покрытий в расширенном диапазоне их электрических и геометрических параметров.

4. Проанализировано влияние электрических и геометрических параметров покрытий и параметров воздушной среды на физические процессы искрообразования и фиксации импульса тока при искровом разряде и результатах контроля.

### ГЛАВА 3. МЕТОДИЧЕСКИЕ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПОВЫШЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И РАСШИРЕНИЯ ДИАПАЗОНА ТОЛЩИН КОНТРОЛИРУЕМЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО МЕТОДА НК

**3.1. Параметры формируемых неоднородных электрических полей, определяющие чувствительность, диапазон контролируемых толщин покрытий и информативность электроискрового контроля.**

Как было указано в главе 2, основными параметрами электрического поля являются его напряженность, форма (распределение) и полярность. Так как селективность метода основана на значении разницы пробивных напряженностей покрытия и дефекта  $\Delta E = E_{\text{покрытия}} - E_{\text{дефекта}}$ , то важно рассмотреть влияние параметров поля именно на  $\Delta E$ . Стоит также дать краткое пояснение по каждому из рассматриваемых параметров поля.

Расчет напряженности электрического поля подробно рассматривался в разделе 2.2. Однако рассматривая  $\Delta E$ , стоит добавить, что, так как, напряженность является мерой силы поля [43], то именно ее увеличение создает условия для развития разрядных процессов как в покрытии, так и в воздушных промежутках.

Под *однородностью* стоит понимать форму распределения напряженности электрического поля в межэлектродном промежутке (на дефектных и бездефектных участках покрытия). Принято разделять формы электрических полей на однородные, слабонеоднородные и сильнонеоднородные [75], при этом, в общем случае, степень неоднородности электрического поля между двумя электродами характеризуется коэффициентом неоднородности  $K_n$ , который равен отношению максимальной напряженности электрического поля  $E_{\text{макс}}$  к средней напряженности  $E_{\text{ср}}$  между электродами т.е.

$$K_H = \frac{E_{\text{макс}}}{E_{\text{ср}}}, \quad (3.1)$$

при этом,

$$E_{\text{ср}} = \frac{U}{d} \quad (3.2)$$

Вместе с тем  $E_{\text{макс}}$  зависит от приложенного к электродам напряжения, конфигурации и размеров электродов, а также расстояния между ними [13]. Для однородного поля коэффициент неоднородности  $K_H = 1$ , для слабонеоднородного  $K_H \leq 3$ , для сильнонеоднородного  $K_H \geq 3$ .

Кроме этого, на форму электрического поля влияет система электродов. Она может быть симметричная и несимметричная. При симметричной системе электроды имеют одинаковую форму и размеры, отсутствует заземление какого-либо из них. При несимметричной системе электроды имеют отличающуюся конфигурацию и размеры, либо один из них заземлен (рисунок 3.1.1).

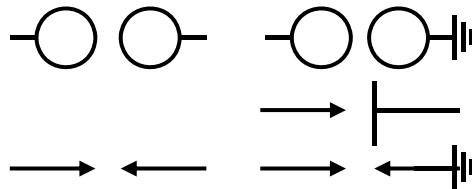


Рисунок 3.1.1 – Схематичное изображение систем электродов к описанию формы электрического поля

При анализе следует учитывать, что в зависимости от формы электрического поля, на  $\Delta E$  оказывает влияние *полярность* системы электродов. Так, в однородных и слабонеоднородных полях, где минимальный и средний градиенты напряжения мало отличаются друг от друга, влияние полярности приложенного контрольного напряжения невелико. В сильнонеоднородных полях ( $K_H > 3$ ), при несимметричных

электродах, существенное влияние на величину разрядного напряжения оказывает полярность [76].

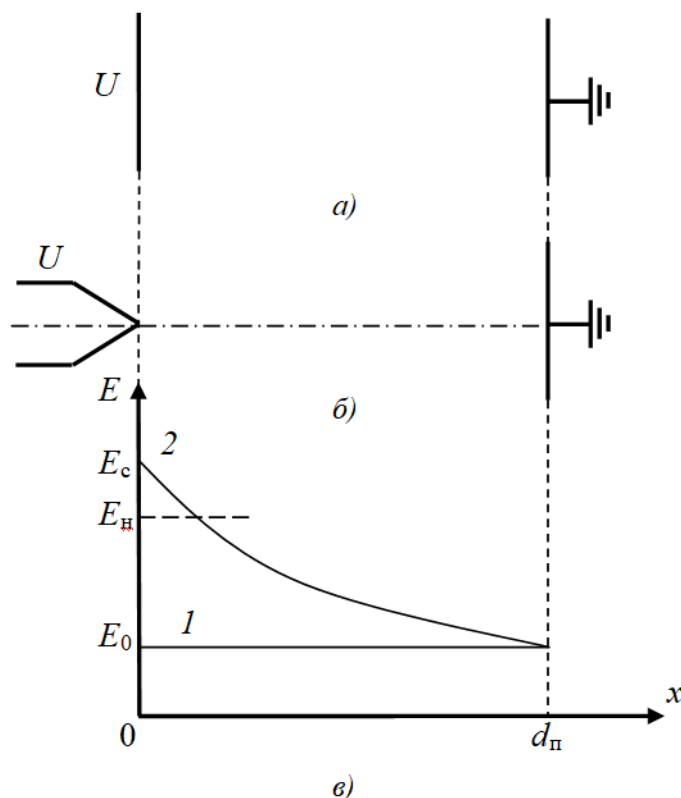
Рассмотрим влияние вышеописанных параметров на процесс контроля электроискровым методом НК, а также его информативность.

### **3.2. Повышение информативности электроискрового контроля в использовании сильнонеоднородных электрических полей**

В общем случае в неоднородном поле напряженность  $E$  в различных точках межэлектродного промежутка отличается по величине и по направлению. Такие поля создаются при использовании пар электродов стержень - стержень, стержень - плоскость и некоторых других (рисунок 3.1.1). Для рассматриваемых задач наибольший интерес представляет пара стержень – плоскость, так как контролируемый электрод в подавляющем большинстве случаев имеет размер много меньший размера электропроводящего основания. Рисунок 3.2.1 демонстрирует типовые зависимости напряженности  $E$  электрического поля в межэлектродном промежутке для системы плоскость – плоскость и для системы заостренный стержень (электрод) – плоскость на оси стержня [49].

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 [77]. 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. Разряд будет поддерживаться либо за счет фотоионизации из объема газа (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 ( $E_{cp} < E_n$ ) область коронного разряда будет продвигаться от стержня к плоскому электроду.

При достижении плоского электрода во всем воздушном промежутке образуется стример.



1 –  $E(d_n)$  для системы плоских электродов; 2 -  $E(d_n)$  для системы заостренный стержень – плоскость на оси стержня.

Рисунок 3.2.1 – Система плоских электродов (а), система заостренный стержень – плоскость (б) и соответствующие им зависимости напряженности электрического поля в межэлектродном промежутке (в)

Таким образом, 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 1 мм (ЛКП).



На основании этого предположения был проведен эксперимент по исследованию влияния формы электрода на испытательное напряжение электроискрового метода НК. Для этого на медное электропроводящее основание укладывались листы полиметилметакрилата (органическое стекло) различной толщины. В листах были сформированы цилиндрические отверстия диаметром 1 мм, имитирующие дефекты покрытий. В качестве электродов использовались сфера диаметром 40 мм и стержень с диаметром острия 600 мкм (рисунок 3.2.2). В процессе эксперимента в области дефекта формировались слабонеоднородное и сильнонеоднородное электрическое поле (рисунок 3.2.3).

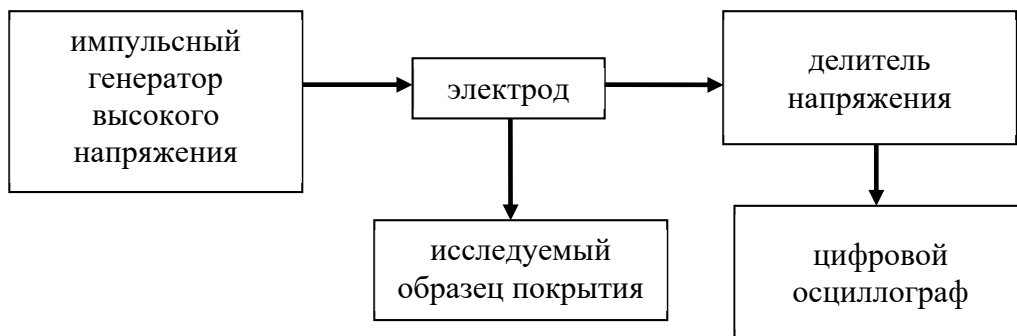
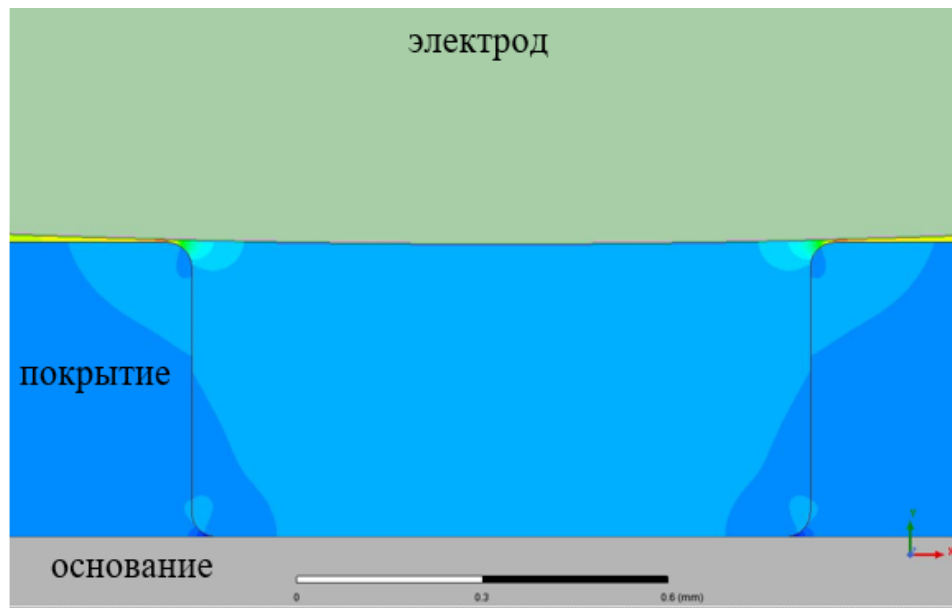
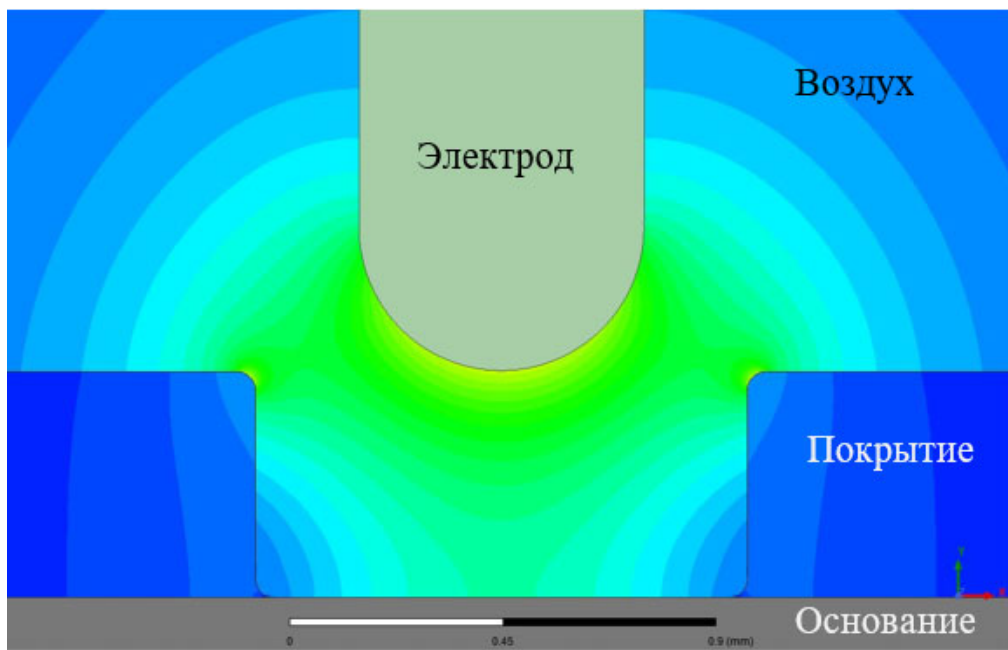


Рисунок 3.2.2 – Схема экспериментальной установки по измерению пробивного напряжения исследуемого диэлектрического покрытия

Также для исследуемых электродов были построены конечно-элементные модели распределения напряженности электрического поля в сквозном дефекте покрытия (рисунок 3.4.3).



а)



б)

а) шар диаметром 40 мм, б) стержень диаметром 0,6 мм.

Рисунок 3.2.3 – Конечно-элементная модель распределения напряженности электрического поля в покрытии со сквозным дефектом диаметром 1 мм

Измерения пробивного напряжения производились на образцах толщиной 100, 180, 290, 470 и 1000 мкм. Для каждого образца проводилась серия из 10-ти измерений. Результаты измерений приведены на рисунке 3.2.4.

Измерения показали, что значения  $U_{пр}$  шара превышают аналогичные значения для стержня. Причем, разница в значениях  $U_{пр}$  уменьшается при уменьшении толщины образцов, что согласуется с теорией [46, 67, 76]. Также результаты моделирования показали, что, градиент напряженности поля на оси стержня больше, чем на оси шара.

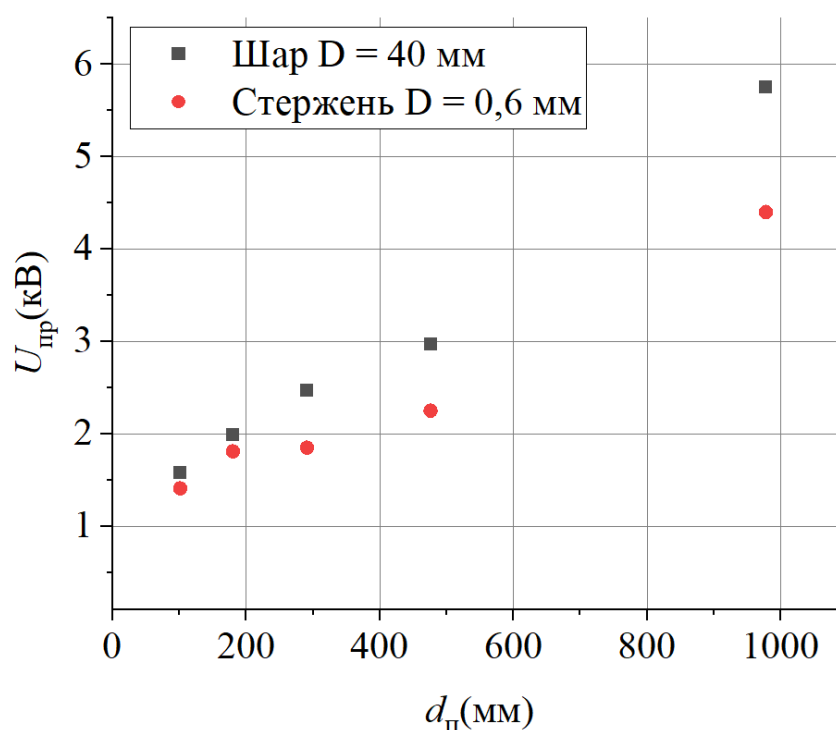


Рисунок 3.2.4 – Зависимость пробивного напряжения сквозного дефекта покрытия от толщины покрытия для электродов типа шар диаметром 40 мм и стержень диаметром 0,6 мм

Таким образом, в неоднородных электрических полях искровой разряд образуется при значениях  $U_{пр}$  меньших, чем в однородных полях, что может быть использовано в дальнейшем для разработки искательного оборудования. Снижение пробивного напряжения сквозного дефекта покрытия позволяет выявлять сквозные

дефекты в покрытиях с меньшей электрической прочностью, расширяя тем самым диапазон применения метода и информативность контроля.

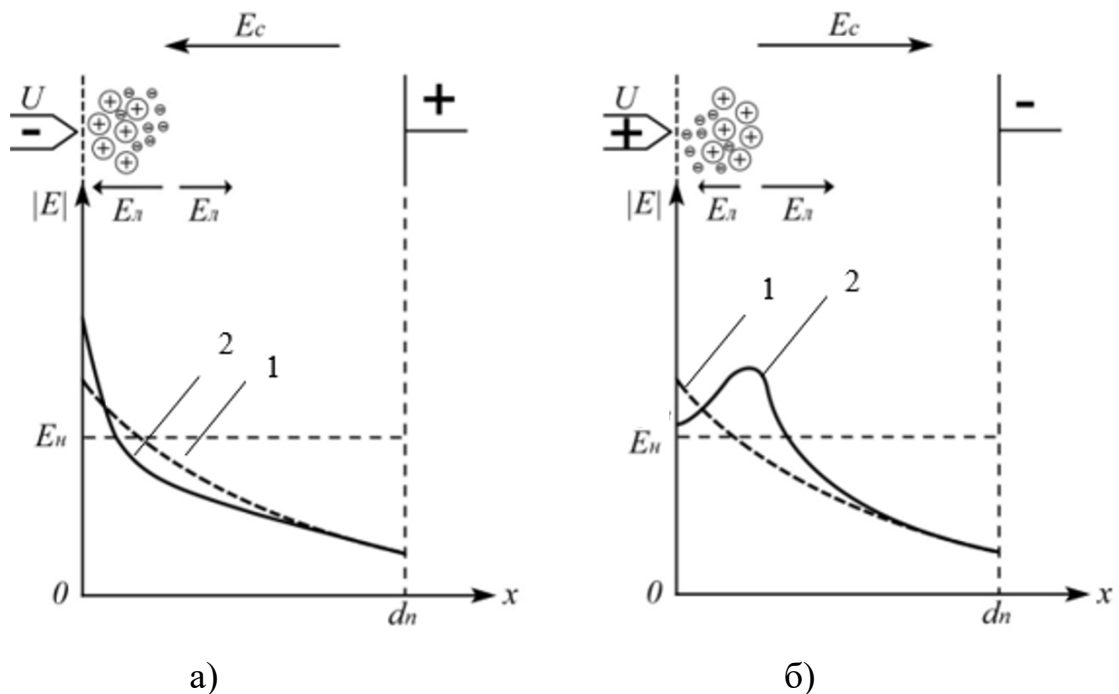
### **3.3. Расширение диапазона контролируемых толщин покрытий при учете полярности испытательного напряжения**

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 [78].

В сильнонеоднородных полях ( $K_H > 3$ ), при несимметричных электродах (например, контроле с использованием веерных или щеточных электродов), полярность  $U_H$  оказывает существенное влияние на величину  $U_{пр}$ .

Так, при отрицательной полярности испытательного напряжения на электроде, электрическое поле непосредственно у острия приводит к эмиссии электронов с катода, которые сразу попадают в сильное поле и производят 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, который, взаимодействуя с внешним полем, будет увеличивать напряженность непосредственно у острия и уменьшать в остальной части промежутка (рисунок 3.3.1 а). В свою очередь, увеличение напряженности поля у острия приводит к усилению эмиссии электронов с поверхности катода, которые, смешиваясь с положительным объемным зарядом, образуют у катода зародыш катодного стримера. Вследствие большого числа начальных лавин у катода, плазменный канал представляет собой более или менее однородный слой с радиусом кривизны большим, чем у острия.

Поэтому электрическое поле будет несколько выравниваться и напряженность во внешней области уменьшится. Это приведет к тому, что для дальнейшей ионизации в данной части промежутка необходимо значительно увеличить разность потенциалов между электродами. Несмотря на это, при дальнейшем увеличении напряжения происходит ионизация сразу после плазменного слоя, большое число образующихся лавин приводит к удлинению стримера. Однако из-за большого числа лавин головка стримера оказывается размыта. В силу рассмотренных выше особенностей развитие стримера происходит с большими трудностями.



1 – зависимость напряженности электрического поля для системы заостренный стержень – плоскость на оси стержня; 2 – результирующая напряженность в промежутке после возникновения лавин;  $E_n$  – напряженность возникновения самостоятельной формы разряда.

Рисунок 3.3.1 – Схематичное изображение образования а) анодного и б) катодного стримеров

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 (рисунок 3.3.1 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. 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.

Все вышесказанное подтверждается данными эксперимента по определению пробивного напряжения сквозных дефектов покрытий заданной толщины в зависимости от приложенной полярности импульсного напряжения (рисунок 3.3.2). Длительность импульса составляла 18 мкс, амплитуда импульса изменялась от 0,5 до 15 кВ.

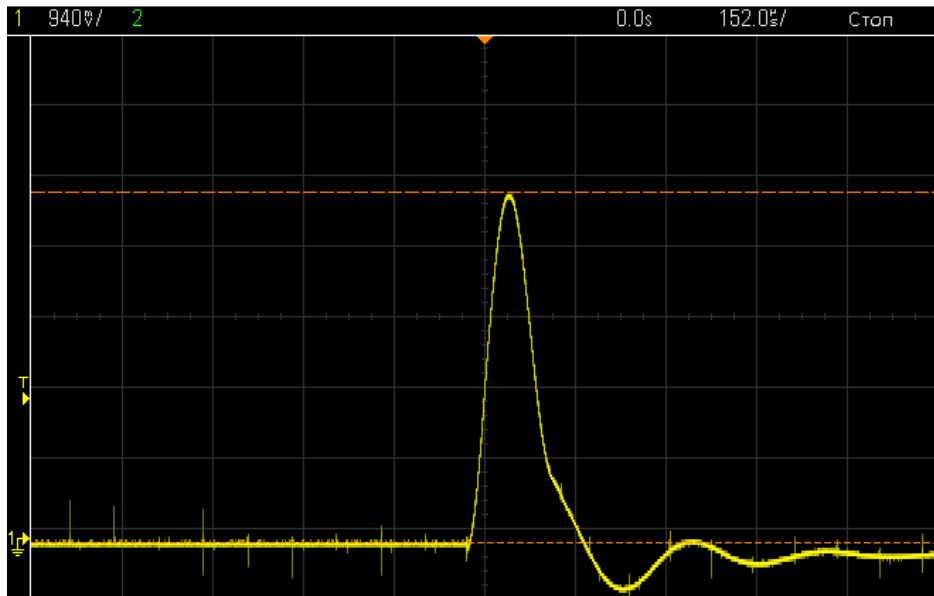


Рисунок 3.3.2 – Форма импульса испытательного напряжения на электроде

Схема измерительной установки приведена на рисунке 3.2.2. Измерения пробивного напряжения сквозного дефекта покрытия производились на образцах органического стекла толщиной 51, 106, 254, 476, 966, 1947 и 2799 мкм. Для каждого образца проводилась серия из 10-ти измерений. В качестве электропроводящего основания использовался лист фольгированного текстолита с толщиной медной фольги 35 мкм. Дефект представлял собой сквозное отверстие диаметром 1 мм в органическом стекле. Измерения проводились для двух систем электродов стальной стержень диаметром 600 мкм – плоскость и стальной шар диаметром 40 мм – плоскость. Результаты измерений для положительной полярности стержня и шара приведены на рисунке 3.3.3.

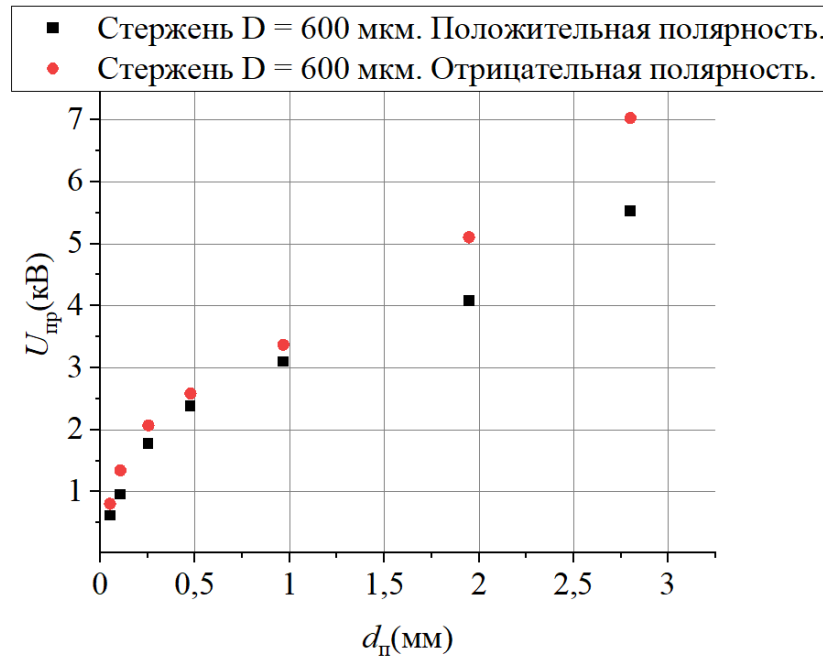


Рисунок 3.3.3 – Зависимости пробивного напряжения сквозного дефекта покрытия от толщины покрытия для системы электродов стержень – плоскость при положительной и отрицательной полярности стержня

Далее такая же серия измерений была проведена для отрицательной полярности шара и острия (рисунок 3.3.4.).

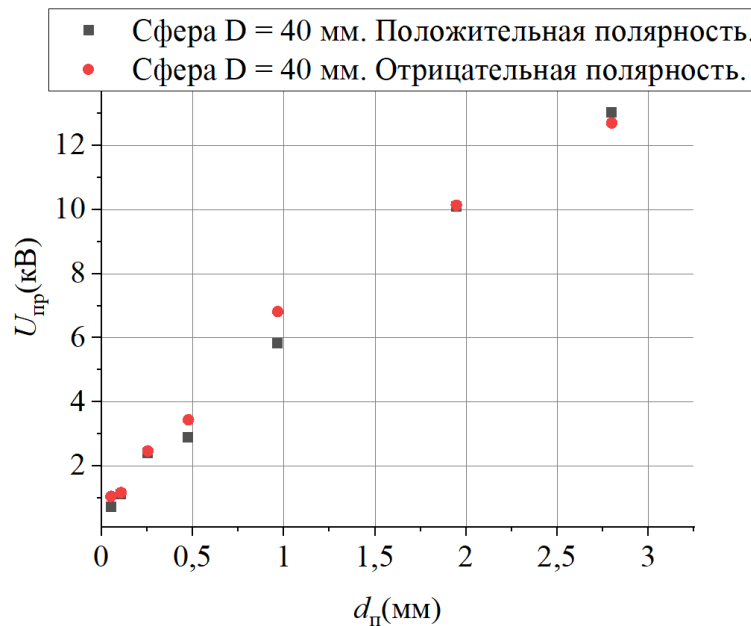


Рисунок 3.3.4 – Зависимости пробивного напряжения сквозного дефекта покрытия от толщины покрытия для системы электродов шар – плоскость при положительной и отрицательной полярности стержня



Из полученных зависимостей видно увеличение  $U_{пр}$  при смене полярности контролирующего электрода на отрицательную примерно в 2 раза. Также прослеживается зависимость  $U_{пр}$  от формы электрода на положительной полярности острия.

Таким образом, использование заостренных электродов положительной полярности позволит значительно снизить пробивное напряжение сквозных дефектов покрытий, повысив при этом диапазон покрытий доступных для испытаний электроискровым методом (например, покрытия на эпоксидной основе).

### **3.4. Экспериментальное определение пробивных напряжений несквозных дефектов структуры и утонений диэлектрических покрытий при электроискровом контроле**

Ранее в этой главе мы говорили о процессах, происходящих при выявлении сквозных дефектов покрытий, заполненных атмосферным воздухом. Однако в ряде случаев требуется выявлять несквозные дефекты покрытий (см. п.1.2.), для чего необходимо знать их значение  $E_{пр}$ . Как было указано в п.2.2. для определения  $E_{пр}$  многокомпонентных покрытий, для которых ряд параметров (например, энергия диссоциации связей, энергия ионизации атомов) не нормируется целесообразно определять  $E_{пр}$  экспериментально на образце покрытия и основания идентичным контролируемым.

Так, для покрытия ПФ-115 были определены значения  $U_{пр}$ , при этом, в качестве основания использовались листы фольгированного текстолита со слоем медной фольги толщиной 70 мкм, на которые было нанесено ЛКП – эмаль ПФ-115 (рисунки 3.4.1 – 3.4.2). На различные области подложки было нанесено один, два и три слоя эмали (ЛКП). Определение пробивного напряжения производилось на 11 участках каждого из одно-, двух- и трехслойных покрытий (рисунок 3.4.3).

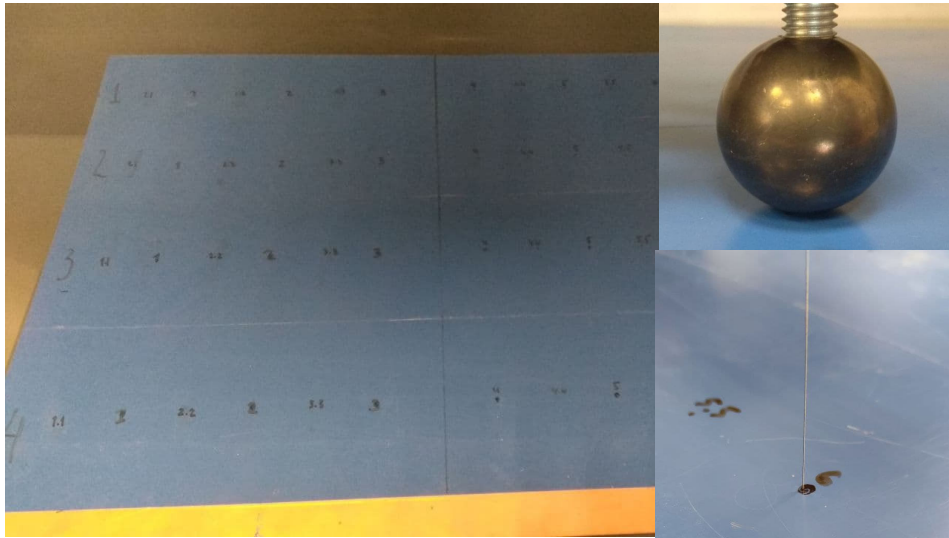


Рисунок 3.4.1 – Внешний вид образца контролируемого покрытия на электропроводящем основании и электродов: сферы диаметром 40 мм и штыря диаметром 0,6 мм

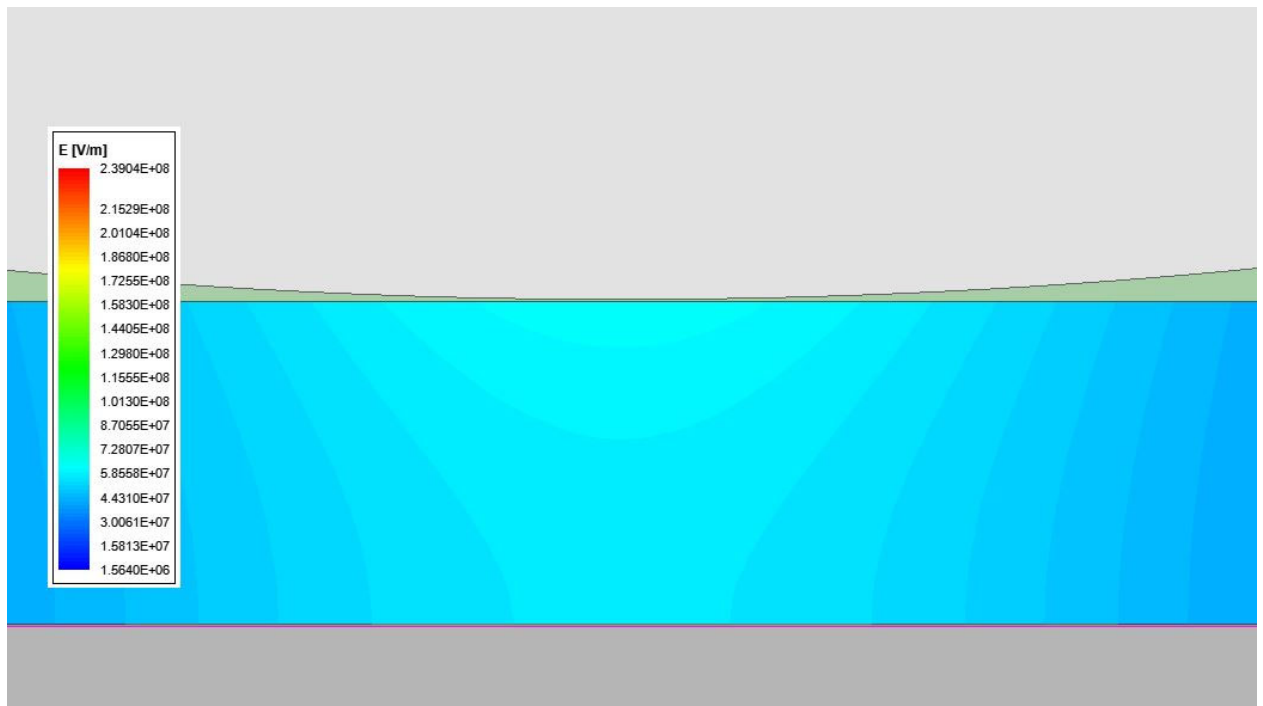


Рисунок 3.4.2 – Картина распределения напряженности электрического поля в области недопустимого утонения покрытия в системе электродов стержень диаметром 0,6 мм – плоскость

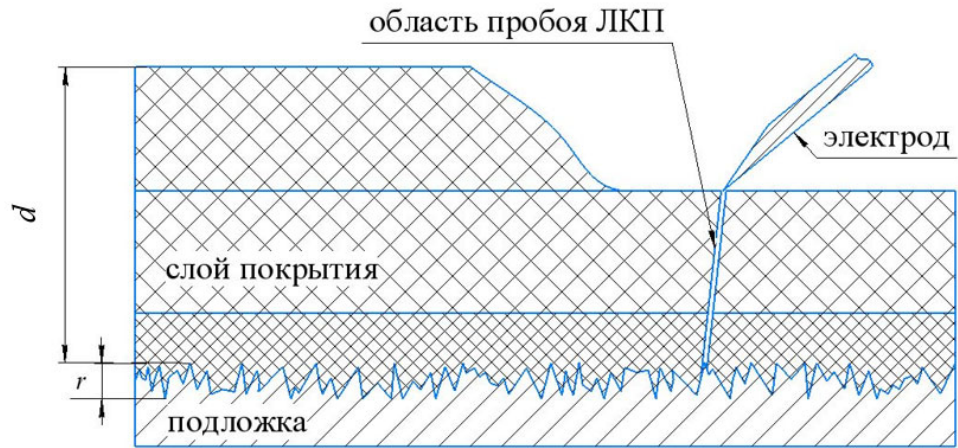


Рисунок 3.4.3 – Многослойные покрытия контрольного образца и схема процесса определения пробивного напряжения,  $r$  – шероховатость покрытия

Толщина покрытия  $d$  каждого из участков определялась как среднее арифметическое значение пяти измерений, осуществленных электромагнитным толщиномером. Зависимость  $U_{\text{пр}}$  от среднего значения  $d$  для исследованных областей покрытия приведена на рисунке 3.4.4, расчетная по (3.3) вольт-секундная характеристика  $E_{\text{пр}}(\tau)$  приведена на рисунке 3.4.5.

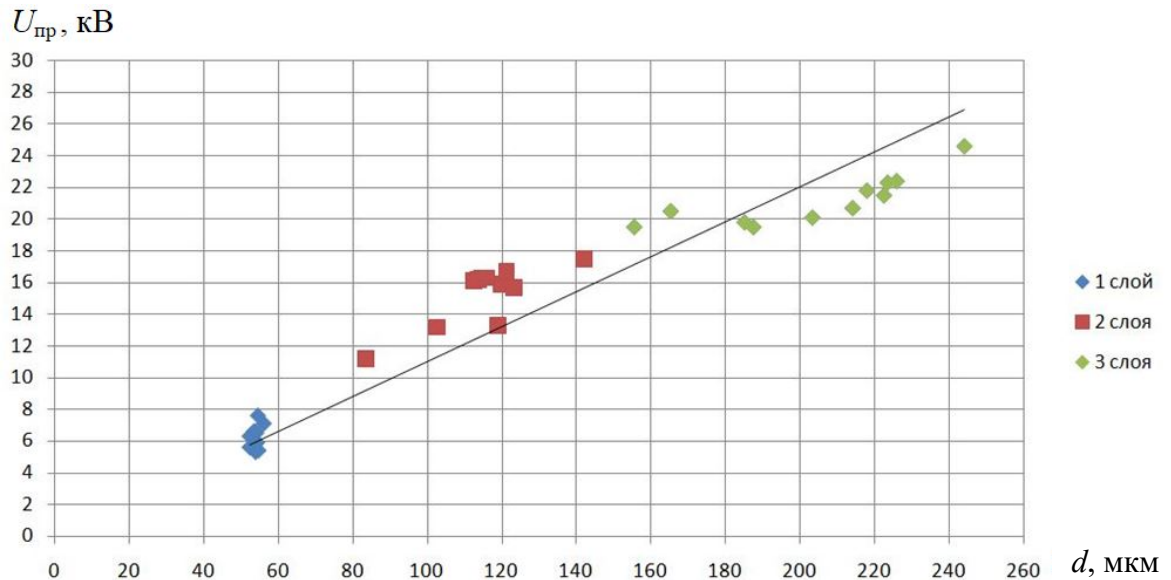


Рисунок 3.4.4 – Зависимость пробивного напряжения покрытия  $U_{\text{пр}}$  от толщины покрытия  $d$

Из рисунка 3.4.5 видно, что  $U_{\text{пн}}$  квазилинейно возрастает с увеличением  $d$  в соответствии с  $E_{\text{пр}}$  покрытия. Различия в значениях  $U_{\text{пн}}$  для близких толщин покрытий могут объясняться некоторым отличием толщины  $d_i$  в точке пробоа от среднего значения  $d$  контролируемого участка. Также результаты эксперимента подтверждают возможность выявления недопустимых утонений покрытий электроискровым методом.

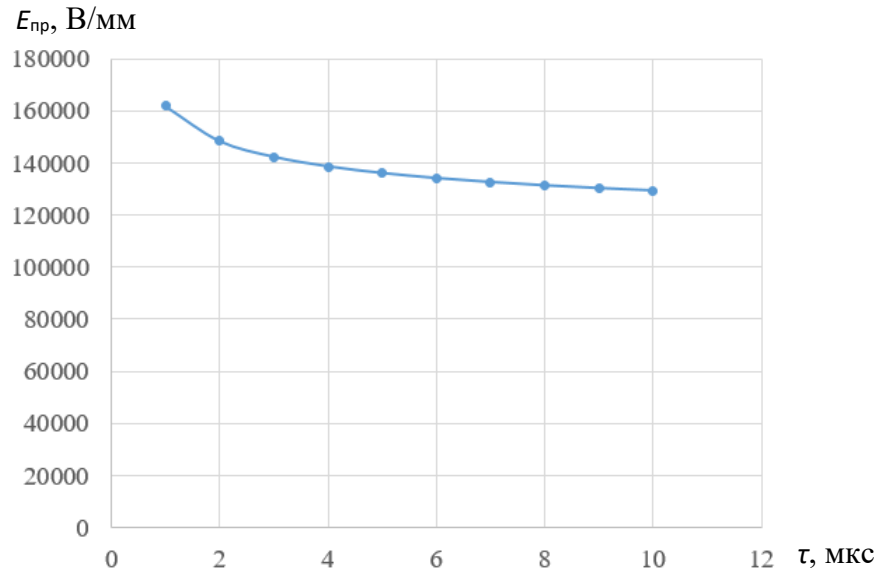


Рисунок 3.4.5 – Расчетная зависимость электрической прочности эмали ПФ-115 от времени приложения испытательного напряжения.

Таким образом, измерение  $U_{\text{пн}}$  недопустимых утонений покрытий экспериментально с использованием образца позволяет получить наиболее точные данные о  $U_{\text{пн}}$ , по сравнению с расчетными методами, которые могут быть использованы для выбора  $U_{\text{и}}$  в процессе проведения электроискрового НК.

### 3.5. Подавление влияния частичных разрядов на результаты электроискрового контроля

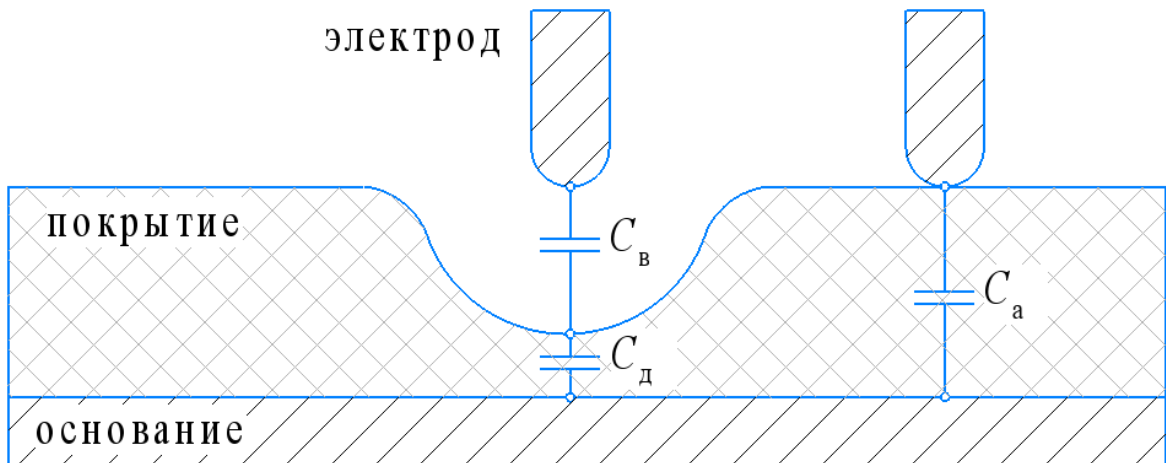
В процессе проведения электроискрового НК, помимо прочего стоит учитывать, положение электрода относительно поверхности покрытия. Электрод может как плотно прилегать к покрытию, так и отрываться от его поверхности при

манипуляциях пользователя, при наличии волнистости поверхности покрытия, обусловленной, в том числе возможными неоднородностями толщины покрытия. В каждом подобном случае, между электродом и покрытием в межэлектродном промежутке может возникать воздушный зазор.

При этом, если между электродом и основанием присутствует испытательное напряжение, то в процессе контроля в воздушном зазоре создается напряженность электрического поля выше напряженности поля в диэлектрическом покрытии, так как относительная диэлектрическая проницаемость покрытия больше, чем диэлектрическая проницаемость воздуха. С другой стороны, электрическая прочность газов во включении ниже, чем прочность остальной части изоляции. Все это создает благоприятные условия для формирования частичных разрядов – разрядов, перекрывающих только малую часть межэлектродного промежутка (воздушного зазора).

В соответствии с ГОСТ 56542-2019, первичным информативным параметром наличия искрового разряда, при использовании электроискрового метода НК, является импульс разрядного тока, который должен регистрироваться прибором. В то же время, наличие частичного разряда не свидетельствует о наличии дефекта в контролируемой области покрытия, однако также создает импульс тока, который, при определенных условиях, ошибочно может быть принят за ток искрового разряда всего промежутка, возникающий в дефектных участках покрытия. То есть можно утверждать, что для процесса электроискрового контроля частичные разряды являются мешающим параметром, не учитываемым до настоящего времени. При проведении испытаний покрытий от его влияния необходимо отстраиваться.

Учитывая, что токами утечки при формировании частичных разрядов можно пренебречь (рисунок 1.2.6, 1.2.7), то в области недопустимого утонения система «электрод - воздушный промежуток - покрытие остаточной толщины» может быть представлена в виде схемы замещения, представленной на рисунке 3.5.1:



$C_b$  – емкость элемента диэлектрика, участвующего в ЧР (емкость воздушного зазора);  $C_d$  – емкость элемента диэлектрика, включенного последовательно емкостью зазора;  $C_a$  – емкость остальной части диэлектрика, лишенной зазора.

Рисунок 3.5.1 – эквивалентная схема для рассмотрения процессов возникновения частичных разрядов в покрытии

При рассмотрении частичного разряда эквивалентная схема диэлектрика емкостью  $C_x$  может быть представлена:

$$C_x = C_a + \frac{C_b \cdot C_d}{C_b + C_d} \quad (3.5)$$

Частичный разряд возникнет тогда, когда напряжение в зазоре достигнет пробивного значения  $U_{в.з}$  — напряжения зажигания частичного разряда в зазоре (напряжения формирования частичного разряда). При частичном разряде после разряда емкости  $C_b$  в большинстве случаев не возникает ток большой плотности, необходимый для поддержания устойчивого разряда, и он гаснет.

Длительность частичного разряда в большинстве случаев весьма мала — порядка  $(3 \div 10) \cdot 10^{-9}$  с [92]. При пробое зазора напряжение на этом участке цепи падает не до нуля, а до определенного значения  $U_{в.п}$ , при котором разряд гаснет. Напряжение погасания  $U_{в.п}$  может быть в пределах:

$$U_{в.п} = (0,1 \dots 0,9) \cdot U_{в.з} \quad (3.6)$$

Каждый единичный частичный разряд сопровождается прохождением через зазор определенного заряда  $q$  и приводит к изменению напряжения в межэлектродном пространстве на величину  $\Delta U_x$ .

Практически заряд  $q$  не может быть измерен непосредственно. В момент возникновения частичного разряда можно считать, что заряд на электродах не изменяется, так как емкость системы «электроды - воздушный промежуток - покрытие» отделена от емкости остальной цепи индуктивностью соединительных проводов. Поэтому изменение напряжения  $\Delta U_x$  происходит из-за увеличения емкости рассматриваемой системы при возникновении частичного разряда (шунтирование емкости  $C_b$ ).

$$C_x \cdot U_x = (C_x + \Delta C_x) \cdot (U_x - \Delta U_x) \quad (3.7)$$

Однако для удобства дальнейших рассуждений можно представить, что изменение напряжения рассматриваемой системы происходит вследствие фиктивного изменения заряда  $q_{ч.р}$  на электродах системы с емкостью  $C_x$ , причем  $\Delta U_x = q_{ч.р} / C_x$  [93]. При этом можно утверждать, что величина  $q_{ч.р}$  является кажущимся зарядом ЧР - зарядом, который, будучи мгновенно введенным между выводами испытуемого объекта, вызовет такое же мгновенное изменение напряжения между его выводами, как и реальный частичный разряд. При частичном разряде искровой разряд закорачивает емкость  $C_b$ , т. е. на величину  $\Delta C_x$  изменяется общая емкость объекта. При принятом допущении заряд рассматриваемой системы до и непосредственно после разряда не изменится:

$$\Delta C_x \cdot U_x \approx C_x \cdot \Delta U = q_{ч.р} , \quad (3.8)$$

$$\text{то есть } I_{ч.р} = \frac{q_{ч.р}}{t} \quad (3.9)$$

где  $t$  – длительность частичного разряда.

Таким образом, для нахождения заряда, проходящего через шунтируемую емкость, необходимо знать, на сколько изменится общая ёмкость межэлектродного промежутка  $\Delta C_x$ . Проведем моделирование с использованием метода конечных элементов. Для моделирования была выбрана величина воздушного зазора 50 –

1000 мкм и остаточные толщины покрытия 180 и 1000 мкм. Диаметр острия электрода 600 мкм (рисунок 3.5.2).

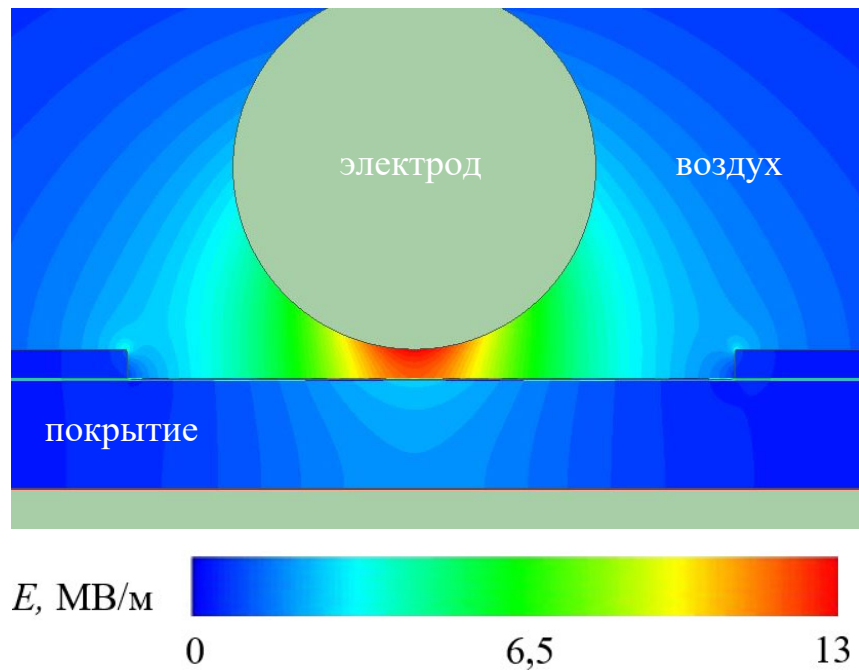


Рисунок 3.5.2 – Конечно-элементная модель распределения напряженности электрического поля с воздушным зазором 50 мкм и остаточной толщиной покрытия 180 мкм.

Так же необходимо знать прикладываемое к межэлектродному промежутку напряжение. Напряжение формирования частичного разряда  $U_{в.з}$  определялось экспериментально (рисунки 3.5.3 и 3.5.4) по первой серии импульсов напряжения на шунте  $R_{ш}$ . На рисунке 3.5.3 изображен фронт импульса испытательного напряжения (измерительный канал СН1 - синим) и импульсы напряжения на шунте  $R_{изм}$ , включенном последовательно в цепь измерения (измерительный канал СН2 - красным).



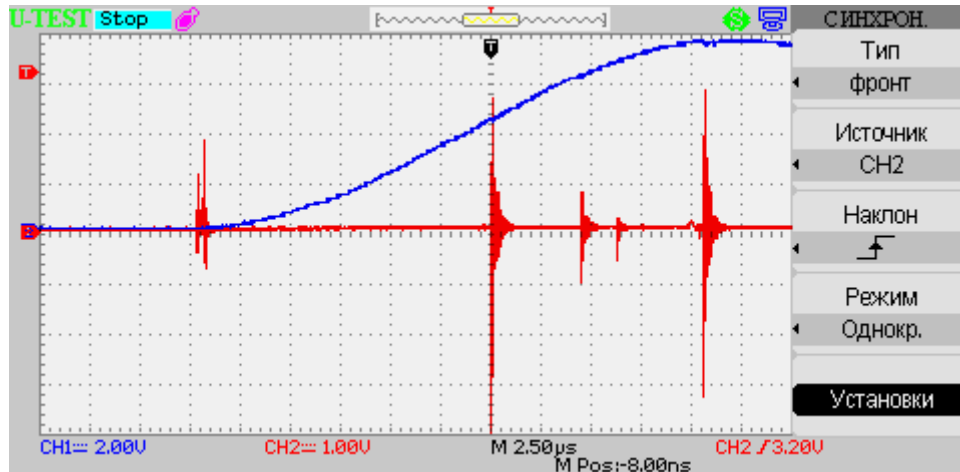
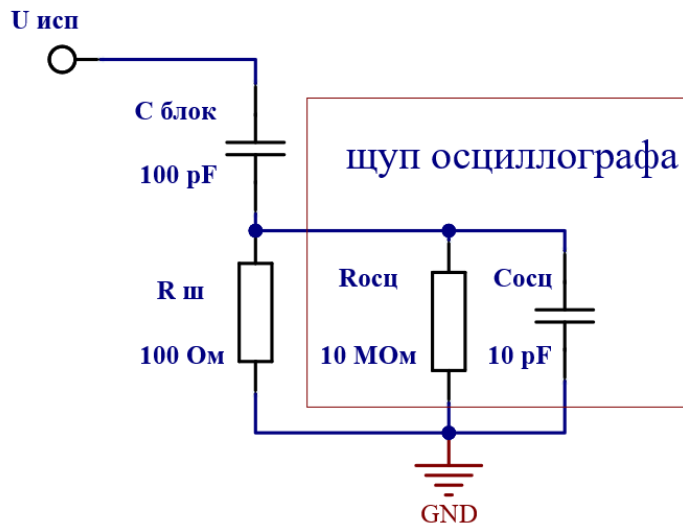


Рисунок 3.5.3 – Осциллограмма импульса испытательного напряжения и импульсы частичных разрядов.



$U_{исп}$  – испытательное напряжение,  $C_{блок}$  – емкость блокировочного конденсатора,  $R_{осц}$  – сопротивление щупа осциллографа,  $C_{осц}$  – емкость щупа осциллографа,  $R_{ш}$  – сопротивление измерительного шунта.

Рисунок 3.5.4 – схема измерения токовых импульсов на шунте  $R_{изм}$ .

Таким образом были получены значения расчетных параметров -  $U_x$  и  $t$  для определения по (3.8) и (3.9) тока частичных разрядов  $I_{ч,р}$ , для построения зависимости  $I_{ч,р}(d_{п})$  для двух значений остаточных толщин  $d_{п}$  покрытия (рисунок 3.5.5).

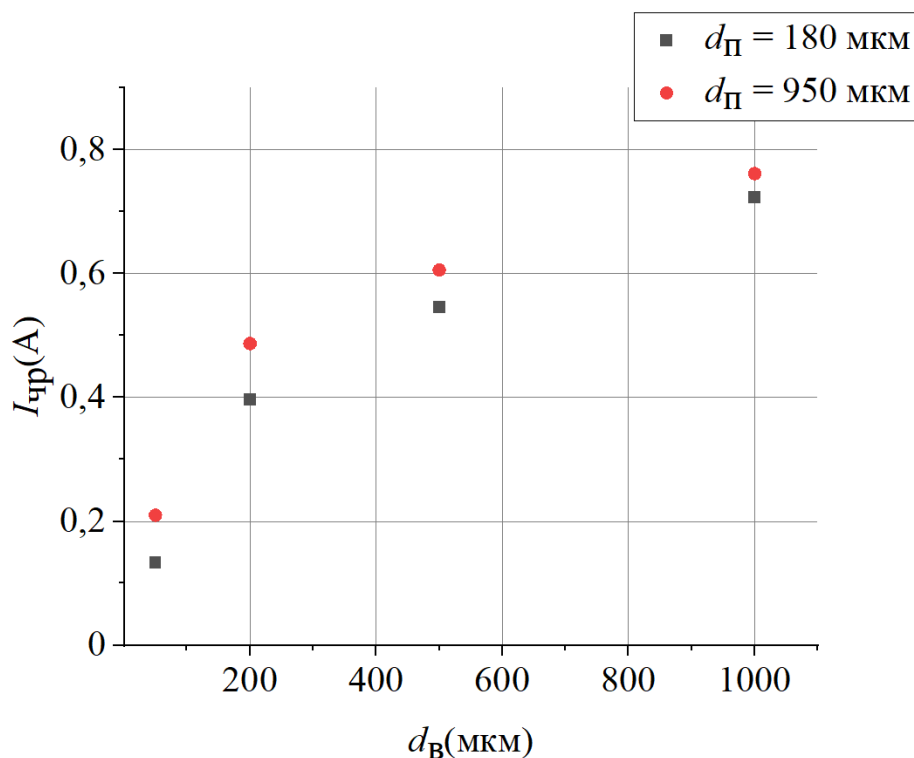


Рисунок 3.5.5 – Зависимость расчетного тока частичных разрядов от величины воздушного зазора  $d_B$ .

Из рисунка 3.5.5 следует, что величина зазора оказывает значительно большее влияние на величину  $I_{ч,р}$  чем остаточная толщина покрытия. Ток частичного разряда возрастает с увеличением зазора вследствие увеличения приращения емкости при шунтировании ёмкости зазора, а также за счет увеличения прикладываемого напряжения.

Сравним полученные значения токов частичного разряда  $I_{ч,р}$  с токами, возникающими при полном искровом разряде межэлектродного промежутка. Для этого проведем измерение импульса тока, возникающего при разряде (рисунок 3.5.6). При полном разряде вклад в импульс тока оказывает не только заряд, сформированный на шунтируемой емкости, но и ток, формируемый источником высокого напряжения, о чем говорит форма импульса высокого напряжения при возникновении разряда.

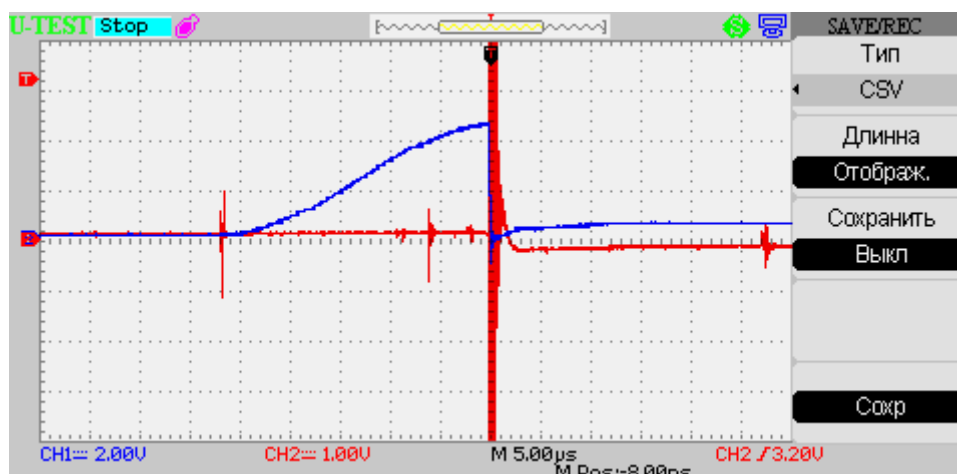


Рисунок 3.5.6 – Осциллограммы импульсов испытательного напряжения и импульсов частичных разрядов при искровом разряде в межэлектродном промежутке (величина межэлектродного промежутка  $d_{\text{п}} = 950$  мкм).

Для измерения амплитуды импульса тока на шунте  $R_{\text{ш}}$  (рисунок 3.5.4) так же были сняты осциллограммы напряжений для  $d_{\text{п}} = 50, 200, 500$  и  $100$  мкм при различных испытательных напряжениях (рисунок 3.5.7). После чего значения падений напряжения на шунте пересчитывались в величину тока разряда.

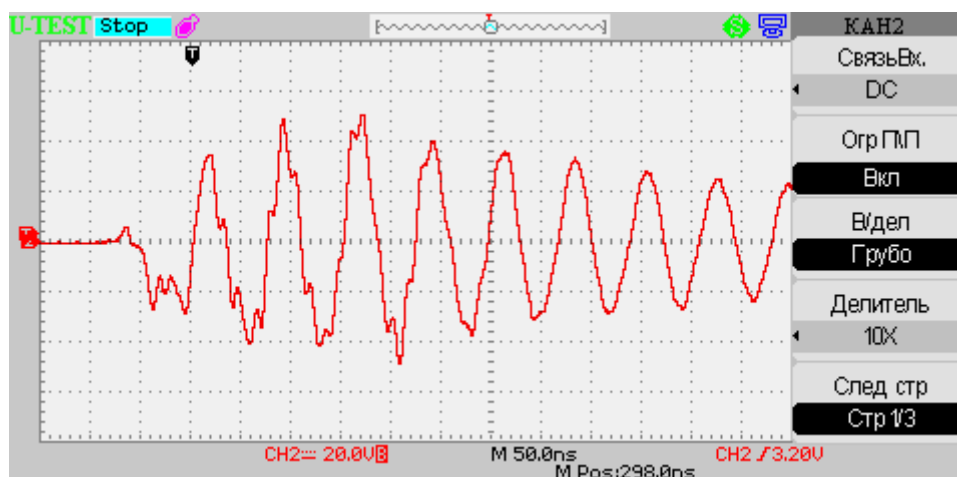


Рисунок 3.5.7 – Осциллограмма импульсов напряжения на шунте 100 Ом при искровом разряде межэлектродного промежутка. Величина межэлектродного промежутка  $d_{\text{п}} = 950$  мкм

В результате рисунок 3.5.5 был дополнен зависимостью тока искрового разряда от величины  $d_B$  (рисунок 3.5.8).

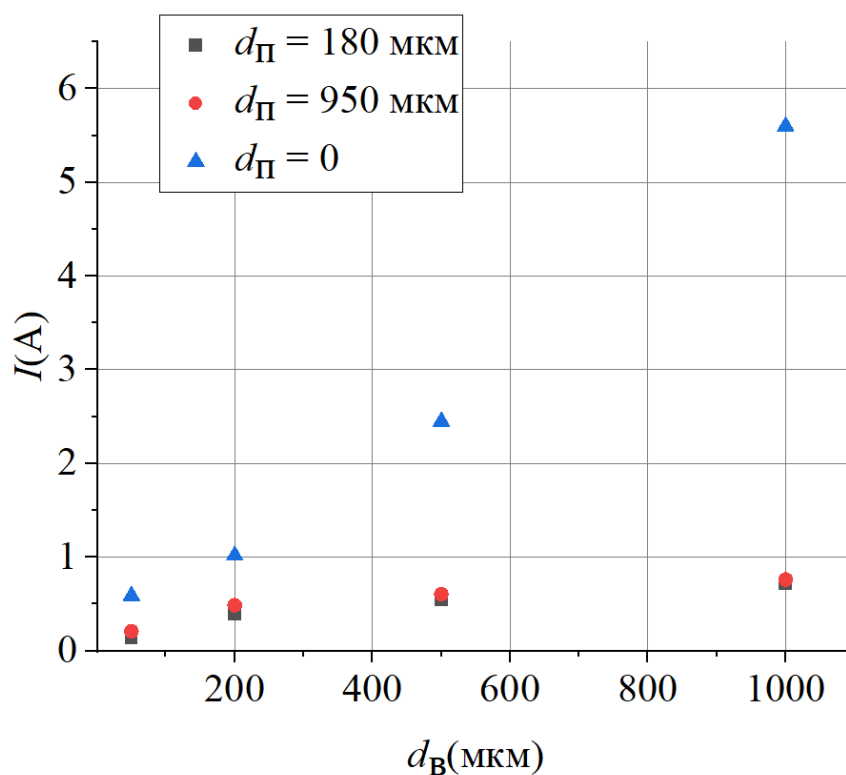


Рисунок 3.5.8 – Зависимость тока разряда и расчетных значений тока частичных разрядов от величины воздушного зазора  $d_B$ .

Из рисунка 3.5.8 видно, что в большей части диапазона  $d_B$  (в том числе, при экстраполяции зависимости на более толстые покрытия) амплитуда импульса тока разряда значительно превышает амплитуду импульсов тока частичных разрядов для всех межэлектродных промежутков. Однако, в области малых толщин покрытий ( $d_{\Pi} = 50$  мкм), амплитуда импульса полного разряда меньше амплитуды токов частичных разрядов для больших толщин покрытия (начиная с  $d_{\Pi} = 1000$  мкм). Также следует учитывать, что импульсы полных и частичных разрядов имеют близкие спектральные характеристики. Отсюда следует, что для приборных реализаций электроискрового метода НК необходимо настраивать чувствительность приборов по амплитуде токовых импульсов для разных диапазонов толщин контролируемых покрытий (в том числе, с использованием

испытательных образцов покрытий с искусственными дефектами). При повышении толщины контролируемых покрытий необходимо повышать и порог срабатывания сигнализации.

Настройка подходящего уровня чувствительности может осуществляться на испытательных или стандартных образцах, идентичных или близких по характеристикам контролируемому объекту.

### **3.6. Выводы к главе 3**

1. Исследовано влияние неоднородности распределения электрического поля, формируемого системой электродов в зоне контроля, на пробивное напряжение воздушных промежутков сквозных дефектов покрытий и установлена возможность расширения диапазона контролируемых толщин покрытий до значения 50 мкм ... 25 мм.

2. Установлено влияние полярности импульсного испытательного напряжения на величину пробивного напряжения воздушных промежутков сквозных дефектов покрытий и сформулированы рекомендации по режимам формирования испытательного напряжения в зависимости от толщины диэлектрического покрытия

3. Установлены зависимости влияния формы рабочей части электродов на неоднородность электрического поля в зоне контроля и параметры искрового разряда, расширяющие возможности применения электроискрового метода НК.

4. Теоретически и экспериментально подтверждена возможность выявления недопустимых утонений диэлектрических покрытий электроискровым методом НК в диапазоне толщин 50 мкм ... 2 мм.

5. Обоснована возможность проведения контроля покрытий при возникновении частичных разрядов с учетом установленных зависимостей, а также установлены аппаратные и методические принципы подавления влияния частичных разрядов на результаты контроля.

## ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ, АЛГОРИТМОВ РАБОТЫ И МЕТОДИК ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ДЕФЕКТОСКОПОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ УВЕЛИЧЕНИЕ ИНФОРМАТИВНОСТИ И ДОСТОВЕРНОСТИ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО КОНТРОЛЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

### 4.1. Разработка схемы формирования импульса испытательного напряжения положительной полярности малой длительности

На основании теоретических и экспериментальных данных, полученных в главе 3, была разработана модифицированная схема формирования импульсного испытательного напряжения на электроде для электроискровых дефектоскопов (рисунок 4.1.1) – приборов реализующих электроискровой метод НК.

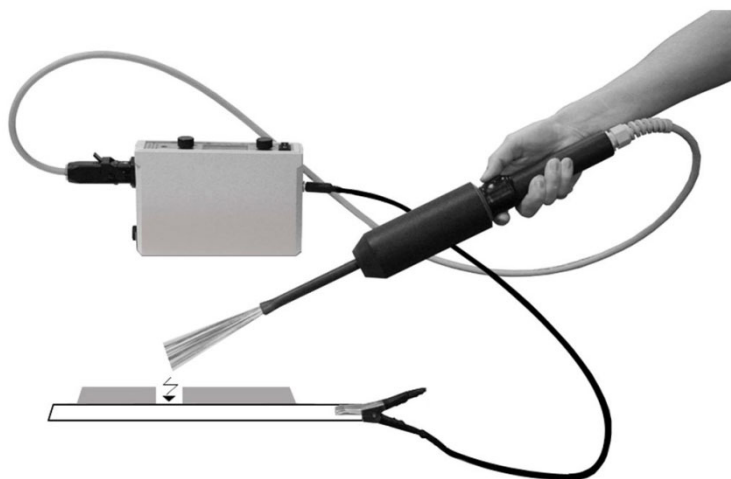


Рисунок 4.1.1 – Внешний вид электроискрового дефектоскопа

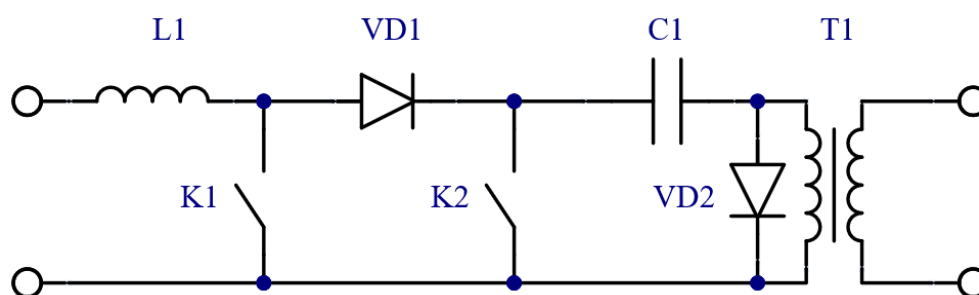
Электроискровые дефектоскопы предназначены для выявления трещин, пористости, недопустимых утонений и других нарушений сплошности внутренних и внешних диэлектрических защитных покрытий (лакокрасочных, эпоксидных, битумных и т.д.) металлических изделий и бетонных конструкций приложением высокого напряжения и фиксацией электрического пробоя в местах нарушения сплошности или недопустимых утонений. Основные технические характеристики приборов приведены в таблице 4.1.1.

Таблица 4.1.1. Основные типовые технические характеристики современных моделей электроискровых дефектоскопов

Параметр	Значение
Толщина контролируемых покрытий	0,5 – 25 мм
Диапазон регулировки напряжения на электроде	0,7 – 40 кВ
Дискретность установки выходного напряжения	0,01 – 0,1 кВ
Точность поддержания контрольного напряжения	1 – 5 %
Форма напряжения, прикладываемого к покрытию	постоянное, импульсное

В главе 3 было показано преимущество использования сильнонеоднородного электрического поля в межэлектродном промежутке, связанное, в том числе, с параметрами импульса испытательного напряжения, для формирования которого была разработана схема, формирующая короткие импульсы высокого напряжения ( $\tau_{\text{имп}} \leq 30$  мкс) на контролирующем электроде.

Схема основана на подаче короткого токового импульса на повышающий трансформатор Т1 (рисунок 4.1.2). Формирование импульса осуществляется за счет разряда батареи накопительных конденсаторов С1 при замыкании ключа К2. Создание импульсов напряжения на индуктивности L1, за счет открытия-закрытия ключа К1, обеспечивает заряд конденсаторов С1 в промежутке между импульсами, формируемых ключом К2.



$L1$  – индуктивность,  $K1, K2$  – ключи,  $VD1, VD2$  – блокирующие диоды,  $C1$  – батарея накопительных конденсаторов,  $T1$  – высоковольтный повышающий трансформатор.

Рисунок 4.1.2 – Структурная схема формирователя высокого напряжения на электроде электроискровых дефектоскопов

Также, в главе 3 показано преимущество формирования импульса положительной полярности, потому, для уменьшения влияния колебательных процессов на первичной обмотке  $T1$ , устанавливается блокирующий диод  $VD2$  (рисунок 4.1.3.). Вместе с тем, полярность формируемого напряжения была изменена на положительную путем соответствующего подключения трансформатора.

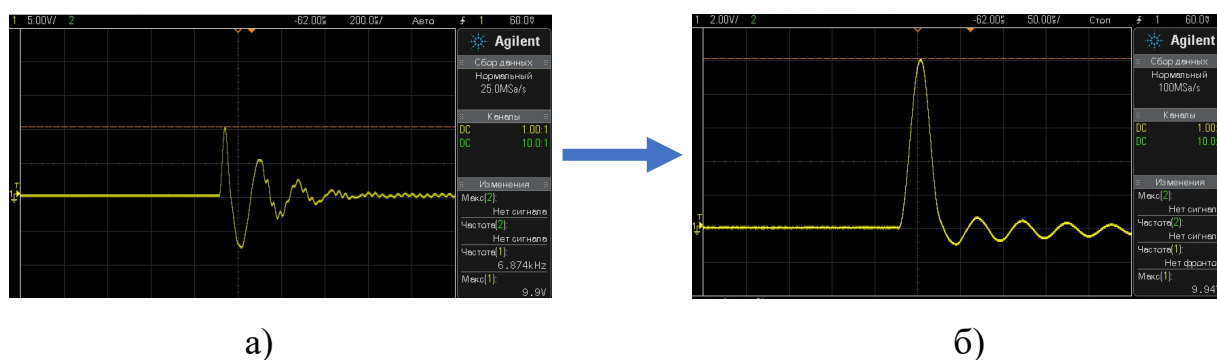


Рисунок 4.1.3 – Осциллограммы импульсов испытательного напряжения на электроде. Напряжение на электроде 10 кВ, временная развертка – 50 мкс/деление. Напряжение: а) 5 кВ/дел. б) 2 кВ/дел. а) форма импульса при отсутствии блокирующего диода  $VD2$ , б) форма импульса выходного напряжения на  $VD2$

В результате был получен униполярный импульс высокого напряжения на электроде дефектоскопа, снижающий пробивное напряжение сквозных дефектов покрытий за счет положительной полярности и уменьшающий эффект электрического старения изоляции за счет малого времени взаимодействия с покрытием и расширяя тем самым область применения метода и повышая его эффективность.



## 4.2. Разработка конструкции электродов для создания сильнонеоднородного электрического поля

В соответствии с изложенным в главе 3, для создания сильнонеоднородного поля в сквозных дефектах покрытия малого диаметра 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 3.4.3.).

Необходимость снижения  $U_{пв}$  в области дефекта покрытия обусловлена также возможностью прохождения контролирующего электрода на некотором удалении от дефекта, повышая тем самым пробивное напряжение (рисунок 4.2.1)

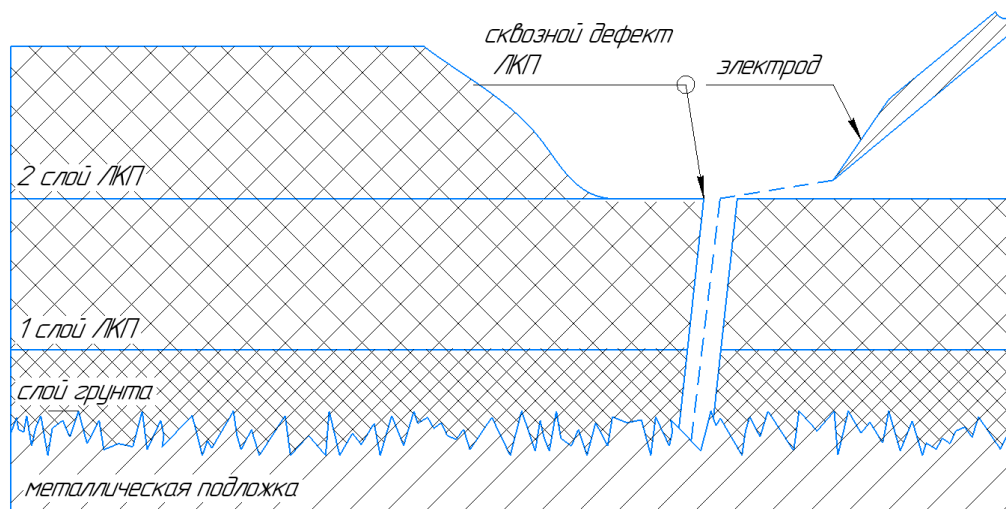


Рисунок 4.2.1 – Схематичное изображение прохождения электрода на некотором расстоянии от сквозного дефекта покрытия

Таким образом, при контроле тонких покрытий ( $d_{п} < 500$  мкм) необходимо выбирать электроды, диаметр острия которых сравним или меньше диаметра выявляемых дефектов. В указанный диапазон толщин попадают в основном ЛКП, диаметр сквозных пор в которых не нормируется. Поэтому диаметр острия

контролирующего электрода следует делать как можно меньше, чтобы понизить напряжение пробоя сквозного дефекта как можно меньшего диаметра. Ограничения же на минимальный диаметр острия имеют исключительно технологический характер.

Так, с учетом вышесказанного, была оптимизирована контролирующая часть плоского резинового электрода путем заточки его острия под  $45^\circ$ . При этом диаметр острия, модернизированного электрода примерно равен 50 мкм (рисунок 4.2.2).

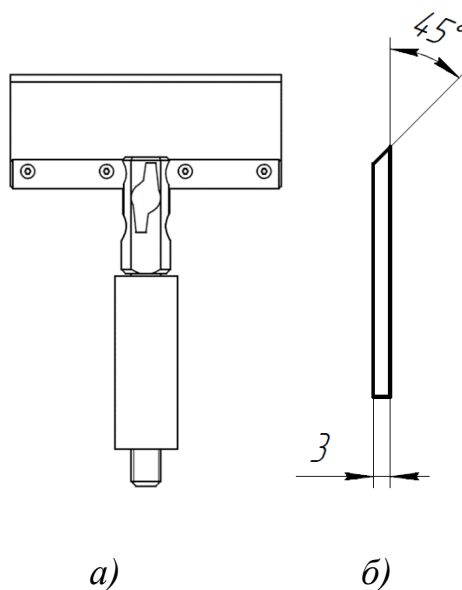


Рисунок 4.2.2 – Схематичное изображение конструкции плоского резинового электрода. *а* – вид спереди, *б* – полоса резиновая. Вид сбоку

Такое технологическое решение обусловлено необходимостью повысить неоднородность электрического поля в межэлектродном промежутке, понизив тем самым  $U_{пр}$  дефектных участков покрытия. Картина распределения напряженности электрического поля (рисунок 4.2.2) для электрода, заточенного под  $45^\circ$ , показывает увеличение пиковой напряженности у острия электрода примерно на 30%, что способствует уменьшению испытательного напряжения в области дефекта покрытия (п.3.4.).

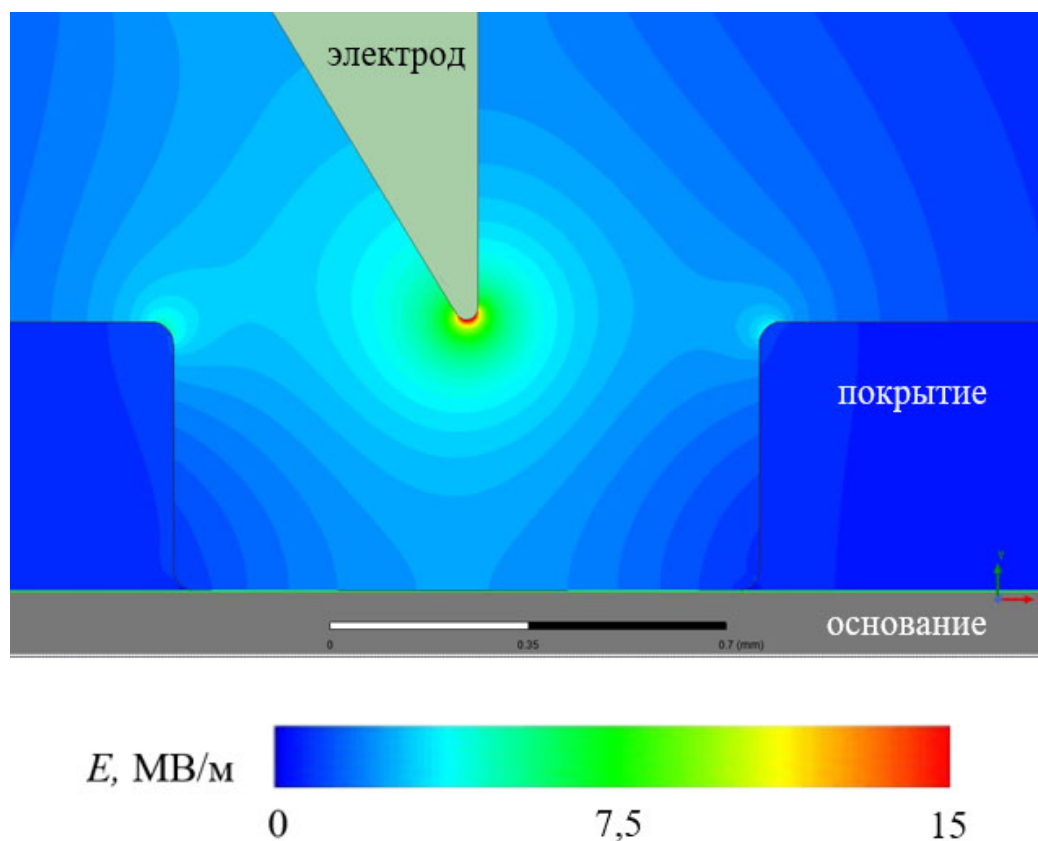


Рисунок 4.2.3 – Картина распределения напряженности электрического поля в сквозном дефекте покрытия в системе электродов плоский резиновый электрод (заточенный) – плоскость

Рисунок 4.2.3 показывает четкий градиент напряженности сильнонеоднородного электрического поля ( $K > 3$ ) в межэлектродном промежутке. Таким образом, прикладывая к покрытию заостренный электрод мы формируем сильнонеоднородное электрическое поле в межэлектродном промежутке, снижая тем самым пробивное напряжение сквозных дефектов, что актуально для тонких диэлектрических покрытий, в частности для широкой номенклатуры ЛКП.

Также при выявлении сквозных дефектов в тонких покрытиях (например, ЛКП) электроискровым методом, стала актуальной задача формирования сильнонеоднородного электрического поля внутри трубопроводов для *неразрушающего* контроля эпоксидных внутритрубных покрытий толщиной до 300 мкм. Соответственно, для формирования сильнонеоднородного электрического поля в области дефектов внутритрубных покрытий необходимо

было обеспечить перпендикулярность контролируемого электрода относительно контролируемого покрытия. Для этого, в рамках проводимой работы, с учетом результатов проведенного исследования был разработан внутритрубный электрод для контроля внутренних покрытий отводных соединений сложной формы. Контролирующие лепестки, выполненные из электропроводящей резины, имеют ту же конфигурацию, что и контактный элемент плоского резинового электрода (п. 4.2.), отличаются только конструктивные особенности, необходимые для закрепления лепестка на диске. Особенностью электрода является удержание ориентации электродной части под прямым углом к внутреннему покрытию трубы, минимизируя таким образом потери мощности, связанные с увеличением емкостной нагрузки.

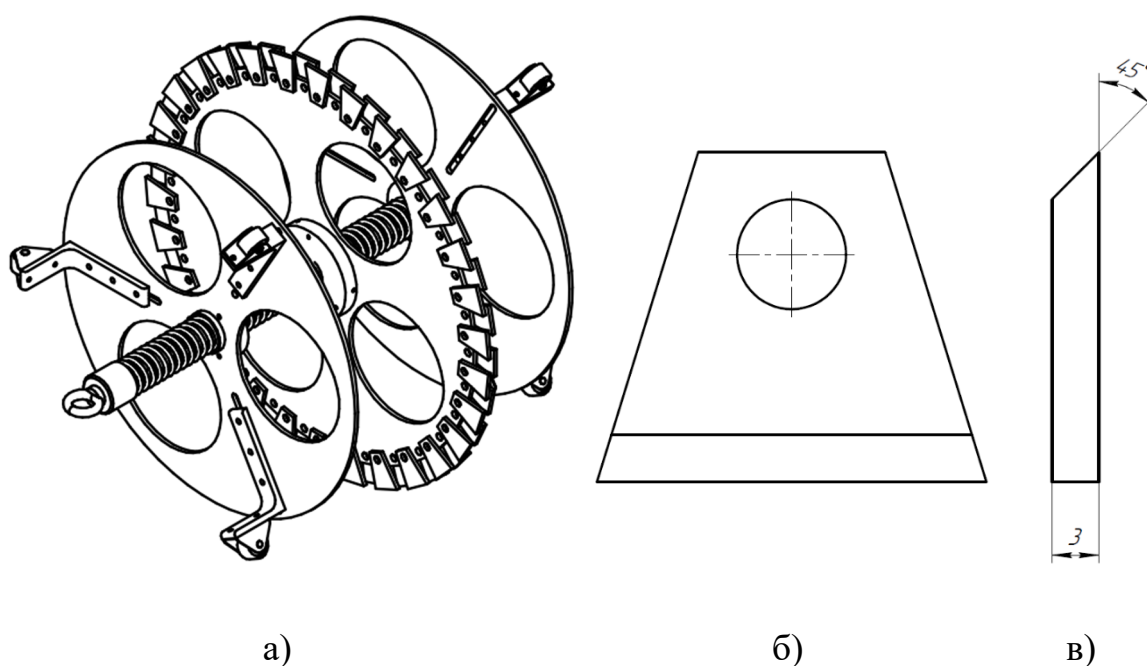


Рисунок 4.2.4 – Схематичное изображение конструкции гибкого внутритрубного электрода. а) аксонометрическая проекция, б) чертеж лепестка электрода. Вид спереди, в) чертеж лепестка электрода. Вид сбоку

Электрод имеет существенное отличие, которое заключается в его самоцентрировании в трубе по траектории его движения за счет стержня, выполненного в виде пружины, заполненной карданными шарнирами.

### **4.3. Методики оценки вероятности обнаружения сквозных и несквозных дефектов диэлектрических покрытий электроискровым методом НК**

В главе 3 показана возможность выявления недопустимых утонений покрытия электроискровым методом и указано, что простейшим методом определения электрической прочности покрытия является экспериментальное определение электрической прочности на основании образца контролируемого покрытия. Однако 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 вероятностью при выбранном испытательном напряжении [81, 82].

Для того чтобы построить кривую вероятности обнаружения дефекта типа «недопустимое утонение» в зависимости от испытательного напряжения для конкретной методики контроля, необходимо повторить все этапы, описанные в этой методике на образцах с искусственными дефектами (т.е. с искусственно созданными недопустимыми утонениями). При контроле итоговая информация может быть представлена либо в виде численного отклика, либо в виде бинарного отклика (анализируется информация об обнаружении или пропуске дефекта). При этом для каждого вида предоставления информации требуется свой математический алгоритм обработки полученных данных [83].

Так, для экспериментального определения пробивного напряжения бездефектного покрытия и недопустимых утонений, а также оценки доверительной вероятности определения остаточной толщины недопустимого утонения был выбран и изготовлен образец ЛКП эмаль MLS 306, нанесенного на медное и алюминиевое основания (рисунок 4.3.1.). Эмаль наносилась в 3, 6 и 9 слоев имитируя тем самым дефекты типа недопустимое утонение.



Рисунок 4.3.1 – Объекты контроля: 1 – лист алюминия, 2 – лист фольгированного текстолита

После изготовления образцов (нанесения трех, шести и девяти слоев покрытия на поверхность основания) была замерена толщина в контрольных точках, в которых определялось пробивное напряжение. Под точками в данном случае понимается область, очерченная окружностью диаметром 5 мм. Это сделано для того, чтобы учесть возможный путь прохождения искрового разряда, по пути наименьшей  $E_{пр}$  покрытия в данной области. Далее, для расчета погрешности результата измерения [84]:

Рассчитывается среднее арифметическое  $d_i$ :

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n},$$

где  $n$  – количество измерений.

Далее, для исключения промахов, определяется значения измерений более чем в 2 раза превышающие среднеарифметическое отклонение от среднего значения:

$$\Delta d_i = \bar{d} - d_i$$

$$\Delta \bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta d_i|}{n}$$

$$|\Delta d_k| \geq 2 \cdot \Delta \bar{d}$$

После этого рассчитывается СКО:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta d_i^2}{(n-1)}}$$

При заданной доверительной вероятности  $\alpha = 0,95$  коэффициент Стьюдента равен  $t_\alpha = 2,3$ . Тогда полная погрешность будет равна:

$$\Delta d_{cl} = t_\alpha \cdot S$$

$$\Delta d = \sqrt{\Delta d_{cl}^2 + \Delta d_u^2}$$

Таблица 4.3.1. Результаты расчета полной погрешности результатов измерений толщины покрытия в контролируемых точках для металлического основания

Полная погрешность в % от истинного значения. Алюминиевое основание.						
слои	1 точка	2 точка	3 точка	4 точка	5 точка	6 точка
3 слоя	14,5	26,5	18,1	14,8	14,7	18
6 слоев	14,4	8,3	14	19,9	11,3	12,2
9 слоев	15,9	19,1	23,3	17,1	25,4	14,1

Таблица 4.3.2. Результаты расчета полной погрешности результатов измерений толщины покрытия в контролируемых точках для алюминиевого основания

Полная погрешность в % от истинного значения. Медное основание.												
слои	1 т.	2 т.	3 т.	4 т.	5 т.	6 т.	7 т.	8 т.	9 т.	10 т.	11 т.	12 т.
3 сл.	8,6	17,2	15,9	8,4	8,4	6,1	12,3	4,9	9,7	6,5	3	4,5
6 сл.	16,7	24,4	17,8	19,5	24,4	15,7	16,9	18,4	12,5	14	23,9	9,6
9 сл.	6,9	20,5	11,6	14,1	13,7	14,3	19,2	13,5	12,9	17,7	13,6	13,3

Как мы видим из таблиц 4.3.1 и 4.3.2, нанесенное ЛКП имеет большую степень неоднородности по толщине покрытия, достигающую до 25 % от среднего значения толщины, что в значительной степени влияет на результат измерения  $U_{\text{пр}}$ .

В процессе эксперимента, при заземленных объектах контроля для данных точек замерялось  $U_{\text{пр}}$ , сформированное электроискровым дефектоскопом «Корона 1» с использованием электрода типа стержень диаметром 4 мм.  $U_{\text{и}}$  увеличивалось до пробоя покрытия. Фиксировалось значение  $U_{\text{пр}}$  с использованием осциллографа DSO-X 2002A. В результате была получена зависимость  $U_{\text{пр}}(d_{\text{п}})$ , представленная на рисунок 4.4.2.

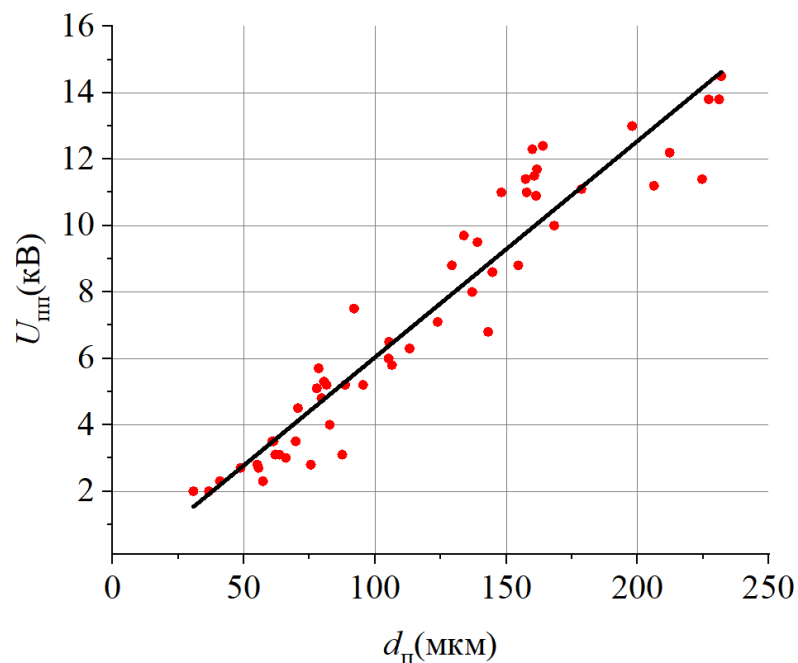


Рисунок 4.3.2 – Зависимость пробивного напряжения покрытий  $U_{\text{пр}}$  от толщины покрытия  $d_{\text{п}}$

Как видно, полученные данные имеют явный 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».



#### 4.4. Оценка вероятности выявления дефектов с заданными параметрами

Для оценки вероятности выявления недопустимых утонений был использован алгоритм с численным откликом, основанный на регрессионной модели зависимости  $U_{\text{пн}}(d_{\text{п}})$  и построении на ее основе нормальных функций распределения с заданными параметрами [85, 86].

На исследуемом участке зависимость  $U_{\text{пн}}(d_{\text{п}})$  имеет квазилинейный вид. Исходя из этого, по полученным экспериментальным данным была построена линейная регрессия вида  $U = k \cdot d + b$ . Для этого, с использованием метода наименьших квадратов найдем искомые коэффициенты  $k$  и  $b$ .

Сумма квадратов отклонения значений от модели:

$$SSE(b, k) = \sum_{i=1}^N (U_i - b - k \cdot d_i)^2$$

Один из способов найти коэффициенты  $b$  и  $k$  – вычислить частные производные  $SSE(b, k)$  по  $b$  и  $k$ :

$$\frac{d}{db} SSE(b, k) = -2 \sum_{i=1}^N (U_i - b - k \cdot d_i)$$

$$\frac{d}{dk} SSE(b, k) = -2 \sum_{i=1}^N (U_i - b - k \cdot d_i) \cdot d_i$$

и приравнять их к 0:

$$0 = -2 \sum_{i=1}^N (U_i - b - k \cdot d_i)$$

$$0 = -2 \sum_{i=1}^N (U_i - b - k \cdot d_i) \cdot d_i.$$

Далее выразить искомые коэффициенты:

$$b = \frac{\sum_i U_i}{N} - k \cdot \frac{\sum_i d_i}{N}$$

$$k = \frac{\frac{\sum_i U_i \cdot d_i}{N} - \frac{\sum_i U_i \cdot \sum_i d_i}{N^2}}{\frac{\sum_i d_i^2}{N} - \left(\frac{\sum_i d_i}{N}\right)^2}$$

Полученная таким образом линия регрессии имеет вид (рисунок 4.3.2):

$$U = 0,065 \cdot d - 0,473$$

Далее, производится 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 транслируется в вероятностную зависимость путем использования порога обнаружения и нормальной функции распределения вероятностей вида (рисунок 4.4.1):

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

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

Границы доверительного интервала  $P(U_u)$  для регрессионной модели (рисунок 4.5.1) в соответствии с [86]:

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

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

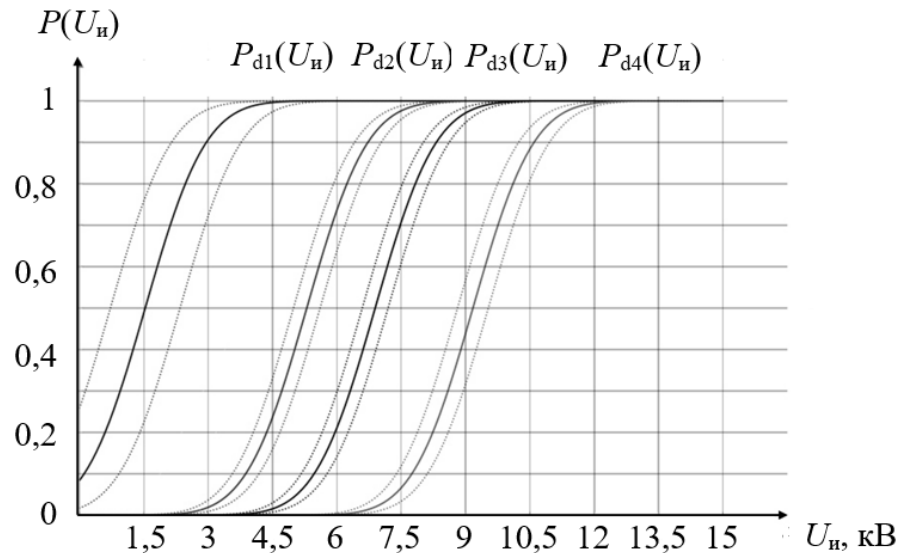


Рисунок 4.4.1 – Распределение вероятности пробоя покрытия в зависимости от приложенного напряжения для  $d_1=38$  мкм,  $d_2=89$  мкм,  $d_3=113$ ,  $d_4=148$  мкм

График зависимости вероятности обнаружения дефекта  $P(U_{\text{пн}})$  характеризует достоверность НК. На графике, являющемся сигмовидной функцией представлены границы интервала с заданной доверительной вероятностью (показаны пунктиром). Очевидно, что с увеличением  $d_{\text{п}}$  характеристика  $P(U_{\text{пн}})$  сдвигается вправо. Также при проведении допускового контроля покрытия (выявления мест недопустимого утонения) рекомендуется строить зависимость  $P(U_{\text{пн}})$  для доверительной вероятности выявления дефекта 0,9 (90 %). Следовательно, можно определить электрическую прочность покрытия  $E_{\text{п}}$  для вероятности обнаружения дефекта равной 90 % для каждой исследованной толщины покрытия (рисунок 4.4.2).

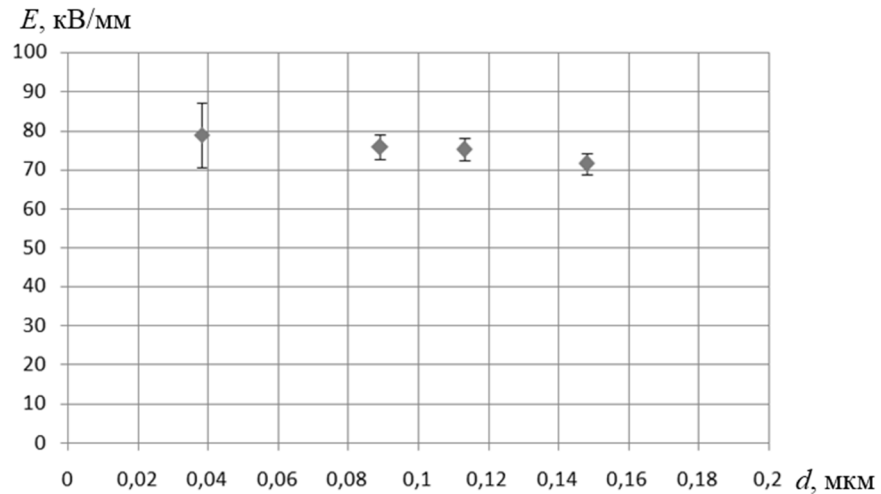


Рисунок 4.4.2 – Зависимость электрической прочности покрытия  $E_{п}$  от его толщины для исследуемых образцов

Данные эксперимента показывают, что расчетное значение  $E_{п}$  в указанном диапазоне толщин составляет  $75,4 \pm 8,2$  кВ/мм. С учетом того, что электрическая прочность практически постоянна в указанном диапазоне толщин, вероятность выявления дефекта заданной толщины (исходя из электрической прочности покрытия) составит 0,8 (80 %).

Таким образом, при известном значении электрической прочности покрытия, (определенном расчетно или экспериментально) можно с заданной вероятностью выявлять недопустимые утонения, производя контроль испытательным напряжением, величина которого равна  $U_{и} = E_{п}/d_{п}$ . Стоит добавить, что для экспериментального определения электрической прочности контролируемого покрытия, потребуется изготовление образцов, с параметрами (в том числе толщиной дефектов) идентичными выявляемым.

Проведенное исследование подтверждает защищаемые положения и позволяет проводить допусковый контроль толщины защитных покрытий, а также стопроцентный контроль сплошности покрытий электроискровым методом НК с известной вероятностью обнаружения дефектов покрытий, являющейся функцией испытательного напряжения метода, что в комбинации с результатами, полученными для сквозных дефектов покрытий, позволяет разработать

нормативную базу для выявления сквозных и несквозных дефектов покрытий в диапазоне толщин 50 мкм – 25 мм.

#### **4.5. Выводы к главе 4**

1. Рассчитана и разработана схема формирования одиночного импульса положительной полярности длительностью менее 30 мкс, позволяющего снизить эффект электрического старения изоляции в зоне контроля и обеспечивающей расширение диапазона толщин контролируемых покрытий.

2. Разработаны общие конструктивные принципы построения электродов для формирования сильнонеоднородных полей, а также усовершенствованы конструкции плоских резиновых электродов, обеспечивающие повышение неоднородности электрического поля в межэлектродном промежутке и позволяющие расширить диапазон толщин и увеличить номенклатуру покрытий, доступных для контроля электроискровым методом НК .

3. Разработана методика оценки вероятности выявления недопустимых утонений покрытия электроискровым методом НК при заданном испытательном напряжении.

## **ГЛАВА 5. ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИБОРОВ И МЕТОДИК ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО КОНТРОЛЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ**

### **5.1. Приборы для выявления сквозных дефектов и недопустимых утонений диэлектрических покрытий на электропроводящих основаниях**

Как было показано в главе 1, одной из проблем выявления сквозных дефектов покрытий до настоящего времени являлось ограничение нижнего предела толщины покрытий в 500 мкм для контроля электроискровым методом. Существовал риск повреждения покрытия при контроле, так как отсутствовали методики расчета испытательного напряжения и приборы, позволяющие производить контроль покрытий толщиной 50 — 500 мкм (в этот диапазон попадает большинство ЛКП) [87].

С учетом проведенного в главе 3 теоретического и экспериментального анализа параметров, оказывающих влияние на процесс выявления сквозных и несквозных дефектов диэлектрических покрытий, были разработаны и обоснованы способы и методы снижения испытательного напряжения, позволяющие решить задачу контроля тонких покрытий в диапазоне толщин от 50 мкм до 25 мм.

Также, для приборной реализации методов снижения испытательного напряжения, в главе 4 описаны схема формирования импульсного испытательного напряжения положительной полярности и конструктивные принципы создания контролируемых электродов, позволяющие не только понизить минимальное допустимое испытательное напряжение метода, но и понизить время взаимодействия покрытия с высоким напряжением, что снижает влияние эффекта электрического старения на контролируемое покрытие.

С использованием вышеизложенных положений, реализована серия электроискровых дефектоскопов «Корона». В том числе, прибор «Корона 1» - предназначенный для контроля покрытий, толщина которых от 50 мкм до 1 мм на электропроводящих и слабопроводящих основаниях. В качестве слабопроводящего основания может выступать бетон или железобетон, чья электропроводность

обусловлена наличием электропроводящих примесей и молекул воды в его структуре.

Внешний вид серии приборов, представлен на рисунке 5.1.1.

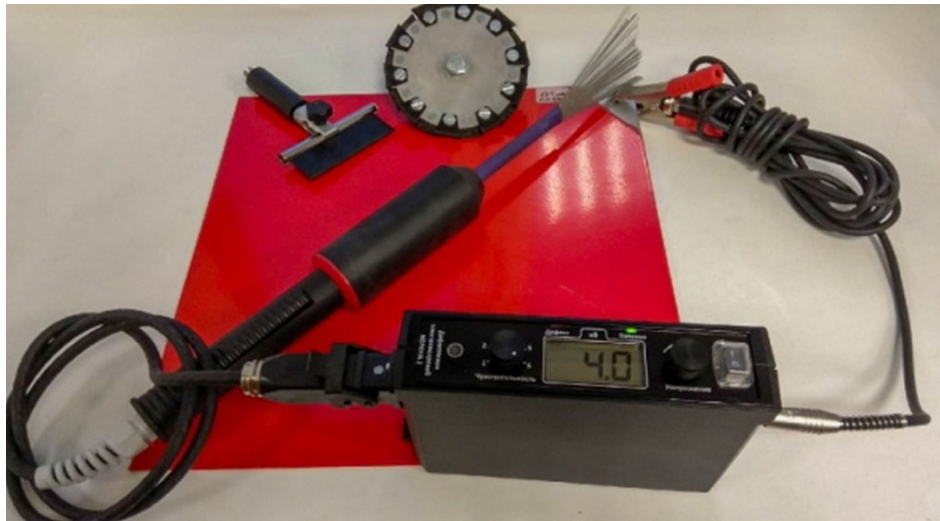


Рисунок 5.1.1 – Внешний вид электроискровых дефектоскопов серии «Корона»

Также, для электроискровых дефектоскопов «Корона» были внесены изменения в конструкцию электродов, придающие оконечностям электродов заостренную форму и формирующие в процессе контроля сильнонеоднородное электрическое поле в контролируемой области покрытия. Внешний вид плоского резинового электрода приведен на рисунке 5.1.2.

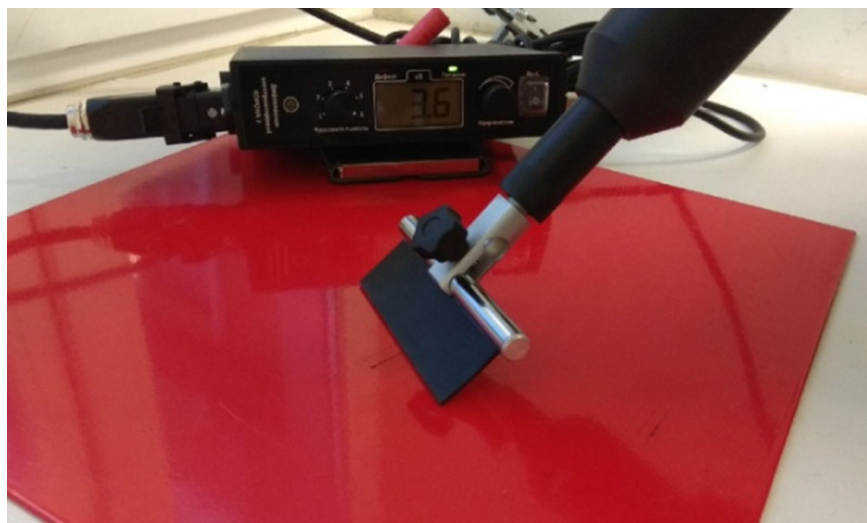


Рисунок 5.1.2 – Внешний вид плоского резинового электрода для электроискровых дефектоскопов серии «Корона»

Для подтверждения того, что внесенные конструктивные изменения действительно снижают испытательное напряжение метода при выявлении сквозных дефектов покрытий, были проведены эксперименты по определению электрической прочности сквозных дефектов  $E_{пв}$  в зависимости от толщины контролируемого покрытия и формы используемого электрода.

В качестве покрытия использовались листы органического стекла, уложенные на фольгированный текстолит с заявленной толщиной медного слоя – 35 мкм. В качестве дефекта в покрытиях выступали отверстия диаметров 1 мм. В качестве электродов были выбраны: стальная сфера диаметром 40 мм, стальной стержень с диаметром острия 1,8 мм, стержень с диаметром острия 0,6 мм, стержень с диаметром острия 0,35 мм.

Толщина покрытия в районе сквозного дефекта рассчитывалась как среднее арифметическое из 10 измерений. Структурная схема экспериментальной установки представлена на рисунке 5.1.3. К покрытию прикладывался электрод на штативе, таким образом, чтобы оконечность электрода находилась непосредственно над дефектом. Внешний вид экспериментальной установки приведен на рисунках 5.1.4, 5.1.5.

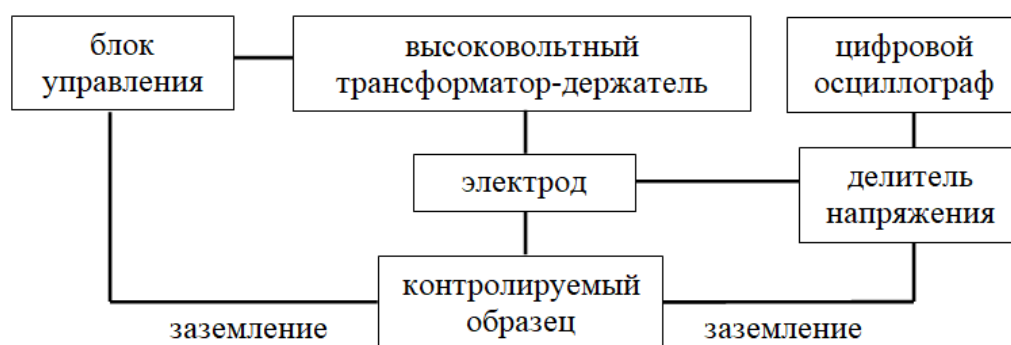


Рисунок 5.1.3 – Структурная схема экспериментальной установки



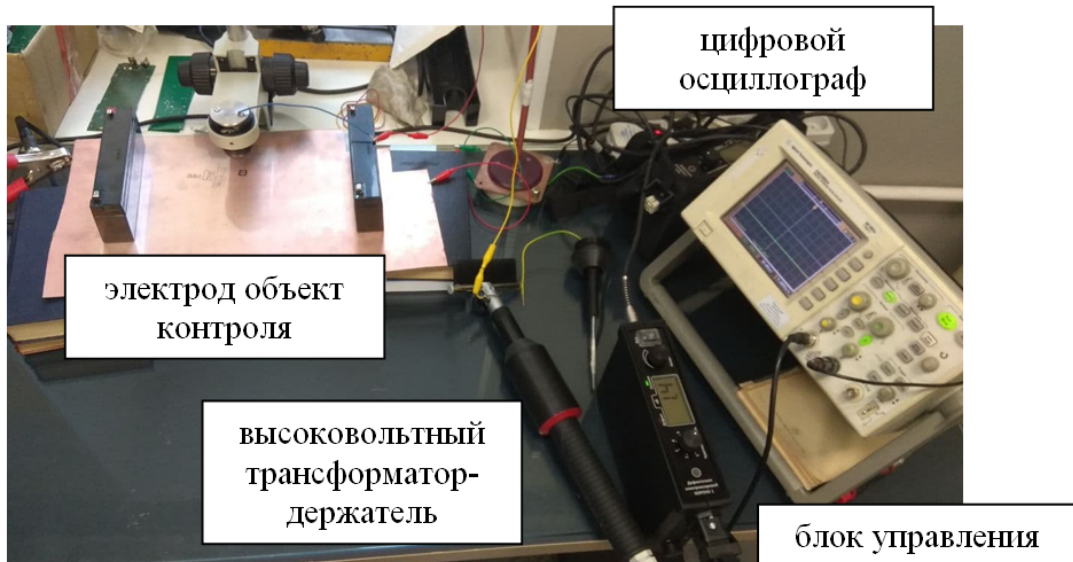


Рисунок 5.1.4 – Экспериментальная установка. Общий вид

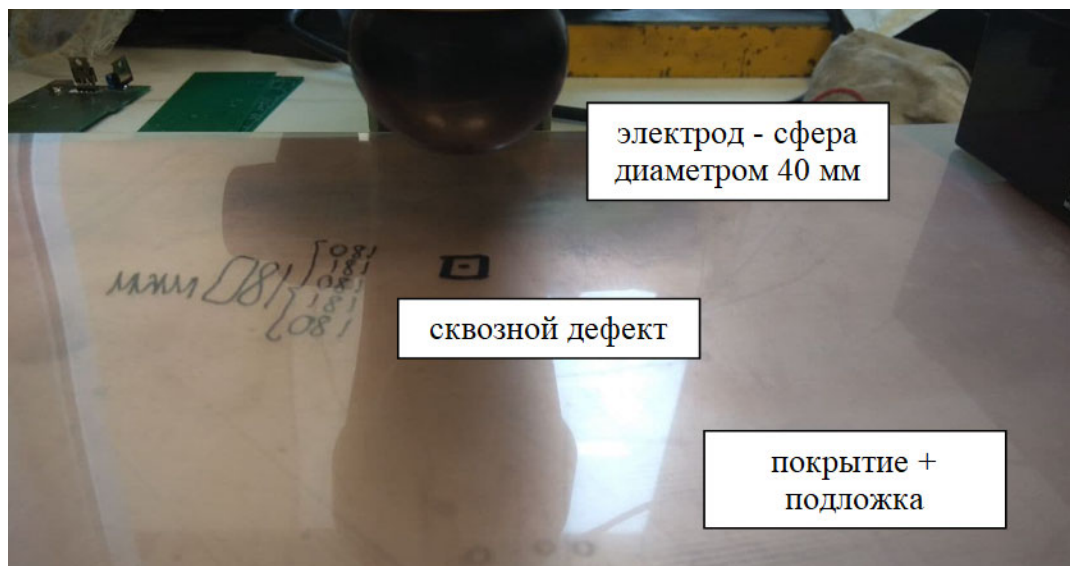


Рисунок 5.1.5 – Экспериментальная установка. Вид электрода и дефекта

С помощью электроискрового дефектоскопа «Корона 1» на электрод подавались импульсы испытательного напряжения (рисунок 4.1.3) с частотой до 600 Гц. Амплитуда импульсов постепенно увеличивалась до образования искрового разряда в области дефектного участка покрытия. Напряжение, при котором произошел разряд, фиксировалось по цифровому осциллографу, подключенному через делитель напряжения. Электрическая прочность определялась по формуле 5.1.

$$E_{\text{пв}} = \frac{U_{\text{пв}}}{d} \quad (5.1)$$

Зависимость  $E_{\text{пв}}(d)$  приведена на рисунке 5.1.6.

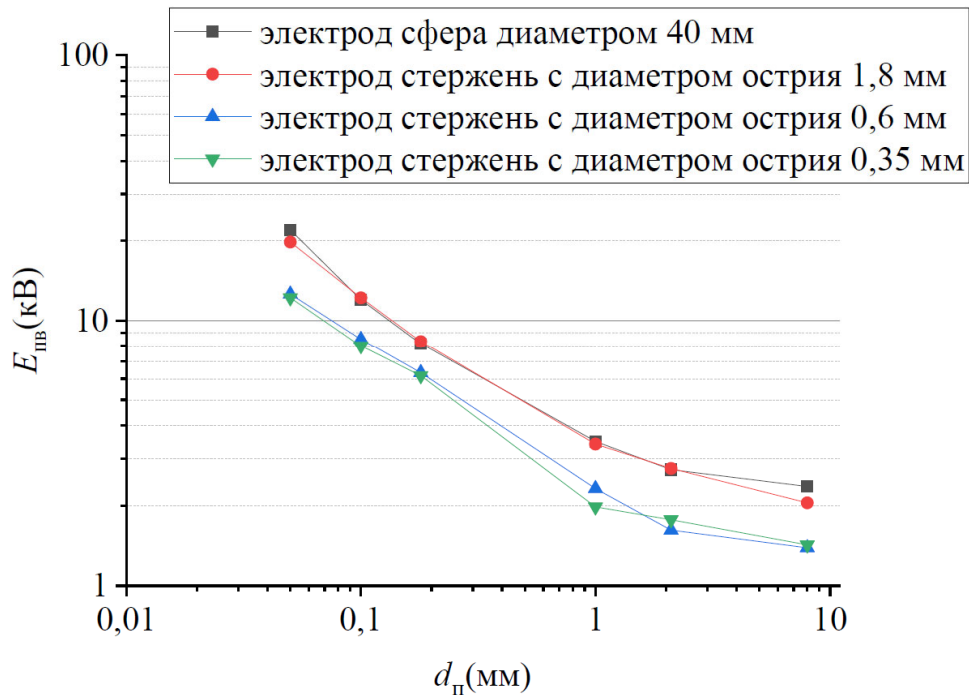


Рисунок 5.1.6 – Зависимость электрической прочности сквозного дефекта покрытия от толщины покрытия

Как видно из полученных зависимостей – электроды, диаметр острия которых меньше 1 мм, показали значительное снижение  $E_{\text{пв}}$  относительно электродов большего диаметра. Это связано с тем, что диаметр электродов 3 и 4 меньше диаметра сквозного отверстия, имитирующего дефект. Таким образом, с помощью электродов 3 и 4 удалось сформировать в сквозном дефекте покрытия сильнонеоднородное электрическое поле, что привело к уменьшению  $E_{\text{пв}}$  сквозного дефекта покрытия (рисунок 3.2.2 – 3.2.4). Из чего можно сделать вывод, что при уменьшении диаметра/размера оконечности контролирующего электрода, сильнонеоднородное поле формируется в сквозном дефекте меньшего размера, что особенно актуально при контроле ЛКП. Однако вышеописанные эффекты оказывают слабое влияние на электрическую прочность покрытия.

## 5.2. Системы электроискрового автоматизированного контроля сплошности диэлектрических покрытий в поточном производстве

Помимо ручного использования электроискровых дефектоскопов, актуальной является задача автоматизированного контроля сплошности диэлектрических покрытий в поточном производстве [25]. В настоящее время автоматизированный контроль сплошности покрытий осуществляется в процессе нанесения внешних и внутренних защитных покрытий труб, используемых в магистральных нефте- и газопроводах, а также покрытий насосно-компрессорных труб, применяемых при добыче углеводородов.

Для решения вышеописанной задачи разработана и успешно применяется серия стационарных электроискровых дефектоскопов «Корона С» (рисунок 5.2.1) Структурная схема прибора приведена на рисунке 5.2.2.



Рисунок 5.2.1 – Внешний вид электроискрового дефектоскопа «Корона С»

В силу того, что контроль сплошность покрытий в поточной линии может производиться круглосуточно и контролю подвергаются объекты с большой

площадью поверхности, которые требуется проконтролировать за один проход, то к автоматизированным средствам контроля предъявляются повышенные требования по надежности в процессе эксплуатации и нагрузочной способности электродного узла.

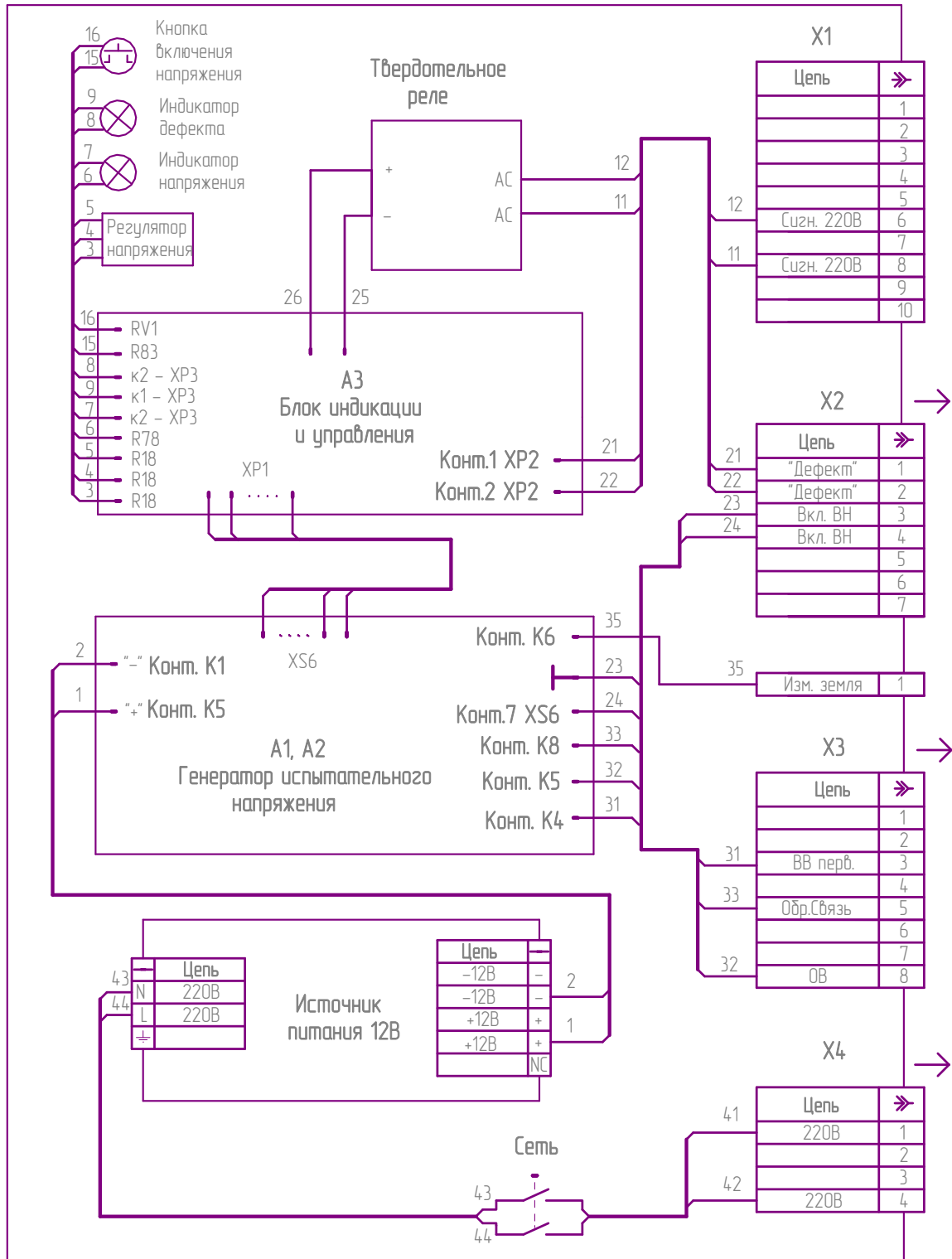


Рисунок 5.2.2 – Структурная схема электроискровых дефектоскопов «Корона С»

Основными отличиями оборудования, возникающими при контроле сплошности покрытий в поточном производстве, являются высокие требования к надежности и к нагрузочной способности приборов. На рисунках 5.2.3 – 5.2.4. изображены приборы Корона С и оснастка для них в виде: контролирующих электродов, электродов заземления, толкателей для контроля покрытий внутри труб.



Рисунок 5.2.3 – Внешний вид линии контроля сплошности наружных покрытий труб

Из рисунков видно, что используемые в автоматизированных линиях электроды могут составлять достаточно большую емкостную нагрузку для узла формирования высокого напряжения прибора. Помимо этого, в процессе проведения испытаний объект контроля (т.е. труба с покрытием) может приобретать электрический заряд и сохранять его длительное время, особенно при использовании постоянного напряжения для проведения испытаний. Эти факторы повышают требования к технике безопасности при работе с оборудованием и усложняют процесс проведения контроля.

В дефектоскопах «Корона С» вышеописанная проблема решена путем формирования импульсного испытательного напряжения короткой длительности на электроде (п. 4.1). При таком способе формирования испытательного напряжения электрическая емкость, создаваемая системой электрод – покрытие – труба, заряжается локально и успевает разрядиться за промежуток между импульсами испытательного напряжения (частота следования импульсов – 50 Гц)



Рисунок 5.2.4. Внешний вид электроискрового дефектоскопа «Корона С» в составе с толкателем

Также, как уже говорилось ранее (п. 4.3), с уменьшением толщины покрытий доступных для контроля актуальной стала задача формирования сильнонеоднородного электрического поля внутри трубы. Для решения этой задачи с использованием вышеописанных принципов было разработано семейство внутритрубных электродов для использования, в том числе, с системами автоматизированного контроля «Корона С».

### **5.3. Проект методики электроискрового контроля диэлектрических покрытий**

Помимо технических совершенствований электроискрового метода для выявления дефектов сплошности покрытия необходима также методика осуществления НК электроискровым методом, учитывающая возможность формирования неоднородного электрического поля и тем самым расширяющая диапазон контролируемых напряжений.

Таким образом, с учетом вышеизложенных положений, был разработан проект методики по выявлению сквозных и несквозных дефектов покрытий, учитывающей влияние электрической прочности покрытия ( $E_{пв}$ ) на процесс осуществления контроля.

Так, в случае, если нормативной документацией определена величина контрольного напряжения, то пользователю требуется провести контроль покрытия в соответствии с нормативно-технической документацией и руководством по эксплуатации дефектоскопа, по результатам испытаний покрытия оформить протокол.

Если для покрытия не определено контрольное напряжение, то необходимо:

1. Определить минимальную  $d_{\min}$  и максимальную  $d_{\max}$  толщину контролируемого покрытия на объекте.
2. Для  $d_{\max}$  определить минимально допустимое испытательное напряжение  $U_{\min}$  (п. 3.3).

3. Для  $d_{\text{мин}}$  определить напряжение пробоя материала покрытия  $U_{\text{пп}}$  (из нормативных характеристик покрытия или экспериментально (п. 4.5).
4. В случае если требуется выявлять только сквозные дефекты, выбрать испытательное напряжение из диапазона:  $U_{\text{мин}} > U_{\text{и}} > U_{\text{пп}}$ .
5. В случае если требуется выявлять недопустимые утонения, определить  $U_{\text{пп}}$  образца покрытия толщиной равной недопустимому утонению (п. 4.6).
6. Ввести полученные данные о испытательном напряжении в прибор.
7. Провести контроль в соответствии с техникой безопасности и инструкции эксплуатации прибора.
8. По результатам испытаний оформить протокол.

Так, частично результаты работы отражены в методике проведения контроля, описанной в ГОСТ 34395 – 2018, разработанном специально для проведения контроля ЛКП электроискровым методом НК. Основным изменением в существующие методики являются изменения, внесенные в процедуру расчета испытательного напряжения. Так, согласно ГОСТ Р51164 – 98,  $U_{\text{и}}$  рассчитывается исходя из соотношения 5 кВ на 1 мм толщины покрытия. Испытательные напряжения, рассчитанные по этому соотношению, подходят для проведения контроля покрытий в диапазоне толщин 1-10 мм. Однако в диапазоне до 1 мм,  $U_{\text{и}}$ , получаемое из соотношения не подходит для контроля т.к. полученного значения  $U_{\text{и}}$  недостаточно для формирования искрового разряда на расчетной толщине покрытия. Так, при прохождении электрода по поверхности в процессе контроля, он может пройти не непосредственно над дефектной областью, а чуть в стороне (пройти может как сам электрод, так и ворсинки щеточного электрода), при этом, важно, чтобы испытательного напряжения было достаточно, чтобы искра образовалась на межэлектродном расстоянии, которое, данном случае, превышает толщину контролируемого покрытия (рисунок 3.7.4).

В свою очередь ГОСТ 34395-2018 [70] устанавливает эмпирическую зависимость (3.1) для расчета  $U_{\text{и}}$ , в которой один из коэффициентов выбирается исходя из толщины покрытия.



Таким образом, все вышеперечисленные изменения, внесенные в конструкцию прибора и методику проведения испытаний направлены, в первую очередь, на уменьшение пробивного напряжения сквозного дефекта покрытия и измерению электрической прочности контролируемого покрытия, что в комплексе позволяет проводить контроль более тонких покрытий в диапазоне толщин от 50 мкм до 25 мм, и выявлять дефекты типа «недопустимое утонение» без риска повреждения бездефектных участков контролируемого покрытия.

#### **5.4. Выводы к главе 5**

1. Выполнены экспериментальные исследования электрической прочности дефектных участков покрытий и методики расчета испытательного напряжения, подтвердившие основные теоретические положения работы и возможность расширения диапазона контролируемых толщин, а также повышение информативности и достоверности контроля.

2. Сформулированы общие конструктивные принципы создания оборудования, реализующего электроискровой метод НК, на основании которых разработана серия электроискровых импульсных дефектоскопов «Корона» с расширенными техническими характеристиками, применяемых в ручных и автоматизированных системах контроля широкой номенклатуры диэлектрических покрытий на изделиях из электропроводящих материалов.

3. Разработан проект методики выявления сквозных и несквозных дефектов диэлектрических покрытий, включенной 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.

## 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 схемотехнических 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.

Дальнейшие исследования по данной тематике будут направлены на определение влияния частотных характеристик импульсов испытательного напряжения на результаты контроля, а также на разработку методик и соответствующей нормативной документации для конкретных применений, позволяющих в одном технологическом цикле определять сплошность, электрическую прочность и выявлять недопустимые утонения диэлектрических покрытий на электропроводящих основаниях широкой номенклатуры объектов машиностроения, транспортной инфраструктуры и строительства.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. 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.
2. ГОСТ 9.602-2016 Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. – М.: Стандартиформ, 2016. – 87 с.
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, 2014.
5. ГОСТ Р51164-98 Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии. – М.: Изд-во стандартов, 1998. – 46 с.
6. Киселев, В.Г. Диэлектрические покрытия и их влияние на защиту от коррозии наружной поверхности подземных трубопроводов / В.Г. Киселев, Е.Н. Рузич // Проблемы энергетики. – 2018. – №1. – С. 80-89.
7. ГОСТ 9.407-2015 Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Метод оценки внешнего вида. – М.: Изд-во стандартов, 2016. – 58 с.
8. Протасов В.Н. Метод контроля диэлектрической сплошности внутреннего защитного полимерного покрытия труб нефтяного сортамента после поперечного изгиба с заданной стрелой прогиба при приемо-сдаточных испытаниях у производителя и при опытно-промышленных испытаниях на промысловых полигонах у потребителя / В.Н. Протасов, Д.Ю. Дедков, О.О. Штырев // Территория «НЕФТЕГАЗ». – 2016. – № 5. – С. 44–48.
9. Яковлев, А.Д. Химия и технология лакокрасочных покрытий: Учебник для вузов 4-е изд., исправл. / А. Д. Яковлев — СПб.: ХИМИЗДАТ, 2010. — 448 с.

10. Бобков Л.С. и др. Лакокрасочные покрытия в машиностроении Справочник [Книга] / ред. Гольдберга. – М.: Машиностроение, 1974. — 576 с.
11. Мустафин, Ф.М. Обзор методов защиты трубопроводов от коррозии изоляционными покрытиями // Нефтегазовое дело. – 2003. – №3. – С.3-27.
12. Электрические свойства полимеров / С.Л. Синебрюхов, М.В. Сидорова, В.С. Егоркин, П.М. Недозоров, Б.И. Сажин. – Ленинград: Химия, 1977. – 192 с.
13. Редько, В.В. Электроискровой контроль качества изоляции кабельных изделий [Электронный ресурс]: монография / В.В. Редько // –Томск: Изд-во ТПУ, 2013. –928с.– Режим доступа: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext2/m/2013/m213.pdf>
14. Воронин, В.В. Формализация понятий дефекта и его диагностических показателей // Электронное научное издание «Ученые заметки ТОГУ». – 2013. – №4. – С. 825 – 833.
15. Оценка эффективности противообрастающих покрытий на основе фторопласта / В.Ф. Каблов, В.Е. Костин, Д.А. Кондруцкий, Н.А. Соколова // Современные наукоемкие технологии. – 2010. – №5. – С.39 – 43.
16. 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.
17. Устинов, А.Ю. Антикоррозионные, антифрикционные покрытия на магниевых сплавах для авиации / А.Ю. Устинов, С.В. Гнеденков // Вестник ДВО РАН. – 2011. – №5. – С.95-105.
18. ГОСТ 9.410-88 Система защиты от коррозии и старения. Покрытия порошковые полимерные. Типовые технологические процессы. – М.: Стандартиформ, 2006. – 24 с.
19. Волгин, С. Н. Технология модификации полимерных материалов для эластичных резервуаров, предназначенных для хранения горючего / С. Н. Волгин, Ю. Н. Рыбаков // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2020. – № 4(76). – С. 13-19.

20. Ерехинский, Б.А. Современные технологии диагностики объектов добычи газа и газового конденсата. Применяемая техника и оборудование / Б.А. Ерехинский, А.В. Пахомов. – Воронеж: Воронежская областная типография, 2017. – 374 с.
21. Основные причины возникновения дефектов изоляционных покрытий / Р.А. Харисов, А.Р. Хабирова, Ф.М. Мустафин, Р.А. Хабиров // Электрон. науч. журн. "Нефтегазовое дело". – 2005. – № 1. – С. 16.
22. Редько, В.В. Разработка методов и средств электроискрового технологического контроля изоляции кабельных изделий: дис. ... док. техн. наук: 05.11.13 / Редько Виталий Владимирович. –Томск., 2013. - 207 с.
23. Солнцев, Ст.С. Высокотемпературные композитные материалы и покрытия на основе стекла и керамики для авиакосмической техники / Российский химических журнал. – 2010. – №1. – С. 11-32.
24. Оценка опасности биокоррозии подземных стальных сооружений / Л. П. Худякова, А. А. Шестаков, И. Р. Фархетдинов, А. В. Широков // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2019. – Т. 9. – № 1. – С. 82-91.
25. Галеева, Н.С. Повышение информативности контроля кабельных изделий на основе комплексного использования электроискрового и электроемкостного методов: дисс. ... канд. техн. наук: 05.11.13 / Галеева Надежда Сергеевна. -Томск., 2017. -143 с.
26. Неразрушающий контроль. Вихретоковый контроль = Справочник [Книга] / ред. чл.-корр. РАН Ключев В.В. - М : Машиностроение, 2003. -347 с.
27. Неразрушающий контроль. Магнитные методы контроля = Справочник [Книга] / ред. чл.-корр. РАН Ключев В. В. - М : Машиностроение, 2003. -358 с.
28. Неразрушающий контроль. металлов и изделий = Справочник [Книга] / ред. Самойловича Г.С.. - М : Машиностроение, 1976. - Т.2. -456 с.

29. Неразрушающий контроль. Радиационный контроль = Справочник [Книга] / ред. чл.-корр. РАН Клюев В. В. - М : Машиностроение, 2003. - Т.1. Книга 2. -236 с.
30. Неразрушающий контроль. Ультразвуковой контроль = Справочник [Книга] / ред. чл.-корр. РАН Клюев В. В. - М : Машиностроение, 2003. - Т.3. -864 с.
31. ГОСТ Р 56542-2019 Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. – М.: Стандартинформ, 2019. – 10 с.
32. Марков Н. Н. и др. Погрешность и выбор средств при линейных измерениях. [Книга]. - М : Машиностроение, 1967. -392 с.
33. Неразрушающий контроль. Электрический контроль = Справочник [Книга] / ред. чл.-корр. РАН Клюев В.В. – М.: Машиностроение, 2004. -679 с.
34. Ибрагимов, Н.Ю. Дефектоскопическая установка трещиномер силикатных покрытий труб / Н.Ю. Ибрагимов, Э.Н. Ибрагимова // Дефектоскопия. – 2017. – №11. – С. 55-57.
35. Исследования начальной фазы искрового разряда в воздухе в промежутке острие (катод)–плоскость методом лазерного зондирования / А.А. Тренькин, К.И. Алмазова, А.Н. Белоногов, В.В. Боровков, Е.В. Горелов, И.В. Морозов, С.Ю. Харитонов // Журнал технической физики. – 2020. – Т.90, №12. – С. 2039-2047.
36. Электротехнические материалы: Учеб. Пособие / Прахова М.Ю., Ишинбаев Е.А. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2000 – 139 с.
37. 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.
38. 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.

39. NACE SP0188-2006. Discontinuity (Holiday) Testing of New Protective Coatings on Conductive Substrates, 2006.
40. ASTM D6747-15. Standard Guide for Selection of Techniques for Electrical Leak Location of Leaks in Geomembranes, 2015.
41. Сясько, В.А. Совершенствование электроискрового метода неразрушающего контроля / В.А. Сясько, С.С. Голубев, А.С. Мусихин // Контроль. Диагностика. – 2019. – № 12. – С. 4-14.
42. Грабовский, Р.И. Курс физики. Учеб. пособие для с/х ин-тов. Изд. 4-е, перераб. и доп. –М: Высшая школа, 1974. - 552 с.
43. Старикова, Н. С. Исследование методов контроля целостности изоляции в области слабых и сильных электрических полей [Электронный ресурс] / Н. С. Старикова, В. В. Редько // Вестник науки Сибири. – 2013. – № 3 (9) . – С. 55-59.
44. Редько, В.В. Выявляемость дефектов изоляции кабельных изделий при испытаниях высоким напряжением / В.В. Редько, Н.С. Старикова // Контроль. Диагностика. – 2014. – № 12. – С. 69-73.
45. Важов, В. Ф. Техника высоких напряжений: Курс лекций / В. Ф. Важов, В.А. Лавринович // Издательство ТПУ. – Томск, 2008, - 150 с.
46. Базелян, Э.М. Искровой разряд: Учеб. Пособие / Э.М. Базелян, Ю.П. Райзер. -Москва: Изд-во МФТИ, 1997. – 320 с.
47. Мик, Дж. Электрический пробой в газах : Перевод с англ. / Дж. Мик, Дж. Крэгс. – М.: Изд-во иностранной лит-ры, 1960. – 605с.
48. Физика диэлектриков (область сильных полей): Учебное пособие / Г.А. Воробьев, Ю.П. Похолков, Ю.Д. Королев и др. – Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – 244 с.
49. Райзер Ю.П. Физика газового разряда: Учебное руководство – 2-е изд. / – М. Наука, 1992 – 536 с.
50. Вершинин Ю.Н. Электронно-тепловые и детонационные процессы при электрическом пробое твердых диэлектриков [Книга] / – Екатеринбург: УрО РАН, 2000 - 260 с.



51. Закревский, В.А. Электрическое разрушение тонких полимерных пленок / В.А. Закревский, Н.Т. Сударь // Физика твердого тела. – 2005. – Т.47(5). – С. 931-936.
52. Воробьев, А.А. Импульсный пробой твердых диэлектриков / А.А. Воробьев, Г.А. Воробьев // Известия ТПУ. – 1958. – Т. 95. – С.3-14.
53. Суриков, Вал.И. Основы теории твердого тела: Учебное пособие / Вал.И. Суриков, Вад.И. Суриков. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2016. – 95 с.
54. Смирнов А.С. Прикладная физика, Физика газового разряда: Учеб. пособие. -СПб.; Изд-во СПбГТУ, 1997, -68 с.
55. Методы изучения структуры и колебаний кристаллов: учеб. пособие /сост.: Глазков В.Н. – М.: МФТИ, 2015. – 42 с.
56. 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.
57. ГОСТ 9.402-2004 Единая система защиты от коррозии и старения. Покрyтия лакокрасочные. Подготовка металлических поверхностей к окрашиванию. – М.: Стандартинформ, 2006. – 40 с.
58. ГОСТ 9.401-91 Единая система защиты от коррозии и старения. Покрyтия лакокрасочные. Общие требования и методы ускоренных испытаний на стойкость к воздействию климатических факторов. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 194 с.
59. ГОСТ 9.032-74 Единая система защиты от коррозии и старения. Покрyтия лакокрасочные. Группы, технические требования и обозначения. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 19 с.
60. ГОСТ 9.072-2017 Единая система защиты от коррозии и старения. Покрyтия лакокрасочные. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2017. – 15 с.
61. ASTM D 5162-01:2015. Standard Practice for Discontinuity (Holiday) Testing of Nonconductive Protective Coating on Metallic Substrates, 2015.

62. Davies M. A. S. Holiday detection: what is the correct test voltage? // *Anti-Corrosion Methods and Materials*, -1983. – №12. – p.4-12. ISSN: 0003-5599
63. А.Е. Усачёв, Методы расчета электрических полей: учеб. пособие – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2013. – 111 с.
64. Bossavit, N. How weak is the Weak Solution in finite elements methods? // *IEEE Trans. Magn.* - 1998, – № 5 vol.34. – pp. 2429 – 2432.
65. Вишняков С.В., Гордюхина Н.М., Федорова Е.М. Расчет электромагнитных полей с помощью программного комплекса ANSYS. - [б.м.] : МЭИ (ТУ) Кафедра электрофизики, 2003.
66. Бобрович, О. Г. Физика. В 5 ч. Ч. 2. Электростатика. Постоянный электрический ток : тексты лекций по дисциплине «Физика» для студентов специальности 1-48 01 02 «Химическая технология органических веществ, материалов и изделий» / О. Г. Бобрович, В. В. Тульев. – Минск : БГТУ, 2011. – 93 с.
67. Смирнов А.С. Прикладная физика. Физика газового разряда: Учеб. Пособие / -СПб: Изд-во СПбГТУ, 1997, -68 с.
68. 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
69. Сясько В.А. Электроискровой импульсный контроль функциональных диэлектрических покрытий толщиной от 25 мкм и более / В.А. Сясько, А.С. Мусихин // XXII Всероссийская конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике. Сборник трудов конференции. – 2020. – С. 120-121.
70. ГОСТ 34395-2018 Материалы лакокрасочные. Электроискровой метод контроля сплошности диэлектрических покрытий на токопроводящих основаниях. – М.: Стандартинформ, 2018. – 11 с.
71. Hussian, E. Effect of humidity on breakdown voltage of gaps and insulators / E. Hussian, M.R. Nandagopal, B.R. Prabhakar // – 1974. – №3. – pp. 481-494.
72. Feser, K. Influence of humidity on the breakdown voltage of d.c. and a.c. voltage in air // *Haefely publication*, – 1972, – №6, – p. 278-281.

73. NisheetSoni (HOD), Effect of Humidity on the Impulse Breakdown Characteristic of Air / NisheetSoni (HOD), Harshit choubey // International Journal of Recent Research in Electrical and Electronics Engineering. – 2015. – Vol. 2, Issue 3. – p. 63-65.

74. Григорьев, А.Н. Электрический разряд по поверхности твердого диэлектрика. Ч. 1. Особенности развития и существования поверхностного разряда / А.Н. Григорьев, А.В. Павленко, А.П. Ильин, Е.И. Карнаухов // Известия ТПУ, 2006. – №1. – С.66-69.

75. Францев, С.М. Исследование влияния полярности высокого напряжения на величину напряжения пробоя межэлектродного зазора свечей зажигания / С.М. Францев, А.Ю. Кавторев // Инженерный вестник Дона. – 2015. – №2. – С. 6-13.

76. Мусихин, А.С. Электроискровой контроль сплошности защитных лакокрасочных покрытий / А.С. Мусихин, Сясько В.А. // В мире НК. – 2018. – Т.21,№2. – С. 42-45.

77. Бочаров, Ю. Н. Техника высоких напряжений: учебное пособие / Ю. Н. Бочаров, С. М. Дудкин, В. В. Титков. – М.: Юрайт, – 2019. – 264 с.

78. 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.

79. Литвиненко, Т. Н. Повышение энергоэффективности формирователей высоковольтных импульсов с наносекундной длительностью: дисс. ... канд. техн. наук: 05.09.12 / Тарас Николаевич Литвиненко. - Запорожье, 2016. - 205 с.

80. Электроизоляционные свойства полимерных покрытий / Л.В. Семенова, Э.Я. Бейдер, Г.Н. Петрова, Н.И. Нефедов // Труды ВИАМ. – 2014. – №8. – С.20-32.

81. Иванов, В.И. Использование вероятностных методов для оценки эффективности неразрушающего контроля / В.И. Иванов, Н.Н. Коновалов, А.Н. Дергачев // Технологии техносферной безопасности. – 2014. – №6. – С.1-6.

82. Лебедев, А.М. Исследование достоверности допускового контроля // Научный вестник МГТУ ГА. – 2005. – №86(4). – С.65 – 70.
83. 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 // Авиационные материалы и технологии. – 2018. – №3(52). – С. 65-79. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-65-79
84. Данилевич, С.Б. Оценка достоверности контроля приборов, поверяемых в нескольких точках диапазона / С.Б. Данилевич, В.В. Третьяк // Научный вестник НГТУ. – 2020. – №1. – С.157-164.
85. Кобзарь, А.И. Прикладная математическая статистика для инженеров и научных работников - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.
86. 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.
87. Бакаева, Р.Д. Повышение надежности нефтепромыслового оборудования в результате применения технологии модификации газотермических коррозионно-стойких покрытий / Р. Д. Бакаева, Л. Х. Балдаев, Д. З. Ишмухаметов [и др.] // Нефтяное хозяйство. – 2020. – № 4. – С. 68-73.
88. Красиков В.Л. Лак или парилен – что выбрать для защиты радиоэлектронных модулей? / В.Л. Красиков, Г.С. Александрова // Известия СПбГТИ(ТУ). – 2018. – №44 – С. 69-74.
89. Кирдяев М.М. Влагозащитные покрытия печатных плат / М.М. Кирдяев, И.И. Кочегаров, В.А. Трусов // Труды Международного симпозиума «НАДЕЖНОСТЬ И КАЧЕСТВО». – 2015. – №78 т.2. – С. 329-336.
90. Энергии разрыва химических связей. Потенциалы ионизации и сродство к электрону = Справочник [Книга] / ред. Кондратьев В.Н. - М : Наука, 1974. -351 с.

91. Вершинин Ю. Н. Электрический пробой твердых диэлектриков. Основы феноменологической теории и её технические приложения - Новосибирск : Наука, 1968. -211 с.

92. Сви П.М. Методы и средства диагностики обрудования высокого напряжения / П.М. Сви. М.: Энергоатомиздат, 1992. 128 с.

93. Электрофизические основы техники высоких напряжений [Электронный ресурс]: учебник для вузов / И.М. Бортник и др.; под общ. ред. И.П. Верещагина. — М.: Издательский дом МЭИ, 2016.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Акт внедрения ООО «Константа»



ООО "Константа"  
 Почтовый адрес: Россия, 198095,  
 г. Санкт-Петербург, а/я 42  
 ИНН 7805666639, КПП 780501001  
 р/с 40702810500000027063  
 к/с 30101810000000000852, БИК 044030852  
 в АО Банк "ПСКБ" г. Санкт-Петербург  
 ОКПО 27449627  
 Юр. адрес: 198097, г. Санкт-Петербург, переулок  
 Огородный, д. 21, литер А, офис 404  
  
 +7 (812) 372-29-03, 372-29-04  
 office@constanta.ru, www.constanta.ru  
 От 15.09.2022 № 348/1-22



Утверждаю  
 Главный инженер  
 ООО «Константа»  
 Булатов А.С.

#### Заключение

О внедрении результатов диссертационного исследования  
 Мусихина Алексея Сергеевича

Результаты диссертационного исследования А.С. Мусихина на тему:  
 «Совершенствование электроискрового неразрушающего контроля диэлектрических  
 покрытий», представленного на соискание ученой степени кандидата технических  
 наук, использованы в практической деятельности ООО «Константа» при разработке  
 комплекта рабочей конструкторской документации и производстве серии  
 электроискровых дефектоскопов «Корона», реализуемых в РФ, странах Евросоюза,  
 КНР, и предназначенных для выявления сквозных и несквозных дефектов покрытий  
 в диапазоне толщин от 50 мкм до 25 мм.

Директор по производству



Никазов А.А.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

## Патент на полезную модель

## «Устройство для дефектоскопии внутреннего покрытия труб»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 213724

**УСТРОЙСТВО ДЛЯ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ  
ВНУТРЕННЕГО ПОКРЫТИЯ ТРУБ**

Патентообладатель: *Общество с ограниченной  
ответственностью "КОНСТАНТА" (RU)*

Авторы: *Сясько Владимир Александрович (RU), Мусихин  
Алексей Сергеевич (RU), Васильев Алексей Юрьевич (RU)*

Заявка № 2021129903

Приоритет полезной модели 13 октября 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре полезных

моделей Российской Федерации 26 сентября 2022 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 13 октября 2031 г.

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

*Ю.С. Зубов*



## ПРИЛОЖЕНИЕ В

Калибровочные сертификаты электроискровых дефектоскопов серии  
«Корона»

**Český metrologický institut**

Okružní 31, 638 00 Brno

tel. +420 545 555 111

www.cmi.cz

**Pracoviště:** Oblastní inspektorát Praha, Radiová 1136/3, 102 00 Praha 10  
Oddělení primární metrologie elektrické impedance a elektrických veličin,  
tel.: +420 266 020 161 (116), fax: +420 266 020 169

## KALIBRAČNÍ LIST

1011-KL-70010-21

**Datum vystavení:** 17. 2. 2021

List 1 ze 2 listů

**Zákazník:** NDT1 KRAFT, s.r.o.  
Nademlejská 600/1  
198 00 Praha

**Měřidlo:** Defektoskop + VN dělič

**Výrobce:** NDT1 KRAFT, s.r.o.

**Typ:** K2.1 + neuvedeno

**Výrobní číslo:** 4423 2020 + neuvedeno

Výsledky kalibrace byly získány za podmínek a s použitím postupů uvedených v tomto kalibračním listě a vztahují se pouze k době a místu provedení kalibrace.

**Datum kalibrace:** 17. 2. 2021

**Kalibraci provedl:**

**Vedoucí oddělení:**

  
Jan Maleček



  
Ing. Jiří Zikán



## KALIBRAČNÍ LIST

1011-KL-70010-21

List 2 ze 2 listů

**Metrologická návaznost:**

Měření jsou metrologicky návazná na (mezi)národní etalony.

název etalonu	v.č.	kalibroval	č. kalibračního listu
Osciloskop HP 54600A	3227A07770	ČMI OI Praha	1011-KL-50006-20

**Kalibrační postup:**

Kalibrovaný defektoskop K2.1 byl připojen na vstup VN děliče. Napětí bylo nastavováno na defektoskopu K2.1. Výstupní napětí z děliče bylo měřeno referenčním osciloskopem HP 54600 A. Byla odečítána maximální vrcholová hodnota generovaného napětí.

Přístroj nebyl dostavován.

**Místo kalibrace:**

ČMI OI Praha, Radiová 1136/3, 102 00 Praha 10

**Podmínky prostředí:**

teplota vzduchu:  $(23,0 \pm 1,2) ^\circ\text{C}$

relativní vlhkost vzduchu:  $(25 \pm 1,5) \%$

**Výsledky kalibrace:**

Nastavená amplituda napětí (kV)	Referenční vrcholové napětí (kV)
5,0	4,372
10,0	9,512
15,0	14,422

Rozšířená nejistota měření je 2,1 % z referenční hodnoty.

**Defektoskop a VN dělič** byl opatřen identifikačním štítkem s číslem tohoto kalibračního listu a datem kalibrace.

*„Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA-4/02 M:2013. Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu  $k$ , který odpovídá pravděpodobnosti pokrytí přibližně 95 %, což pro normální rozdělení odpovídá koeficientu rozšíření  $k = 2$ “.*

Konec kalibračního listu.

**Český metrologický institut**  
 Oblastní inspektorát Praha  
 Radiová 3  
 102 00 Praha  
 -4-



**Český metrologický institut**

Okružní 31, 638 00 Brno  
tel. +420 545 555 111  
www.cmi.cz

**Laboratory:** Regional Inspectorate Prague, Radiová 1136/3, 102 00 Prague 10  
Department of primary metrology of electrical impedance and electrical quantities  
tel. +420 266 020 161, fax. +420 266 020 169

## CERTIFICATE OF CALIBRATION

**1011-KL-70059-20**

**Date of issue:** 12. 10. 2020

Page 1 of 2

**Customer:** NDTI KRAFT, s.r.o.  
Nademlejská 600/1  
198 00 Praha

**Measuring instrument:** Defectoscope + HV divider

**Manufacturer:** NDTI KRAFT

**Type:** K1.1 + not specified

**Serial number:** 3115 2013 + not specified

The results of the calibration have been obtained following the procedures reported in this Certificate and are related only to the date, place and conditions of the calibration.


**Date of calibration:** 6. 10. 2020

**Calibrated by:**

**Director of Regional Inspectorate:**

  
Jan Maleček



  
Ing. Vladimír Peršl

## CERTIFICATE OF CALIBRATION

1011-KL-70059-20

Page 2 of 2

**Metrological traceability:**

Measurement are traceable to (inter)national standards.

Standard	S. N.	Calibrated by	Calibration Certificate
Oscilloscope HP 54600A	3227A07770	ČMI OI Praha	1011-KL-50006-20

**Calibration procedure:**

The calibrated defectoscope KI.1 was connected to the input of the HV divider. The voltage was set on the defectoscope KI.1. The output voltage from the divider was measured with the reference oscilloscope HP 54600 A. The maximum peak value of the generated voltage was read.

Instrument was not adjusted.

**Place of calibration:**

CMI Regional Inspectorate Prague, Radiová 1136/3, 102 00 Prague 10

**Ambient conditions:**Air temperature:  $(23,0 \pm 1,2) ^\circ\text{C}$ Relative humidity:  $(40 \pm 15) \%$ **Results of calibration:**

Set voltage amplitude (kV)	Reference peak voltage (kV)
1,0	1,075
2,5	2,750
5,0	5,25
7,0	7,25

The expanded measurement uncertainty is 2,1 % of the reference value.

The standard uncertainty of measurement has been determined in accordance with EA-4/02 M:2013 document. The reported expanded uncertainty of measurement is stated as the standard uncertainty of measurement multiplied by the coverage factor  $k$  corresponding to a coverage probability of approximately 95 %, which for normal distribution corresponds to a coverage factor  $k = 2$ .

End of calibration certificate.

Český metrologický institut  
 Oblastní inspektorát Praha  
 Radiová 3  
 102 00 Praha

-4-