

Институт ЭНИН

Направление подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Кафедра ЭС

МАГИСТЕРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Обнаружение латентных дефектов в тонкопленочных покрытиях с помощью короны УДК 621.793.1:539.216.1:620.19

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM5A	Лусс Артём Андреевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор кафедры Электроэнергетических систем	Лавринович В.А.	д.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Высоковольтные испытательные установки и измерения»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор кафедры Электроэнергетических систем	Лавринович В.А.	д.т.н.		

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент кафедры Менеджмента	Грахова Е.А.			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры Экологии и безопасности жизнедеятельности	Дашковский А.Г.	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. Кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Электроэнергетические системы	Сулайманов А.О	к.т.н.		

Томск – 2017 г.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
Профессиональные компетенции	
Р1	Применять соответствующие гуманитарные, социально-экономические, математические, естественно-научные и инженерные знания, компьютерные технологии для решения задач расчета и анализа электрических устройств, объектов и систем.
Р2	Уметь формулировать задачи в области электроэнергетики и электротехники, анализировать и решать их с использованием всех требуемых и доступных ресурсов.
Р3	Уметь проектировать электроэнергетические и электротехнические системы и их компоненты.
Р4	Уметь планировать и проводить необходимые экспериментальные исследования, связанные с определением параметров, характеристик и состояния электрооборудования, объектов и систем электроэнергетики и электротехники, интерпретировать данные и делать выводы.
Р5	Применять современные методы и инструменты практической инженерной деятельности при решении задач в области электроэнергетики и электротехники.
Р6	Иметь практические знания принципов и технологий электроэнергетической и электротехнической отраслей, связанных с особенностью проблем, объектов и видов профессиональной деятельности профиля подготовки на предприятиях и в организациях – потенциальных работодателях.
Универсальные компетенции	
Р7	Использовать знания в области менеджмента для управления комплексной инженерной деятельностью в области электроэнергетики и электротехники
Р8	Использовать навыки устной, письменной речи, в том числе на иностранном языке, компьютерные технологии для коммуникации, презентации, составления отчетов и обмена технической информацией в областях электроэнергетики и электротехники.
Р9	Эффективно работать индивидуально и в качестве члена или лидера команды, том числе междисциплинарной, в области электроэнергетики и электротехники
Р10	Проявлять личную ответственность и приверженность нормам профессиональной этики и нормам ведения комплексной инженерной деятельности.
Р11	Осуществлять комплексную инженерную деятельность в области электроэнергетики и электротехники с учетом правовых и культурных аспектов вопросов охраны здоровья и безопасности жизнедеятельности.
Р12	Быть заинтересованным в непрерывном обучении и совершенствовании своих знаний и качеств в области электроэнергетики и электротехники.

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт ЭНИН
Направление подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
Кафедра Электроэнергетических систем (ЭЭС)

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. кафедрой

_____ А.О. Сулайманов
(Подпись) (Дата)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
5AM5A	Лусс Артём Андреевич

Тема работы:

Обнаружение латентных дефектов в тонкопленочных покрытиях с помощью короны	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	03.02.2017, №593/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:

	13.06.2017
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе.	Вакуумная камера объемом 70 л с возможностью откачки до давления 10^{-3} Па, тонкие диэлектрические пленки с явно невидимыми дефектами, источник высокого напряжения до $U=1$ кВ, измерительная аппаратура (микроамперметры, ампервольтметр), высоковольтные вентили.
Перечень вопросов подлежащих исследованию, проектированию и разработке.	<ol style="list-style-type: none">1. На основе анализа литературных данных определить методы поиска латентных дефектов в лаковых покрытиях печатных плат и в тонких диэлектрических пленках, выбрать метод пригодный для реализации в лабораторных условиях.2. На основе анализа литературных данных разработать методику поиска латентных дефектов в тонких пленках и тонких диэлектрических покрытиях доступную для реализации в лабораторных условиях.

	<p>Спроектировать и изготовить установку для поиска латентных дефектов в диэлектрических покрытиях и тонких пленках:</p> <p>1.1. Напряжение источника $U_{ист}=0\div 1$ кВ</p> <p>1.2. Ток разряда $I_{разр}=0\div 150$ мкА</p> <p>1.3. Габариты рабочей зоны вакуумной камеры длина-ширина-высота: 20x20x20 см³.</p> <p>3. Провести эксперименты для установления конкретных параметров, которые необходимо обеспечить для нахождения сквозных отверстий в тонких диэлектрических пленках органического происхождения.</p> <p>4. В разделе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» провести технико-экономическое обоснование исследовательской работы.</p> <p>5. В разделе «Социальная ответственность» рассмотреть проблемы обеспечения безопасности жизнедеятельности.</p>
Перечень графического материала.	Презентация выполненной работы в формате ppt.

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

Раздел	Консультант
Высоковольтные испытательные установки измерения	Лавринович В.А., д.т.н., профессор кафедры электроэнергетических систем
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Грахова Е.А., ассистент кафедры Менеджмента
Социальная ответственность	Дашковский А.Г., к.т.н., доцент кафедры Экологии и безопасности жизнедеятельности

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:

Анализ литературных данных по методам и способам обнаружения дефектов в тонких пленках
--

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор кафедры Электроэнергетических систем	Лавринович В.А.	д.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM5A	Лусс Артём Андреевич		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа		ФИО	
5AM5A		Лусс Артём Андреевич	
Институт	ЭНИН	Кафедра	ЭЭС
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Электроэнергетика и электротехника
Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность ресурсосбережение»:			
1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>		- Стоимость материальных ресурсов - определялась по средней стоимости по г. Томску - Оклады в соответствии с окладами сотрудников НИ ТПУ	
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>		- 30 % премии; - 20 % надбавки; - 16% накладные расходы; - 30% районный коэффициент;	
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>		-27,1% отчисления на социальные нужды.	
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:			
1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурс эффективности и ресурсосбережения</i>		- оценка эффективности научного исследования сильных и слабых сторон в случае организации МИП (SWOT- анализ);	
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>		Формирование плана и графика разработки: -определение структуры работ; - определение трудоемкости работ; - разработка графика Ганта. Формирование бюджета затрат НИ: - материальные затраты; -заработная плата (основная и дополнительная); - отчисления на социальные цели; - накладные расходы.	
3. <i>Оценка перспектив внедрения технологии (установки)</i>		Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта	
Перечень графического материала:			
1. SWOT анализ 2. График Ганта 3. Календарный план-график 4. Бюджет НИ 5. <i>Определение ресурсосберегающей и экономической эффективности исследования</i>			
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику			

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент кафедры Менеджмента	Грахова Е.А.			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM5A	Лусс Артём Андреевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА

«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Тема работы: Отыскание латентных дефектов диэлектрических пленок.

Студенту:

Группа	ФИО
5AM5A	Лусс Артём Андреевич

Институт	ЭНИН	Кафедра	ЭЭС
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	Высоковольтная электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. <i>Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения</i></p>	<p>Рабочее место располагается в отдельном помещении закрытого типа с естественной вентиляцией воздуха, где находится электроустановка.</p>
<p>2. <i>Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> – Федеральный закон "О специальной оценке условий труда" от 28.12.2013 N 426-ФЗ. – Федеральный закон "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности" от 22.07.2008 N 123-ФЗ

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>3. <i>Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> – Микроклимат помещения; – Уровень шума; – Нормы электромагнитного излучения; – Освещенность помещения
<p>4. <i>Охрана окружающей среды:</i></p>	<p>Компоненты компьютера, оказывающие вредное влияние на организм человека и окружающую среду (отходы, выбросы)</p>
<p>5. <i>Защита в чрезвычайных ситуациях:</i></p>	<p>Самым распространенным фактором, который может привести к ЧС является пожар.</p>
<p>6. <i>Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – <i>специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</i> – <i>организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны</i> 	<ul style="list-style-type: none"> – Типовая инструкция для охраны труда для электромонтёра. – Социальное страхование работника

Перечень графического материала:

<p><i>При необходимости представить эскизные графические материалы к расчётному заданию (обязательно для специалистов и магистров)</i></p>	
--	--

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры Экологии и безопасности жизнедеятельности	Дашковский А.Г.	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM5A	Лусс А.А.		

Министерство образования и науки Российской Федерации
 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
 высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт ЭНИН

Направление подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Уровень образования магистр

Кафедра Электроэнергетических систем (ЭЭС)

Период выполнения осенний 2016– весенний семестр 2017 учебного года

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	13.06.2017
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
20.02.2017 г.	Выбор направления исследований	3
15.03.2017 г.	Литературный обзор	3
26.04.2017 г.	Проектирование прототипа установки	4
26.05.2017 г.	Сборка прототипа установки	4
30.05.2017 г.	Проведение экспериментов	4
20.05.2017 г.	Обработка и оценка экспериментальных данных	8
22.05.2017 г.	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность ресурсосбережение	4
30.05.2017 г.	Социальная ответственность	5
28.05.2017 г.	Оформление работы	5
29.05.2017 г.	Итог	40

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор кафедры Электроэнергетических систем	Лавринович В.А.	д.т.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Зав. Кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Электроэнергетические системы	Сулайманов А.О.	к.т.н.		

Реферат

Выпускная квалификационная работа объемом 143 страниц, 39 рисунков, 15 таблиц, 31 источник.

Ключевые слова: ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПЛЕНКА, ТОНКОПЛЕНОЧНОЕ ПОКРЫТИЕ, КОРОННЫЙ РАЗРЯД, ТЛЕЮЩИЙ РАЗРЯД, ЛАТЕНТНЫЙ ДЕФЕКТ, СКВОЗНОЕ ОТВЕРСТИЕ, ОБРАТНАЯ КОРОНА, ИСКРОВОЙ ПРОБОЙ.

Объектом исследования являются латентные дефекты в тонких диэлектрических пленках.

Цель работы – исследование возможности выявления латентных дефектов в диэлектрических пленках воздействием электрического поля.

В процессе работы на основе проведенного обзора литературы была разработана методика определения скрытых сквозных отверстий в тонких диэлектрических пленках, под эту методику разработана и создана экспериментальная установка. На установке были проведены экспериментальные исследования по возможности обнаружения латентных дефектов в виде сквозных отверстий в тонких диэлектрических пленках воздействием электрическим полем. Установлены параметры конфигурации межэлектродного промежутка, расстояния между электродами, остаточного давления газа в рабочем объеме, прикладываемого напряжения и диапазона протекающего через промежуток тока при наличии дефекта и без дефекта.

Результатом проделанной работы являются определенные экспериментально режимы, при которых с большой степенью достоверности в тонких диэлектрических пленках обнаруживаются сквозные дефекты воздействием электрическим полем.

Сконструирована установка, которая работает в диапазоне напряжений 0...1 кВ, токов 0...150 мкА.

Конструктивные решения, заложенные в установку, и найденные режимы работы установки могут лечь в основу разработки макета установки для обнаружения латентных дефектов воздействием электрического поля в испытательных лабораториях производственных предприятий.

Внедрение спроектированной установки в производство позволит сократить число бракованных изделий, причиной выхода из строя которых является наличие дефектов в диэлектрических покрытиях.

В процессе работы использовались современные программные продукты Microsoft Word, Excel, T-flex.

Оглавление

Введение.....	16
1 Анализ литературных данных по методам и способам обнаружения дефектов в тонких пленках	20
1.1 Проблема отыскания дефектов в тонких пленках	20
1.2. Существующие методы решения проблемы	21
1.3 Предлагаемый метод решения проблемы.....	24
1.4 Виды дефектов.....	25
1.5 Общие сведения о разрядах в газе	26
1.5.1 Сведения о тлеющем разряде.....	29
1.5.2 Сведения о коронном разряде.....	30
1.5.3 Конфигурация электрического поля	31
1.5.4 Атмосферные воздействия	33
1.5.5 Эффект полярности.....	35
1.5.6 Пробой твердой изоляции	37
1.6 Методы и устройства для измерения высоких напряжения	40
1.7 Выводы из литературного обзора.....	40
2 Разработка методики и прототипа установки для проведения экспериментов по выявлению дефектов в тонких пленках воздействием электрического поля	42
2.1 Разработка методики проведения экспериментов	42
2.1.1 Метод испытания	42
2.1.2 Метод регистрации.....	43
2.1.3 Проведение экспериментов.....	43

2.2	Разработка прототипа установки.....	45
2.2.1	Блок-схема установки	45
2.2.2	Электрическая схема установки	46
2.2.3	Конструирование установки.....	47
2.2.4	Полярность короны.....	51
2.2.5	Описание прототипа установки для исследования режимов обнаружения латентных дефектов воздействием электрического поля	51
2.3	Сборка установки	57
2.4	Результаты проведения экспериментов	60
2.4.1	Поиск минимального напряжения зажигания короны.....	60
2.4.2	Поиск дефектов в диэлектрических пленках	64
2.4.3	Определение зависимости ВАХ от расстояния в межэлектродном промежутке.....	66
2.4.4	Определение зависимости ВАХ от изменения расстояния между осями острия и дефекта	69
2.4.5	Экспериментальное выявление различий между отрицательной и положительной короны.	73
2.4.6	Опыт по определению возможности поиска более одного дефекта.....	74
2.4.7	Последствия проведения экспериментов.....	76
2.4.8	Выводы по результатам эксперимента	80
3	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	81
3.1	Экспертная оценка поставщиков.....	81
3.1.1	Структура работ в рамках проектирования.....	82
3.1.2	Определение трудоемкости выполнения работ	84

3.1.3 Разработка графика проведения работ.....	85
3.2 Формирование бюджета затрат. Расчет затрат.....	88
3.2.1 Расчет материальных затрат.....	88
3.2.2 Заработная плата исполнителей.....	90
3.2.3 Отчисления во внебюджетные фонды	93
3.2.4 Накладные расходы.....	93
3.2.5 Формирование затрат научно-исследовательского проекта.....	94
3.2.6 Определение ресурсной эффективности исследования	94
4 Социальная ответственность.....	99
4.1 Описание рабочего места	100
4.1.1 Описание рабочей зоны, технологического процесса.....	100
4.1.2. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды	102
4.2 Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме.....	109
4.3 Правила по охране труда и окружающей среды при эксплуатации установки и ПК.....	110
4.4 Защита в чрезвычайных ситуациях	111
4.5 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	112
Заключение	115
Список использованных источников	117
Приложение А	121

Введение

Актуальность темы исследования. Явление коронного разряда известно достаточно давно. Существует множество практического и теоретического материала, объясняющего природу и свойства короны. Эти свойства позволяют создавать электрофилтры, медицинское оборудование, покрасочные установки. Одним из свойств коронного разряда является обратная корона. Нами выдвинуто предположение о возможности отыскания латентных дефектов лаковых покрытиях печатных плат и трудно различимых сквозных отверстий в тонких диэлектрических пленках, основываясь на свойстве коронного разряда образовывать обратную корону, которая может быть зарегистрирована визуально или посредством фотосъемки.

Пленочные конденсаторы являются одной из важнейших частей пассивной элементной базы любого электронного устройства. Одним из лучших решений применения данных конденсаторов стало применение их при наличии высокочастотных импульсных токов. Область их применения обширна [1].

Наиболее важным свойством конденсатора является его срок службы. Все конденсаторы проходят тщательную проверку перед вводом их в эксплуатацию. ГОСТ 28885-90 распространяется на конденсаторы, предназначенные для применения в электронной аппаратуре, и устанавливает общие требования к методам измерения электрических параметров конденсаторов, к методам их испытаний, требованиям к конструкции, используемым в стандартах или технических условиях на конденсаторы конкретных типов. Данный стандарт содержит 21 вид испытания конденсаторов [2].

Несмотря на существующие требования и технические регламенты, конденсаторы выходят из строя. Одной из основных причин выхода из строя являются дефекты в пленочной изоляции.

Предлагаемый нами метод, в случае успешных испытаний, позволит выявлять сквозные и латентные дефекты в конденсаторных пленках, что в свою очередь должно привести к снижению числа конденсаторов, поступающих в эксплуатацию со скрытыми дефектами.

Степень разработанности темы диссертации. Работа основана на трудах ученых, работавших в области газовой электроники (В.Л. Грановский, Г.С. Солнцев) и трудах ученых, работающих в области создания технологического вакуумного оборудования (Л.В. Кожитов, Н.А. Чиченев). На протяжении последних лет над решением проблем обнаружения латентных дефектов работали студенты НИ ТПУ (А.А. Меженский, Т.Р. Рахимов).

Цель и задачи. Целью данной работы является определение возможности поиска сквозных и латентных дефектов диэлектрических пленок методом воздействия высоковольтным электрическим полем.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие **задачи:**

- 1) выполнить анализ литературы по методам и способам обнаружения дефектов в тонких диэлектрических покрытиях, наносимых на металлическую подложку;
- 2) разработать методику эксперимента для проведения исследований по обнаружению сквозных латентных дефектов в диэлектрических пленках;
- 3) спроектировать установку для создания и регистрации контролируемого воздействия электрическим полем;
- 4) провести эксперименты по определению возможности обнаружения дефектов различного типа в тонкопленочных покрытиях; определить диапазон параметров по форме электродов, расстоянию между электродами, давлению газа, прикладываемому напряжению и регистрируемому току, позволяющих объективно определять сквозные отверстия в тонких диэлектрических пленках.

5) провести анализ полученных результатов и дать рекомендации по созданию установки для определения сквозных отверстий в тонких лакокрасочных покрытиях электронной аппаратуры.

Научная новизна диссертационной работы заключается в разработанном методе обнаружения в условиях вакуума сквозных латентных дефектов в тонкопленочных покрытиях.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем:

- разработан опытный образец установки, которая позволяет обнаружить сквозной латентный дефект в испытуемом объекте;
- определено оптимальное значение давления, при котором обеспечивается минимальное напряжение зажигания разряда;
- получены значения радиуса обнаружения сквозных латентных дефектов в тонкопленочных покрытиях;
- проведен сопоставительный анализ влияния полярности на изменение вольт-амперной характеристики разряда;
- определены последствия воздействий коронного разряда на испытуемые образцы.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных в работе задач были применены экспериментальные методы получения первичной информации об объекте исследования использованы вычислительные эксперименты, методы обработки результатов с помощью Microsoft office Excel. В качестве теоретической базы для исследования использованы научные труды о формировании разрядов в вакууме.

Положение, выносимое на защиту: разработан метод обнаружения в условиях вакуума сквозных латентных дефектов в тонкопленочных покрытиях.

Степень достоверности результатов и обоснованность выводов обеспечиваются корректной постановкой, решаемых в диссертационной работе,

задач; непротиворечивостью полученных результатов и их соответствием теоретическим данным; использованием отработанных методов измерения давления в диапазоне амплитуд от 2×10^{-2} торр до десятков торр, измерения напряжения в диапазоне амплитуд от 20 вольт до 1000 вольт, и измерения токов в диапазоне амплитуд от 5 микроампер до 200 микроампер. Для измерения всех величин использованы современные приборы и устройства.

1 Анализ литературных данных по методам и способам обнаружения дефектов в тонких пленках

1.1 Проблема отыскания дефектов в тонких пленках

Конденсаторы с твёрдым органическим диэлектриком бывают бумажные, металобумажные, плёночные, комбинированные – бумажноплёночные, тонкослойные из органических синтетических пленок.

Среди плёночных конденсаторов есть: полиэтилентерефталатные конденсаторы, полиамидные конденсаторы, каптоновые конденсаторы, поликарбонатные конденсаторы, полисульфоновые конденсаторы, полипропиленовые конденсаторы, полистирольные конденсаторы, фторопластовые конденсаторы, металлизированные полиэтилентерефталатные и поликарбонатные конденсаторы. Название типа конденсатора указывает на тип диэлектрика плёнки, которая используется в конденсаторе. Как правило, эти пленки представляют собой высокомолекулярные синтетические соединения. Благодаря их свойствам можно получать конденсаторы с малыми габаритами.

Плёночные конденсаторы являются одной из важнейшей части пассивной элементной базы любого электронного устройства. Одним из лучших решений применения данных конденсаторов стало применение их при наличии высокочастотных импульсных токов. Область их применения обширна.

Особенностями плёночных конденсаторов являются:

- 1) способность к самовосстановлению;
- 2) высокая тепловая стабильность;
- 3) высокая стабильность ключевых электрических параметров при изменении приложенного напряжения;

4) низкое эквивалентное последовательное сопротивление (ESR) и высокая нагрузочная способность по переменному току (за счет чего уменьшается самонагрев во время работы);

5) механические и электрические параметры конденсаторов серий МКТ и МКР удовлетворяют требованиям отраслевых стандартов IEC 60384-2, IEC 60384-16 и IEC 60384-14.

На данный момент существует такая проблема, как выход из строя пленочных конденсаторов. Как правило, пленочные конденсаторы в своей эксплуатации очень надежны, но зачастую случаются и поломки. Одна из проблем, из-за которых выходят из строя конденсаторы с пленочной изоляцией – это пробой пленки [1].

На сегодняшний день одним из методов контроля является метод контроля толщины данного материала. Однако данный метод контроля не проверяет сплошность пленки [3].

На конденсаторной пленке могут быть трещины, отверстия, как малых, так и больших размеров различных форм, также возможны и уменьшение толщины пленки, что тоже влияет на электрическую прочность пленки.

Другая причина выхода из строя пленочных конденсаторов – наличие пузырьков между слоями пленки, которые возникают при намотке конденсаторных секций.

Все выше перечисленные проблемы, приводят со временем к пробоем конденсатора и выходу его из строя.

1.2. Существующие методы решения проблемы

1) Метод PASD – для диагностики изоляции кабельных линий. PASD работает на низком напряжении, концепции гашения дуги и методами рефлектометров (Time Domain Reflectometer – TDR), для получения четкого

отклика на дефектном участке. Данный метод разработан для диагностики кабельных линий бортовой аппаратуры.

Техника PASD работает на высоких напряжениях (несколько киловольт), с низкой энергией (несколько мДж) в коротких импульсах, которые приводят к возникновению искрового разряда на месте дефекта изоляции.

Падение сопротивления, которое происходит в течение нескольких наносекунд, влечет за собой мгновенное короткое замыкание, которое отражает энергию обратно в датчики в точке замера. Техника PASD осуществляется прямым контролем электрической прочности изоляции. Напряжение на PASD имеет низкую величину, поэтому оно безопасно для изоляции, только дефекты на жиле подвергаются воздействиям.

Данный метод эффективен для кабельной техники, но для диагностики диэлектрического покрытия печатных плат исследований не проводилось. Также данный метод требует наличия базы данных эталонных образцов. Можно предположить, что он не будет эффективен в представленном виде для диагностики поверхности печатных плат [2].

2) Способ контроля сплошности покрытия из диэлектрических материалов на металлической подложке, заключающийся в воздействии на объект контроля высокочастотным высоковольтным электрическим полем и фиксации пробоя в дефектных местах, отличающийся тем, что контроль осуществляют локально в среде газа, обладающего высокой ионной проводимостью и проникающей способностью, посредством полого электрода-щупа, обеспечивающего локальный обдув поверхности покрытия.

Проникая в сквозное дефектное место, газ способствует электрическому пробую между металлическим основанием и электродом-щупом, тем самым определяется сквозной дефект (течь) покрытия. Технический результат: нахождение сквозных дефектов размером от 0,01 мм на диэлектрических покрытиях толщиной до 10 мм

Данный метод осуществляется при напряжении от 5 до 20 кВ, регистрация дефекта происходит по факту искрового пробоя, способен обнаруживать лишь сквозные отверстия [3].

Вышеизложенные методы позволяют находить дефекты в покрытиях так называемым “искровым методом”, однако у них есть существенный недостаток – это искра, которая во многих случаях недопустима и может повредить испытуемый образец, в частности диэлектрические поверхности. Методы, которые пытаются применить в этой области, исключая повреждение объекта, не имеют достаточной разрешающей способности по месторасположению дефекта и ограничены по возможности обнаружения отверстий размером менее 0,3 мм.

3) В работах [4-6] приводятся данные о нахождении несплошности диэлектрических покрытий и их моделировании с помощью коронного разряда, переходящего в искровой разряд. Существенный недостаток этой установки заключается в том, что коронирующий электрод соприкасается с диагностируемой диэлектрической поверхностью и в случае приближения к несплошности покрытия происходит искровой пробой между коронирующим электродом и заземленной металлической подложкой. Возникающий при этом ток разряда приводит к разрушению диэлектрического покрытия и вызывает эрозию металлической подложки [4-6].

Для отдельных видов оборудования, например, для радиоэлектронной техники, такие воздействия могут приводить к выходу из строя не только элементов изоляции, но и элементов РЭА, поэтому в этой отрасли поиск дефектов таким методом не приемлем. Например, дефектоскоп "Корона 2.2" позволяет выявлять несплошности диэлектрических покрытий за счет искрового пробоя между электродом-щупом и металлической подложкой. Электроискровой принцип контроля сплошности диэлектрических покрытий

также реализован в ряде запатентованных установок [7]. К недостаткам электроискрового метода можно отнести:

- 1) контакт щупа с поверхностью тестируемого диэлектрического покрытия;
- 2) регистрация дефекта по факту пробоя;
- 3) невозможность обнаружения латентные дефектов без разрушения покрытия;
- 4) высокое напряжение на щупе (от 20 кВ и выше);
- 5) большие токи в случае пробоя – от сотен микроампер до единиц миллиампер, приводящие к значительной эрозии дефектного места и невозможности восстановления работоспособности поврежденной печатной платы.

При практической эксплуатации это делает невозможным применение данного метода и установки, основанной на этом же принципе, в качестве дефектоскопа для тонких пленок и печатных плат, изоляционных покрытий обмоток двигателей и трансформаторов.

1.3 Предлагаемый метод решения проблемы

Одним из способов решения данной проблемы является метод, основанный на применении контролируемого коронного разряда. Данный метод позволяет без контакта с поверхностью диагностировать однородность диэлектрических покрытий, а также выявлять различные дефекты. Метод можно отнести к методам неразрушающего контроля.

К достоинствам метода неразрушающего контроля (МНК) можно отнести:

- 1) дешевизна;
- 2) незначительные затраты времени;
- 3) высокая надежность;

4) возможность автоматизации и механизации процесса.

1.4 Виды дефектов

Дефекты, которые могут встречаться в тонких диэлектрических покрытиях, можно представить следующим образом (рисунок 1): 1 – сквозные дефекты, 2 – газовые включения, 3 – твердотельные включения инородных материалов, которыми могут быть диэлектрики с большим значением диэлектрической проницаемости, чем диэлектрическое покрытие, или металлические включения (например, металлическая стружка), 4 – зоны уменьшенной толщиной покрытия, 5 – отслоение и расслоение. Все вышеупомянутые дефекты, за исключением 1-го являются латентными и выявление их представляется нетривиальной задачей.

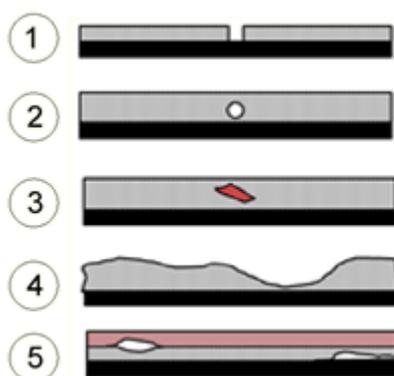


Рисунок 1 – Виды дефектов

Применение контролируемого коронного разряда в качестве диагностического инструмента, по нашему мнению, позволит исключить перечисленные выше недостатки электроискрового метода: исключить контакт щупа с диэлектрической поверхностью, исключить искровой пробой, обнаруживать латентные дефекты, снизить до единиц киловольт напряжение на электроде-щупе, снизить токи, протекающие в цепи при диагностировании до

нескольких микроампер. Также отметим, что диэлектрическое покрытие выступает в качестве барьера при наличии латентных дефектов, это приведет к регистрации импульсного тока еще до появления чехла короны [8].

1.5 Общие сведения о разрядах в газе

Зависимость электрического тока, протекающего в газовом разряде от напряжения, называется вольт-амперной характеристикой разряда. В качестве примера на рисунке 2 приведена статическая вольт-амперная характеристика самостоятельного газового разряда при низком давлении (~100 Па), на котором можно выделить зоны, соответствующие основным видам разряда темного, тлеющего, дугового.

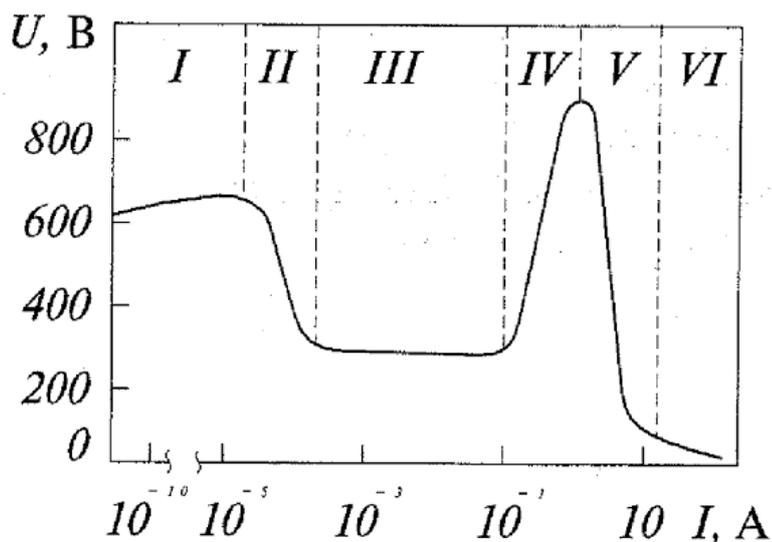


Рисунок 2 – Статическая вольт-амперная характеристика самостоятельного газового разряда низкого давления

После того как разность потенциалов на электродах достигает напряжения пробоя $U_{пр}$, плотность электрического тока стремительно увеличивается, причем его величина ограничена характеристикой источника питания и сопротивлением внешней электрической цепи. Величина

напряжения пробоя $U_{пр}$ обычно составляет несколько сот вольт и зависит от природы и давления газа, расстояния между электродами, их геометрии и материала. На вольт-амперной характеристике участок между зоной насыщения и точкой пробоя соответствует таунсендовскому разряду, который характеризуется малой силой тока (менее 1 мкА). При напряжениях, близких к пробую, около анода наблюдается слабое свечение.

При низких давлениях наблюдается тлеющий газовый разряд (рис. 3), который состоит из четырех основных областей: *I* – катодное темное пространство, *II* – отрицательное (тлеющее) свечение, *III* – фарадеево темное пространство, *IV* – положительный столб разряда. Области *I-III* образуют катодную часть разряда, *IV* – анодную. Вблизи катода происходит резкое падение потенциала, обусловленное большой концентрацией положительных ионов на границе *I* и *II*. Ускоренные в области *I* электроны производят интенсивную ударную ионизацию в области *II*, что приводит к тлеющему свечению в широком спектре длин волн за счет процесса рекомбинации электронов и ионов в нейтральные частицы. В положительном столбе (область *VI*) наблюдается большая постоянная концентрация электронов и положительных ионов (газоразрядная плазма), которая вызвана ударной ионизацией молекул газа электронами. Падение потенциала в этой области невелико и при прочих равных условиях возрастает при уменьшении диаметра газоразрядной трубки.

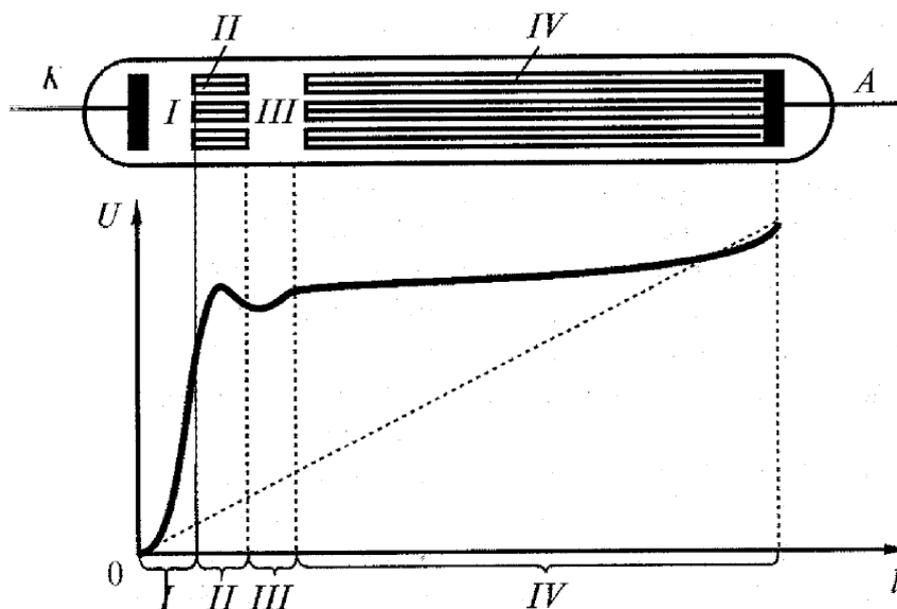


Рисунок 3 – области тлеющего газового разряда

Оптические свойства тлеющего разряда определяются излучением возбужденных атомов и молекул, что вызывает свечение положительного столба, которое обычно имеет характерную оптическую структуру, состоящую из чередующихся темных и светлых зон. Форма положительного столба соответствует форме газоразрядной трубки независимо от формы и расположения электродов. Область катодного пространства является основной областью тлеющего разряда, в которой происходят процессы объемной ионизации газов, необходимые для поддержания разряда. Длиной l_k катодного темного пространства (или толщиной катодного слоя) называется расстояние от катода до точки, которая соответствует максимуму или точке перегиба зависимости падения потенциала ΔU_k (катодного падения) по длине газоразрядной трубки. Если расстояние между электродами H меньше длины l_k , то тлеющий разряд не возникает; т.е. условие существования тлеющего разряда можно записать в виде $H \geq l_k$. Поэтому в достаточно широких сосудах или очень коротких трубках светящийся положительный столб не образуется.

1.5.1 Сведения о тлеющем разряде

Тлеющим разрядом называют самостоятельный газовый разряд с холодным катодом, в котором катодное падение потенциала значительно выше потенциала ионизации, и эмиссия электронов обусловлена бомбардировкой положительными ионами и возбужденными атомами. Тлеющий разряд существует главным образом, при пониженных давлениях (менее 6000 Па) и требует для своего поддержания не более 70 В; при малых давлениях или больших расстояниях между электродами напряжение может возрастать до нескольких киловольт. Различают два режима тлеющего разряда: нормальный, при котором плотность тока не зависит от его величины, и аномальный, при котором плотность тока возрастает при увеличении силы тока.

При нормальном тлеющем разряде поверхность катода, принимающая участие в образовании разряда и покрытая свечением (катодное опорное пятно) пропорциональна силе тока. Поэтому увеличение силы тока не сопровождается повышением плотности тока, протекающего через катод, поскольку при этом растет площадь катодного пятна. Толщина катодного слоя и падение катодного потенциала ΔU_k не меняются. В тоже время с увеличением разрядного тока падение потенциала в положительном столбе уменьшается, и поэтому вольтамперная характеристика нормального тлеющего разряда падающая, т.е. с увеличением тока разность потенциалов на электродах уменьшается. Величина ΔU_k не зависит от давления газа и при прочих равных условиях является постоянной для заданного сочетания «материал катода – газ».

При аномальном тлеющем разряде опорное пятно разряда занимает всю поверхность катода, и поэтому при увеличении силы тока повышается как плотность тока, так и падение потенциала. Увеличение пространственного заряда сопровождается уменьшением длины катодного темного пространства.

При дальнейшем увеличении электрического тока катод нагревается, т.е. перестает быть холодным, и в условиях высокой напряженности поля термоэлектронная эмиссия начинает преобладать над вторичной эмиссией. Это приводит к резкому падению напряжения, и разряд переходит в дуговой. Вольт-амперная характеристика аномального тлеющего разряда возрастающая, т.е. с увеличением тока разность потенциалов на электродах также растет. Аномальный тлеющий разряд используется при создании атомарных потоков вещества.

При повышении давления газов или паров в межэлектродном пространстве увеличивается плотность электрического тока и, следовательно, растет выделение мощности, что приводит к локальному нагреву материалов, десорбции газов, испарению и другим эффектам. В результате устойчивость тлеющего разряда падает, и для его поддержания приходится принимать специальные меры (охлаждение электродов, нанесение на поверхность катода полупроводниковых пленок и т.д.). Тлеющий разряд при высоком давлении можно стабилизировать с помощью сильно неоднородного электрического поля, например, путем применения электродов с малыми радиусами кривизны. Возникающий при этом газовый разряд называют коронным.

1.5.2 Сведения о коронном разряде

На сегодняшний день теоретическая и практическая наука накопила достаточно много сведений о коронном разряде, целесообразно рассмотреть факторы, влияющие на коронный разряд, такие как:

- 1) конфигурация электрического поля;
- 2) атмосферные воздействия;
- 3) эффект полярности.

1.5.3 Конфигурация электрического поля

Электрические поля условно делят на три вида: однородные, слабонеоднородные и резконеоднородные. От формы полей зависит пробивное напряжение, а также электрическая прочность. Примером однородного поля является поле между двумя бесконечными параллельными пластинами, слабонеоднородное поле реализуется в системе шар-шар при расстоянии между шарами меньше их радиуса, а резконеоднородное поле – в системе острие-плоскость.

Степень неоднородности электрических полей между электродами характеризуется коэффициентом неоднородности K_n , который равен отношению напряженностей E_{\max} и $E_{\text{ср}}$.

$$K_n = \frac{E_{\max}}{E_{\text{ср}}}$$

Максимальная напряженность зависит от конфигурации поля, размеров электродов, расстояния между ними и приложенного напряжения.

Для однородного поля коэффициент неоднородности $K_n = 1$, для слабонеоднородного – $K_n \leq 3$, а для резконеоднородного – $K_n > 3$.

Процессы разряда в любых резконеоднородных полях ($K_n > 3$) практически одинаковы. Самостоятельный разряд в лавинной форме может возникнуть при некотором начальном напряжении U_n (рис.4), т.к. напряженность в области стержня превышает напряженность E_n^* , которая соответствует возникновению самостоятельной форме разряда.

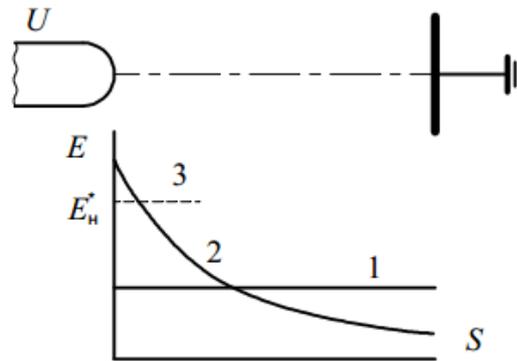


Рисунок 4 – Зависимость напряженности электрического поля от расстояния между электродами типа стержень-плоскость: 1 – $E_{cp} = f(S)$; 2 – $E_{max} = f(S)$; 3 - E_n^* – напряженность возникновения самостоятельной формы разряда

Если увеличить напряжение больше U_n , то количество электронов возрастет до значений $10^7 - 10^9$ и лавинный разряд переходит в плазменное состояние, что в свою очередь способствует возникновению стримера у электрода с повышенной напряженностью поля. В резконеоднородном поле в зависимости от напряжения стример может остановиться в межэлектродном промежутке. При этом плазма его распадется, но могут возникнуть и новые стримеры вблизи острия, которые впоследствии также останавливаются, и их плазма распадается.

Такой случай, когда стример не может достигнуть противоположного электрода, называется коронным разрядом в стримерной форме. При этом разряд является устойчивым, т. к. выполняется условие самостоятельности разряда.

При дальнейшем повышении напряжения стримерный разряд может перейти в канал, который продвигается от острия к противоположному электроду. В этом случае стримерный канал преобразуется в электрическую искру и тем самым произойдет завершение пробоя. В резконеоднородных

полях напряжение пробоя всегда больше напряжения возникновения коронного разряда в любой его форме [9].

1.5.4 Атмосферные воздействия

Развитие коронного разряда, а также пробивное напряжение зависит от давления, температуры, газа.

$$U_{np} = f(P \cdot S),$$

где P – давление воздуха;

S – расстояние между электродами.

Эту закономерность впервые экспериментально смог обнаружить Фридрих Пашен. Графическая закономерность представлена на рисунке 5.

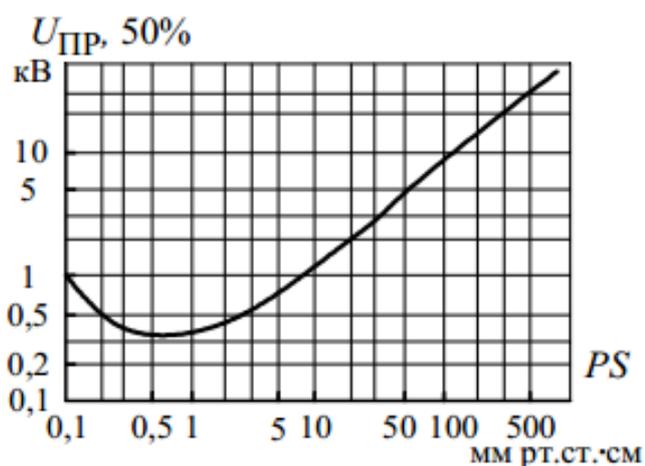


Рисунок 5 – Графическое отображение закона Пашена для воздуха

Вид этой зависимости можно объяснить следующим образом. При неизменном расстоянии увеличение давления больше значения, соответствующего минимуму кривой (рисунок 5), приводит к увеличению числа столкновений электронов с нейтральными атомами и молекулами и к уменьшению его энергии накапливаемой на длине свободного пробега. Отсюда следует, что для возникновения ударной ионизации необходимо увеличение

напряжения U_{np} . С другой стороны, при давлениях меньших, чем минимальное значение на кривой (рисунок 5), увеличивается длина свободного пробега и накапливаемая энергия электроном, но при этом уменьшается число столкновений, что в свою очередь уменьшает вероятность ударной ионизации. Для ее увеличения необходимо, чтобы как можно больше число столкновений заканчивалось ионизацией. Для этого необходимо увеличивать энергию электрона на длине свободного пробега, т.е. увеличивать U_{np} .

Закон Пашена справедлив при нормальной температуре. Изменение температуры действует обратно изменению давления.

Экспериментальная кривая Пашена отличается от расчетной, как в области очень малых значений PS , так и в области очень больших. При малых значениях PS объясняется приближением к вакуумному пробое. При вакуумном пробое основную роль играют процессы, которые происходят на поверхности электродов, а не в объеме газов. А при больших значениях PS отличие можно объяснить увеличением напряженности электрического поля на микровыступах электродов и увеличением вероятности возникновения лавин, что в свою очередь уменьшает U_{np} [10].

Как пример при давлении 1 мм рт. ст., расстояние между электродами для минимального напряжения пробоя составляет 5,7 мм. Напряжение, необходимое для появления дуги при этом расстоянии, равняется 327 вольт, что меньше напряжения при расстоянии больше и меньше 5,7 мм. При расстоянии 2,85 мм требуемое напряжение составляет 533 вольт, что почти в два раза больше. Если приложить напряжение в 500 В, то его будет недостаточно для получения электрической дуги при расстоянии 2,85 мм, однако подойдет для дистанции в 5,7 мм.

1.5.5 Эффект полярности

В слабонервномерном поле коронное и разрядное напряжение практически совпадают друг с другом и влияние полярности невелико. В сильнонервномерном поле при несимметричных электродах полярность вносит существенное влияние на величину разрядного напряжения.

При положительной полярности острия электроны движутся к острию в область сильного поля, совершая ударную ионизацию и образуя лавину электронов. Электроны лавины нейтрализуются на аноде, а положительные ионы создают объемный заряд, которое обладает своим собственным электрическим полем. Это поле в свою очередь ослабляет поле вблизи острия и усиливает его в остальной части промежутка (рисунок 6а). При достаточно высоком напряжении между электродами создается зародыш канала анодного стримера, который заполнен плазмой. Зажигается стримерный коронный разряд. В конечном счете, при прорастании стримера до катода, образуется пробой промежутка при малой величине разрядного промежутка.

При отрицательной полярности острия образуется большое число лавин из-за эмиссии электронов с катода и это приводит к ударной ионизации. На пути к катоду электроны теряют свою скорость, т.к. они захватывают нейтральные молекулы, становясь отрицательными ионами, рассеянными в пространстве. А положительные ионы лавины образуют объемный заряд у острия, который увеличивает напряженность у острия и уменьшает в остальной части промежутка (рисунок 6б). С увеличением поля происходит увеличение эмиссии электронов с поверхности катода и образуется у катода зародыш катодного стримера.

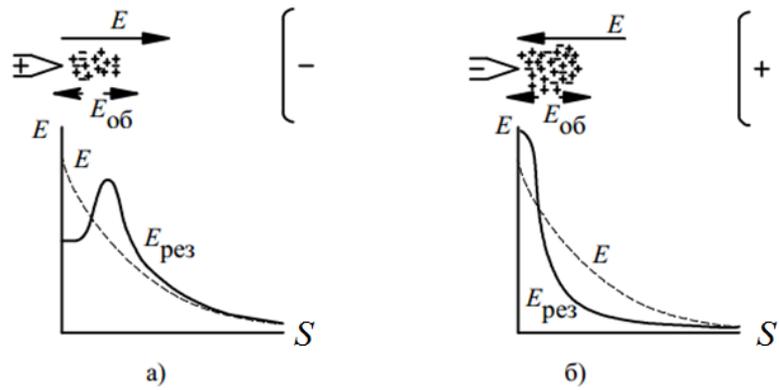


Рисунок 6 – Образование анодного (а) и катодного (б) стримера: E – напряженность внешнего поля; $E_{об}$ – напряженность поля объемного положительного заряда; $E_{рез}$ – результирующая напряженность в промежутке после ионизации

В силу рассмотренных выше особенностей стример с большими трудностями развивается при отрицательном острие, поэтому разрядное напряжение при отрицательной полярности острия больше, чем при положительной полярности в 2-2,5 раза.

На переменном напряжении пробой происходит всегда на положительной полярности.

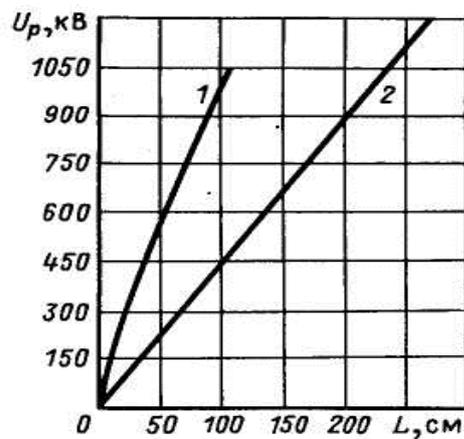


Рисунок 7 – Разрядные напряжения воздушных промежутков стержень – плоскость при отрицательной (1) и положительной (2) полярностях стержня (постоянное напряжение)

Исходя из этих известных фактов о влиянии полярности на значение разрядного напряжения в резконеоднородном поле было логично проводить эксперименты при отрицательной полярности острия, т.к. вероятность пробоя при положительной полярности и небольшом расстоянии межэлектродного промежутка выше, чем при отрицательной, однако, недостаточно изучена область низкого давления для положительной полярности острия в резконеоднородном поле. Было принято решение проектировать установку с возможностью смены полярности острия.

В основу проектируемой установки заложен принцип безыскрового поиска дефектов, что достигается приложением напряжения ниже пробивного.

1.5.6 Пробой твердой изоляции

Твердая изоляция имеет большую электрическую прочность чем газ и жидкость. Электрическая прочность твердой изоляции зависит от:

- 1) формы электрического поля;
- 2) полярности и вида напряжения;
- 3) длительности приложенного напряжения;
- 4) однородности диэлектрика;
- 5) электрофизических характеристик диэлектрика;
- 6) температуры.

Полипропиленовые конденсаторные пленки относятся к твердым изоляторам, поэтому необходимы знания по закономерностям пробоя твердых диэлектриков, и о их поведении в электрическом поле.

Следует рассмотреть три вида пробоя твердых диэлектриков:

- 1) электрический – $E > 10^2 \dots 10^3$ кВ/мм;
- 2) тепловой – $E \approx 10^2 \dots 10^3$ кВ/мм;
- 3) старение – $E < 10^2 \dots 10^3$ кВ/мм и менее.

Важной характеристикой твердой изоляции является ее вольт-временная характеристика. Она показывает зависимость пробивного напряжения от времени приложения напряжения. Она приведена на рисунке 8.

На данной характеристике выделяют 4 зоны. Область *I* и *II* соответствуют электрическому пробойю $t < 0,1$ с. Из-за запаздывания развития разряда относительно времени приложения напряжения в области *I* наблюдается резкое возрастание пробивного напряжения. Тепловые процессы играют преобладающую роль в области *III*, наблюдается резкий спад пробивного напряжения. В области *IV* происходит снижение пробивного напряжения. Это связано с медленными процессами старения, деградации твердой изоляции.

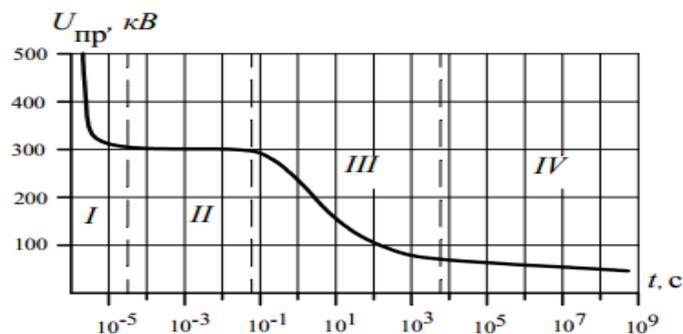


Рисунок 8 – Вольт-временная характеристика твердой изоляции: *I* – электрический пробой, запаздывание развития канала разряда; *II* – электрический пробой, $t < 0,1$ с, не зависит от температуры; *III* – тепловой пробой, $t > 0,1$ с, резкое снижение пробивного напряжения во времени; *IV* – старение, пробивное напряжение мало изменяется, а время до пробоя возрастает значительно

Электрическая прочность $E_{пр}$ твердой изоляции возрастает с уменьшением ее толщины и особенно быстро в области микронных толщин. Этот эффект используется в изоляции конденсаторов, кабелей, вводов и пр.

Влияние температуры показано на рисунке 9. На данном рисунке, на примере электротехнического фарфора показано, что при температуре до 75°C пробивная напряженность практически не изменяется (область А). Если дальше увеличивать температуру, то происходит резкое уменьшение $E_{пр}$ (область Б), что в свою очередь увеличивает вероятность пробоя твердого диэлектрика.

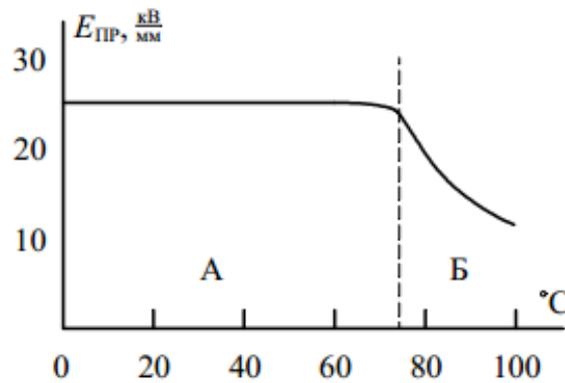


Рисунок 9 – Зависимость пробивного напряжения от температуры для фарфора (частота 50 Гц)

Развитие теплового пробоя твердого диэлектрика можно представить в следующей форме:

$$U_{\delta} \rightarrow I_{\delta} \rightarrow T_{\delta} \uparrow \gamma \text{ и } tg\delta \uparrow \rightarrow I_{\delta} \uparrow \rightarrow T_{\delta} \uparrow \text{ и т.д.}$$

Где:

U_{δ} - напряжение, приложенное к изоляции;

I_{δ} - ток, текущий через изоляцию;

T_{δ} - температура изоляции;

γ - проводимость изоляции;

$tg\delta$ - диэлектрические потери в изоляции.

1.6 Методы и устройства для измерения высоких напряжения

В разрабатываемой установке необходимо предусмотреть возможность измерения низкого (до 1000 вольт) напряжения. Измерение напряжений, даже на сегодняшний день, это одна из сложных проблем в высоковольтной технике. Сложность связана с тем, что всегда приходится учитывать различные факторы, которые так или иначе вносят свою погрешность на точность измерения. Эти факторы зависят от частоты, вида напряжения, различных внешних условий, тепловых явлений и т.д. Все эти факторы исключить невозможно, поэтому необходимо проводить калибровку высоковольтных измерительных устройств.

Существуют две основные группы устройств и методов для измерения высокого напряжения.

Методы и устройства, которые позволяют измерить полную величину напряжения.

Методы и устройства, которые позволяют измерить часть напряжения и с помощью коэффициента пропорциональности получить полную составляющую напряжения.

1.7 Выводы из литературного обзора

Если обобщить сказанное выше, можно вывести следующие требования к проектируемой установке:

- 1) отсутствие контакта электрода и объекта;
- 2) испытательное напряжение менее 1 кВ;
- 3) возможность снятия вольт-амперной характеристики при разных расстояниях между электродами и разных давлениях воздуха.

Каждое требование направлено на устранение разрушающего воздействия на испытуемый объект. Отсутствие контакта приведет к исключению возможности механического повреждения. Регистрация дефекта

без электрического пробоя обеспечит первоначальную целостность объекта. Испытательное напряжение менее 1 кВ позволит снизить воздействие на объект. Далее исходя из этих требований будет проектироваться установка.

2 Разработка методики и прототипа установки для проведения экспериментов по выявлению дефектов в тонких пленках воздействием электрического поля

2.1 Разработка методики проведения экспериментов

2.1.1 Метод испытания

Используя спроектированную установку, ведутся исследования возможности обнаружения различного вида дефектов покрытий в тонких пленках при среднем (от 25 до 1×10^{-3} торр) и высоком (от 1×10^{-3} до 1×10^{-9} торр) вакууме.

Условия эксперимента: температура окружающего воздуха в лаборатории 16 С, давление воздуха меняется в диапазоне от 25 до 1×10^{-3} торр. Влажность в данной работе не учитывается, так как ее влияние не приводит к изменению тока короны. Измерение проводилось по следующей методике: напряжение подавалось с шагом 20 В до появления минимального тока, который позволял зафиксировать микроамперметр. Напряжение, при котором появлялся ток, считали начальным напряжением короны. Появление короны всегда связано с появлением свечения у острия. В случае диагностирования пленок без дефектов ток короны равен нулю до искрового пробоя. В случае диагностирования пленок со сквозными дефектами напряжение появления короны практически совпадало с напряжением системы острие-плоскость без диэлектрического покрытия. При диагностировании диэлектрических пленок со сквозным дефектом всегда наблюдалось свечение вблизи острейного электрода и в месте сквозного дефекта [13].

Для измерения напряжения на коронирующем электроде (Рис. 15 поз. 2) использовался вольтметр типа ТЛ-4М2 (класс точности 4,0), который позволяет измерять напряжение до 1000 вольт. Для измерения тока протекающего через коронирующий электрод использовался микроамперметр М4204

предназначеный для измерения силы тока в электрических цепях постоянного тока. Щитовые стрелочные приборы М4204 (класс точности 1,5) позволяют измерять токи в пределах от 10 мкА до 200 мкА. Приборы М4204 по климатическим условиям предназначены для эксплуатации в условиях умеренного и тропического климата.

2.1.2 Метод регистрации

В связи с тем, что коронный разряд можно наблюдать визуально и, соответственно, получать дополнительную информацию, в установке предусмотрена видеосъемка световых явлений в процессе получения вольтамперных характеристик фотокамерой, позволяющей получать замедленную видеосъемку до 200 кадров в секунду. С помощью этого же фотоаппарата получены изображения дефектов после их обнаружения, также регистрация значения тока коронный производится микроамперметром на основе чего составляется вольтамперная характеристика (ВАХ).

2.1.3 Проведение экспериментов

В первую очередь необходимо поставить перед собой задачи, которые должны быть решены в результате исследования:

1) Необходимо найти такое соотношение PS (P — давление в атмосферах и — расстояние между электродами в метрах) при котором напряжение и ток зажигания короны будет оптимальным. Опираясь на кривую Пашена для воздуха (Рис.3) можно определить, что для установки до 1000 вольт рабочий диапазон PS изменяется от 0,1 до 9. Однако, закон Пашена справедлив для однородного поля, так же он имеет некоторое несоответствие с экспериментальными значениями, именно поэтому необходимо снять зависимость напряжения зажигания короны при постоянном S , и плавно регулируя P .

2) Для оптимального значения напряжения и тока необходимо убедиться в возможности отыскания дефектов в диэлектрической пленке методом коронного разряда. Для этого необходимо заведомо бездефектную и дефектную пленку поместить в систему острие-плоскость и снять ВАХ.

3) Важной задачей является определение расстояния от плоскости острия при котором может обнаруживаться дефект. Дефектную пленку необходимо сдвигать относительно острия фиксируя значения напряжения и тока.

4) Представляет интерес исследовать как влияет расстояние между электродом и диэлектрической пленкой на обнаружение дефекта методом обратной короны. Проверить как меняется напряжение зажигания для разных тонкопленочных диэлектриков. Для этого необходимо снять вольт-амперные характеристики для разных тонкопленочных диэлектриков.

5) Выявить экспериментальное различие между отрицательной и положительной короной. Определить при каком напряжении произошло появление коронного разряда. Для этого необходимо поменять полярность, подаваемую на электрод и снять вольт-амперные характеристики.

6) Проверить возможность отыскания более одного дефекта. Для проведения данного эксперимента необходимо искусственно создавать дефекты которые в дальнейшем необходимо обнаружить.

7) Определить какие негативные последствия после проведения экспериментов удалось обнаружить в экспериментальной установке и в опытных образцах. Для этого необходимо сравнить опытный образец, который подвергся испытаниям с образцом, который не был использован. В результате сопоставления можно судить об изменениях, которые происходят при воздействии электрического тока.

2.2 Разработка прототипа установки

2.2.1 Блок-схема установки

В первую очередь необходимо определить основные узлы установки для отыскания латентных дефектов. Опираясь на выводы, сделанные в литературном обзоре определяем, что для отсутствия контакта между электродом и испытуемым образцом необходим электрод, положение которого относительно испытуемого образца должно меняться.

Для достижения напряжения до 1000 вольт, следует включить в узел блок-схемы вакуумную камеру. Именно при понижении давления, удастся достичь напряжения зажигания разряда от 1000 вольт и ниже.

В качестве источника питания следует выбрать такой прибор, чтобы на электроде имелась возможность изменить полярность, так мы получим полную вольт-амперную характеристику для разряда.

Снятие вольт-амперных характеристик возможно с помощью устройств для измерения постоянного напряжения и тока.

Для фиксации явлений, происходящих в вакуумной камере необходимо предусмотреть смотровое окно.

Полученные результаты для наглядности сведены в блок-схему, представленную на рисунке 10.

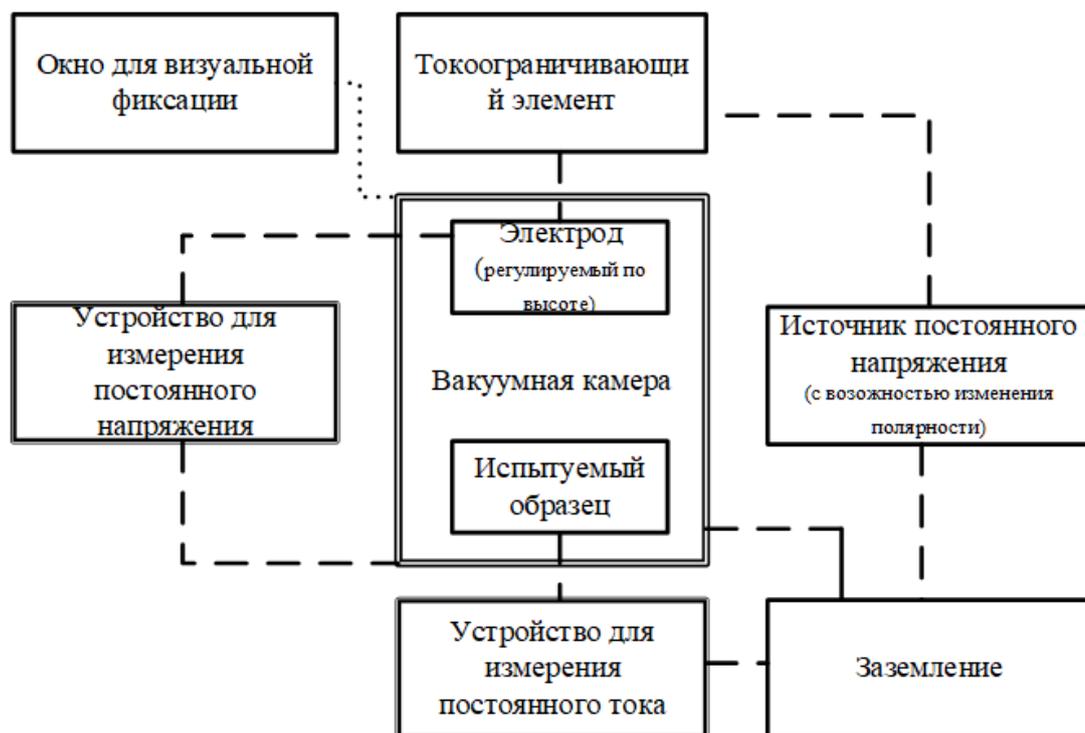


Рисунок 10 – Блок-схема основных узлов проектируемой установки.

2.2.2 Электрическая схема установки

На основании блок-схемы строим электрическую схему установки (рис. 11). Лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) питается от сети 220 вольт, вторичная обмотка подключена к первичной обмотке повышающего однофазного трансформатора (Т1). Для получения постоянного напряжения на вторичной обмотке предусмотрена однополупериодная схема выпрямления на основе диода (D1, D2). Смена полярности подаваемого напряжения осуществляется с помощью механических ключей (K1, K2). Для сглаживания пульсаций напряжения в схеме предусмотрен емкостной фильтр, которым является конденсатор (C1). Токи короткого замыкания приводят как к повреждению аппаратуры, так и испытуемого образца именно поэтому предусмотрен токоограничивающий резистор (R1). В литературном обзоре описывалась вольт-амперная характеристика при разряде в воздушном промежутке между острием электрода и заземлённой плоской подложкой. При

увеличении напряжения резкого падает сопротивление воздушного промежутка, что приводит к увеличению тока. Фактически описывается принцип работы варистора (RU1), который так же имеет нелинейную зависимость от приложенного напряжения. Измерения будут проводиться с помощью вольтметра и микроамперметра.

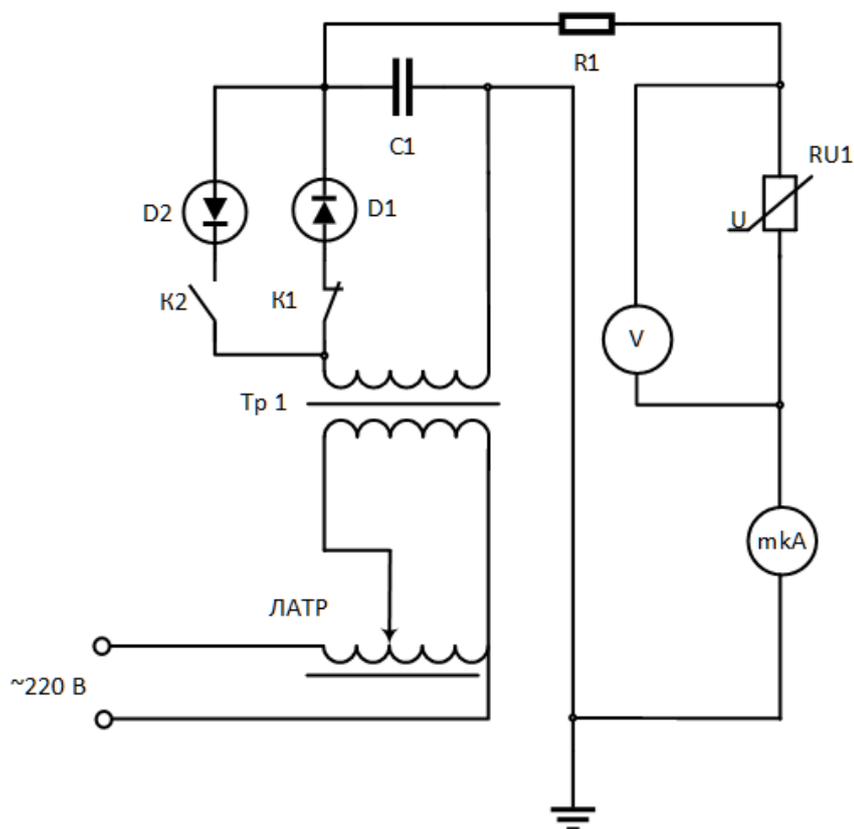


Рисунок 11 – Электрическая схема установки

2.2.3 Конструирование установки

Исходя из результатов опытов в работе [25] было принято решение выбрать оптимальное расстояние от острия до плоскости равное 5 мм, но необходимо предусмотреть возможность их регулировки. Также необходимо предусмотреть возможность изменения напряжения. Для выполнения требований, предъявляемых к установке, необходимо предусмотреть такие элементы, как источник постоянного тока с возможностью регулирования

напряжения и высоковольтный электрод, для создания электрического поля в промежутке, в котором размещается испытуемый объект. Конструкция электрода должна обеспечивать регулирование расстояния от объекта испытания до высоковольтного электрода. Сборочный чертеж конструкции электрода приведен на рисунке 12. Электрод состоит из шпильки 6, колпачковой гайки 4, с отверстием 2 для вольфрамовой проволоки 1 диаметр которой 0,1мм, с радиусом скругления 50 нм. Острие изготавливалось по специальной технологии электрохимического травления совместно с кафедрой «Наноматериалы и нанотехнологии ЕНМФ». Также есть глухое отверстие 5 для цанги 3 с помощью которого крепиться вольфрамовая проволоочка. Цанговый зажим имеет винт 9 который жестко фиксирует вольфрамовую проволоочку.

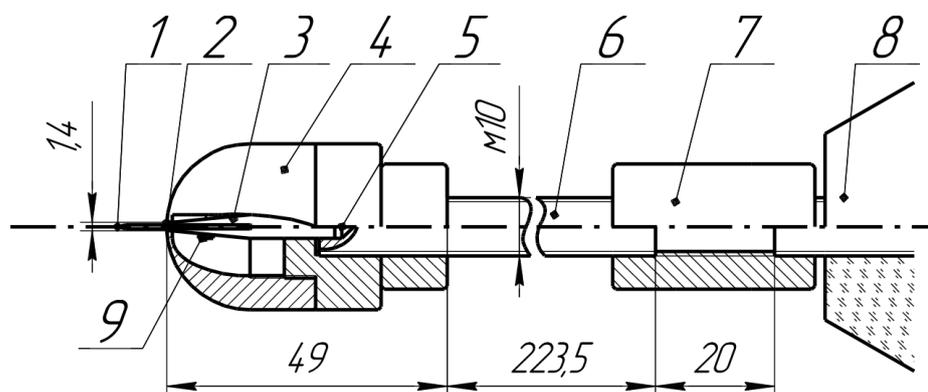


Рисунок 12 – Сборочный чертеж электрода

Регулирование расстояния осуществляется поступательным вращением шпильки 6 в соединительной гайке 7 другой конец которой накручивается на шпильку, проходящую через изолятор 8, для определения расстояния между диэлектриком и острием используются шаблоны.

Данные элементы позволят добиться соблюдения первого и второго требований к установке, а также частично удовлетворяется и третье, путем ограничения напряжения в безопасных пределах, но не исключен случайный пробой. В целях исключения случайных пробоев при работе с покрытиями

нужен элемент, способный ограничить ток пробоя, который разрушает зону, прилегающую к месту пробоя. Одним из способов ограничения тока пробоя является включение высокоомного резистора последовательно в контур коронирующего электрода.

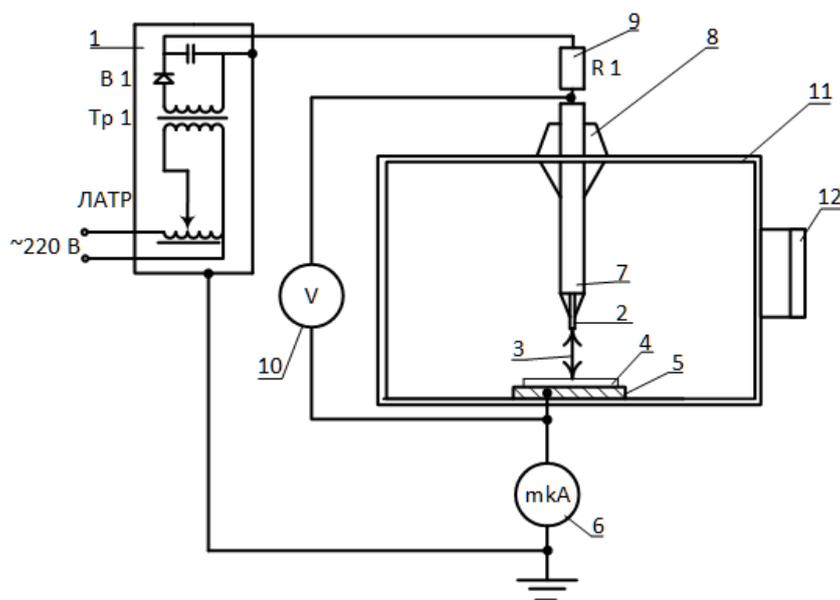


Рисунок 13 – Окончательная схема прототипа установки

Основным элементом установки (рис. 13) является блок создания короны 1 в системе острие 2, воздушный промежуток 3, диэлектрическое покрытие или диэлектрическая пленка 4, заземленная металлическая подложка 5. Для получения короны используется источник высокого напряжения, с плавной регулировкой в пределах 0...1 кВ. Регистрация тока короны осуществлялась с помощью электромагнитного микроамперметра 6 типа М4204 класс точности 1,5. Для крепления коронирующего электрода 2 применялся цанговый зажим, закрепленный в шпильке с помощью колпачковой гайки (подробно на рисунке 8). Шпилька 7 закреплена с помощью соединительной гайки со шпилькой в изоляторе 8, который в свою очередь встроен в вакуумную камеру 11. Измерение расстояния между металлической подложкой 5 и кончиком коронирующего электрода (проводник 2) контролируется

следующим способом. Сперва измеряется длина вольфрамовой проволоочки, выступающей из колпачковой гайки. Далее изготавливаются шаблоны такой длины, чтобы обеспечить необходимое расстояние между острием и испытуемым образцом. Для ограничения тока короткого замыкания, которое возможно в процессе экспериментов, в установке предусмотрен линейный элемент 9, который выполнен на базе резистора типа КЭВ-5 сопротивлением 2.4 кОм. Измерение напряжения между коронирующим электродом 2 и заземленной металлической подложкой 5 осуществляется посредством ампервольтметра типа ТЛ-4М2 который может использоваться для измерения постоянного напряжения и тока. Прибор предназначен для радиолюбителей и может быть использован в лабораторных условиях. Значение погрешности при измерении постоянного напряжения не более $\pm 4,0\%$ [9-11].

Оптическая визуализация явлений в промежутке при коронном разряде осуществляется посредством фотокамеры через смотровое окно 12.

Для регулирования напряжения на коронирующем электроде использовался ЛАТР-1, который устанавливался в цепи низшего напряжения повышающего трансформатора $Tr1$. В однополупериодной схеме выпрямления $B1$ использовался диод типа Д 1008.

Известно, что при пробое в промежутке между острым электродом и металлической подложкой может происходить повреждение диагностируемого объекта. Чтобы исключить эти повреждения в разрядный контур был введен резистор 9.

Система электродов в данной работе образована иглой и плоскостью. Игла обладает большой кривизной поверхности, это приводит к резкой неоднородности поля, что позволяет значительно снизить требуемое напряжение для зажигания коронного разряда. В результате снижаем вероятность повреждения поверхности.

2.2.4 Полярность короны

Первоочередным вопросом проектирования установки является выбор полярности коронного разряда, применяемого для диагностики. Возможны несколько вариантов по виду тока: постоянный, переменный (импульсный). Устройство можно сконструировать на постоянном токе в двух исполнениях на положительной или отрицательной короне. Отличие этих исполнений заключается в подключаемой полярности к электроду.

2.2.5 Описание прототипа установки для исследования режимов обнаружения латентных дефектов воздействием электрического поля

Для проведения опытов в вакууме требуется специальная установка, которая сможет создавать средний и высокий вакуум, а также стабильно его поддерживать. Описание такой установки представлено ниже.

2.2.5.1 Назначение изделия

Опытный образец установки предназначен для проведения термовакуумных испытаний образцов. Фотография внешнего вида установки приведена на рисунке 14.



Рисунок 14 – Внешний вид опытного образца установки

2.2.5.2 Технические характеристики

– Охлаждение / нагрев образца / точность поддержания температуры, °С (зависит от типа хладагента, значения указаны для C ₂ H ₅ ОН).	от - 50 / до +120 / ±0,1
– Предельные параметры термостата, °С	от -60 / до +140 / ±0,1 (в ванне)
– Предельный вакуум	10 ⁻⁶ Торр
– Индикация	ЖК дисплеи, монитор компьютера
– Охлаждение	воздушное
– Электропитание	380 В, 50 Гц
– Установленная мощность, кВт	не более 6
– Масса установки, кг	не более 400
– Габаритный размер ДхШхВ (без чиллера), мм	1300x800x1700
– Габаритный размер чиллера ДхШхВ, мм	450x420x890

2.2.5.3 Состав, устройство и работа установки

Вакуумная камера. Установка имеет цилиндрическую камеру из нержавеющей стали, диаметром 400 мм и длиной 600 мм, с электрохимической полировкой всех поверхностей. С торцов камера оснащена двумя дверьми, диаметром 400 мм для осуществления загрузки и выгрузки образцов. Двери оснащены универсальными петлями для перевешивания. Для проведения визуального контроля (видео фотосъёмка, вывод излучения и т.д.) каждая дверь оснащена фланцем ISO160 для установки на него смотрового окна из боросиликатного стекла. В комплектации установки предусмотрено одно боросиликатное стекло для установки на одну из дверей. Второе окно

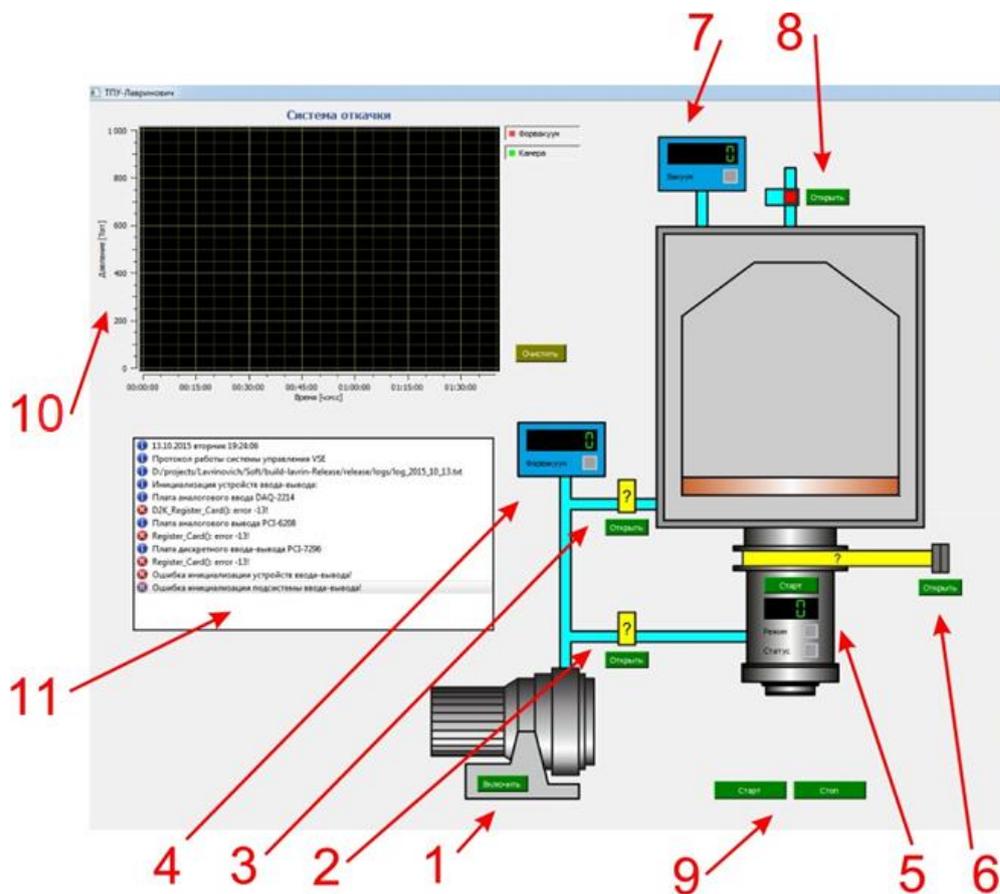
заглушено. Помимо дверей, 2 фланца ISO160 для установки смотровых окон предусмотрены на левой и правой поверхностях вакуумной камеры. На одном фланце установлено окно из боросиликатного стекла, второй фланец заглушен. На верхней поверхности вакуумной камеры расположены 2 фланца KF25. На одном из них расположен широкодиапазонный датчик измерения давления PKR251, на втором – запорный ручной кран для напуска атмосферного воздуха в вакуумную камеру. Также для напуска атмосферного воздуха в камеру в линии форвакуумной ("байпасной") откачки установлен клапан, управляемый с компьютера. На нижней поверхности камеры установлен фланец ISO160. На нем установлен затвор GVB-SS-ISO160-P производства НТС (Тайвань), отсекающий камеру от турбомолекулярного насоса. Между затвором и турбомолекулярным насосом установлена азотная ловушка. Также, на нижней поверхности расположены 2 фланца KF40 для подключения линии байпасной откачки и линии подвода хладагента. На правой поверхности камеры предусмотрен фланец ISO100 с установленными на него фланцами KF40 и KF16 для подключения ввода на 3 термопары (хромель-алюмель) и силового 10-штырькового разъема соответственно. Второй фланец ISO100, расположенный на левой поверхности камеры, а также 2 фланца ISO63, расположенные на верхней и левой поверхностях камеры заглушены. В установке предусмотрена возможность установки масс-спектрометра. Для этого на верхней и левой поверхностях камеры расположены фланцы CF35. Внутри камеры установлена съемная медная криопанель, размерами 320 x 550 мм для установки образцов;

Измерения давления. Для измерения давления в установке предусмотрен высоковакуумный широкодиапазонный датчик PKR 251 (Пирани/магниторазрядный) производства Pfeiffer (Германия);

Вакуумная откачка. Форвакуумный насос – ISP-250 («Anest Iwata», Япония). Вакуумный, безмасляный спиральный насос, скорость откачки – 250 л/мин. Высоковакуумный насос – nEXT400D («Edwards», Великобритания. Турбомолекулярный, скорость откачки 400 л/сек). Для защиты ТМН от паров жидкостей и лаков, а также ускорения откачки и увеличения предельного вакуума в тракте установлена азотная ловушка. Для защиты форвакуумного насоса в линии также установлен уловитель паров (азотная ловушка). Вакуумная соединительная арматура (сильфоны, тройники, крестовины и т.п.) производства НТС выполнены из нержавеющей стали. Для подключения форвакуумного насоса к магистралям "байпасной" откачки камеры и форвакуумной откачки ТМН применяются нормально закрытые клапана AVBS-KF25-P-E с сильфонным уплотнением штока и пневматическим приводом;

Установка смонтирована на **подставке** с колесами, со съёмными боковыми панелями. Имеет 3 полки для размещения функциональной аппаратуры и блоков питания;

Блок управления. Для исключения человеческого фактора, снижения требований к квалификации оператора установки, создания и сохранения технологических карт процесса в установке предусмотрена система автоматизации процесса. Управление производится через компьютер в полуавтоматическом режиме (рис. 15). Система автоматизирует вакуумную откачку. Также предусмотрена возможность термостатирования в автоматическом режиме. Система включает в себя систему блокировок. Предусматривает отображение мнемосхемы процесса на дисплее с возможностью управления всей запорной арматурой, отображением параметров вакуума. Поставляется вместе с оригинальным ПО.



1 – кнопка включения форвакуумного насоса; 2 – клапан форвакуумной откачки выхлопа турбомолекулярного насоса; 3 – клапан байпасной откачки камеры; 4 – вакуумметр форвакуумной линии; 5 – панель управления турбомолекулярным насосом; 6 – затвор камеры; 7 – вакуумметр; 8 – клапан напуска атмосферы в камеру; 9 – кнопки включения/выключения режима автоматической вакуумной откачки установки до предельного значения; 10 – график системы откачки; 11 – консоль программы предназначена для вывода пользователю сообщений программы.

Рисунок 15 – Интерфейс программы управления опытным образцом установки

1) Кнопка включения форвакуумного насоса. Изображение кнопки показывает текущее состояние форвакуумного насоса: темно-зеленый цвет – насос выключен, ярко-зеленый цвет – насос включен.

2) Клапан форвакуумной откачки выхлопа турбомолекулярного насоса. Изображение показывает текущее состояние клапана: красный цвет – клапан закрыт, зеленый цвет – клапан открыт, два цвета – красный и зеленый – переходный процесс закрытия-открытия, вопросительный знак – ошибка чтения состояния концевиков клапана (при их наличии).

3) Клапан байпасной откачки камеры. Изображение показывает текущее состояние клапана: красный цвет – клапан закрыт, зеленый цвет – клапан открыт, два цвета – красный и зеленый – переходный процесс закрытия-открытия, вопросительный знак – ошибка чтения состояния концевиков клапана (при их наличии).

4) Вакуумметр форвакуумной линии. Имеет дисплейный индикатор, который показывает давление форвакуумной линии в Торр-ах, и светодиодный индикатор порогового значения давления. Светодиодный индикатор горит зеленым цветом при достаточном для работы форвакууме и красным цветом - при недостаточном (уровень давления задается пользователем на вакуумметре).

5) Затвор камеры. Изображение показывает текущее состояние затвора: красный цвет – затвор закрыт, зеленый цвет – затвор открыт, два цвета – красный и зеленый – переходный процесс закрытия-открытия, вопросительный знак – ошибка чтения состояния концевиков затвора (при их наличии).

6) Вакуумметр. Имеет дисплейный индикатор, который показывает давление в вакуумной камере в Торр-ах, и светодиодный индикатор порогового значения давления. Светодиодный индикатор горит зеленым цветом при достаточном для работы вакууме и красным цветом - при недостаточном (уровень давления задается пользователем на вакуумметре).

7) Клапан напуска атмосферы в камеру. Изображение показывает текущее состояние клапана: красный цвет – клапан закрыт, зеленый цвет – клапан открыт.

8) Кнопки включения/выключения режима автоматической вакуумной откачки установки до предельного значения.

9) График системы откачки. На графике две кривые – зависимости давления в форвакуумной линии и давления в камере от времени. Можно видеть обе кривые одновременно, либо выбрать нужные нажатием подписей в легенде графика.

10) Консоль программы предназначена для вывода пользователю сообщений программы. Сообщения могут быть трех типов: информация, предупреждение и ошибка (синий, желтый и красный флажки). Информационное сообщение выдается на любое действие пользователя. Например, при нажатии пользователем кнопки открытия клапана в консоль выводится либо сообщение об исполнении, либо сообщение об отказе, если открытие клапана в данный момент запрещено. Если в программе произошла ошибка, но она не критична, и программа способна выполняться дальше, в консоль выводится предупреждение с желтым флажком. С красным флажком выводятся сообщения о критических ошибках, при которых работа программы невозможна.

2.3 Сборка установки

На рисунке 16 представлена экспериментальная установка для диагностики сплошности диэлектрических пленок.

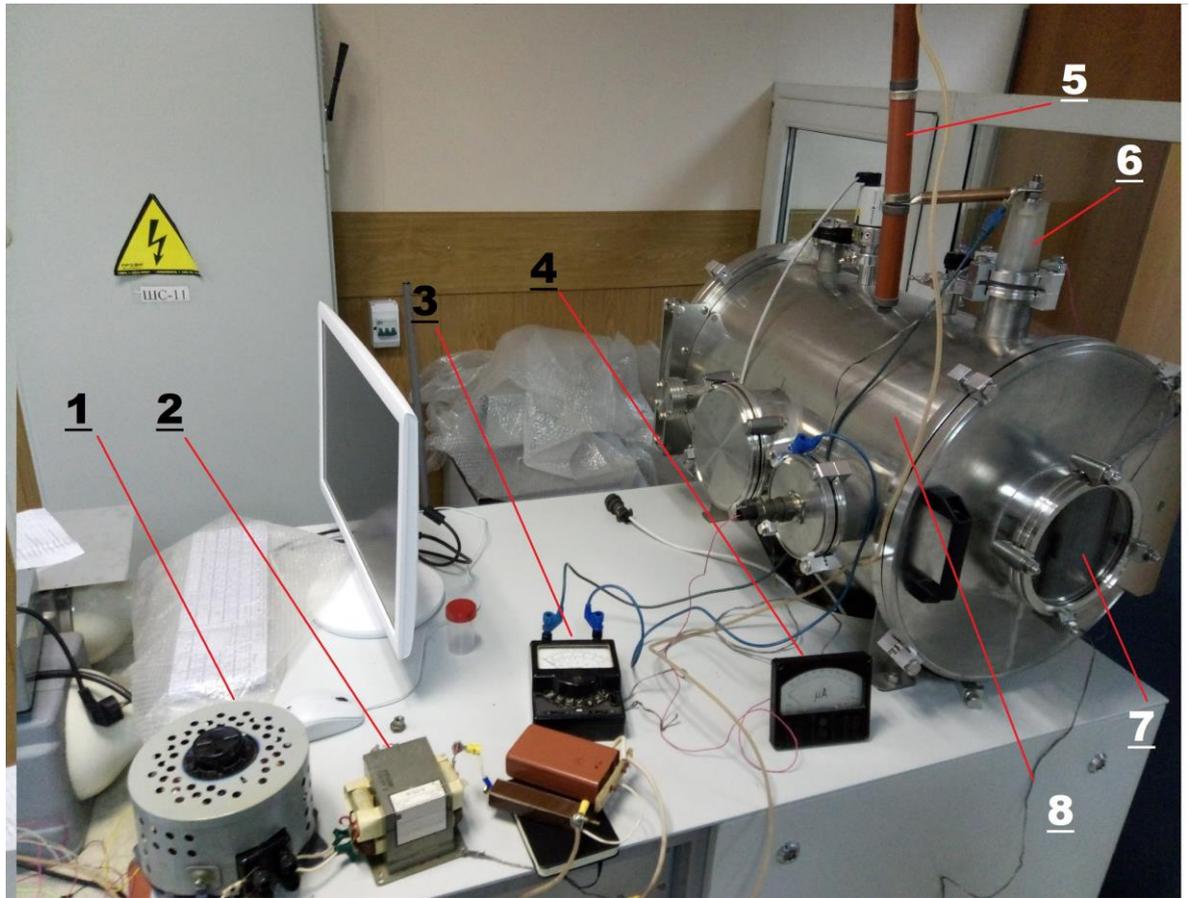


Рисунок 16 – экспериментальная установка: 1 – ЛАТР; 2 – трансформатор; 3 – вольтметр; 4 – микроамперметр; 5 – токоограничивающий резистор; 6 – изолятор; 7 – смотровое окно; 8 – вакуумная камера.

На рисунке 17 представлено положение электрода и системы острие плоскость в вакуумной камере.

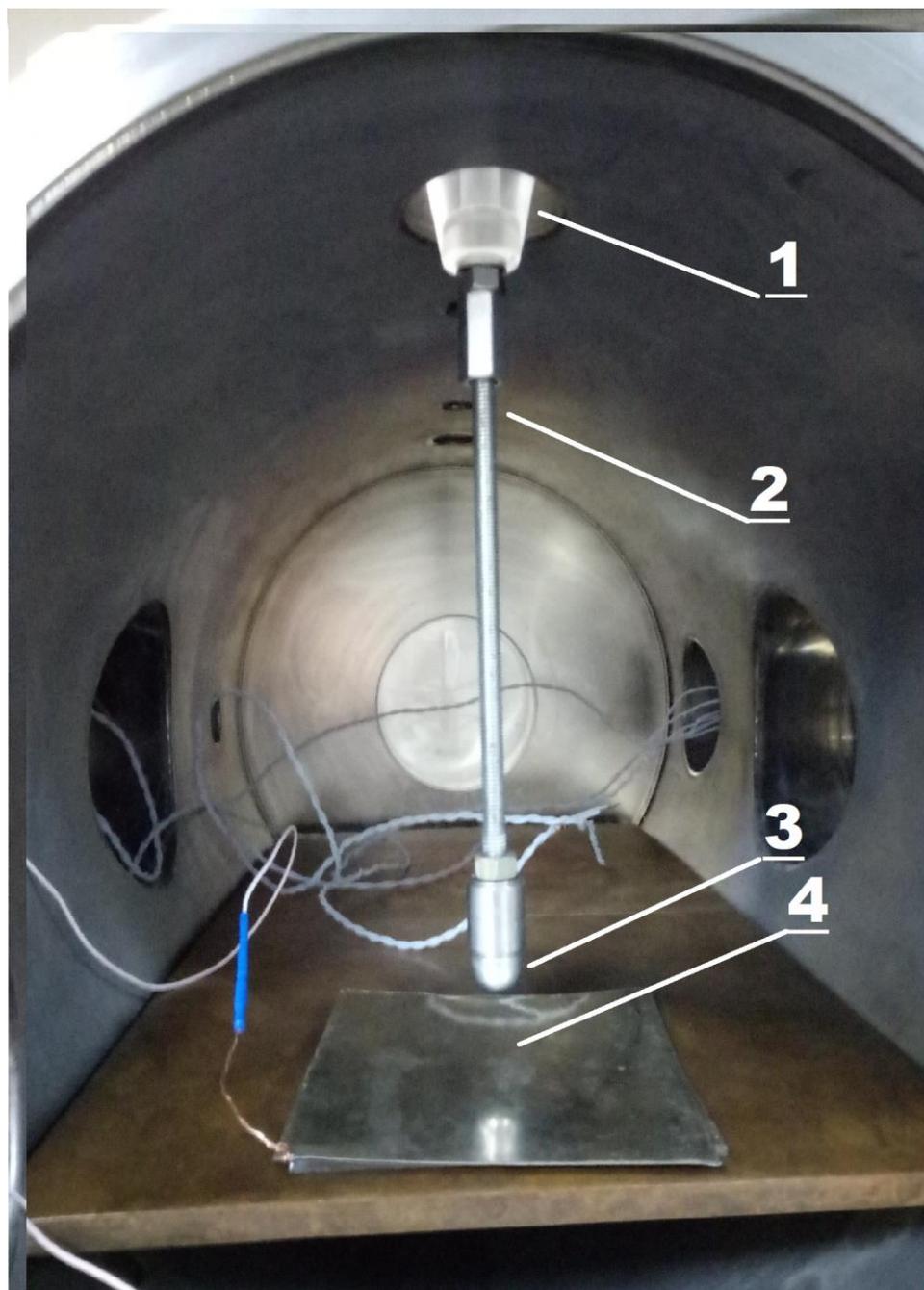


Рисунок 17 – вакуумная камера: 1 – высоковольтный изолятор; 2 – шпилька М10; 3 – гайка колпачковая; 4 – система острие плоскость.

На рисунке 18 показано положение вольфрамовой проволоочки на колпачковой гайке.

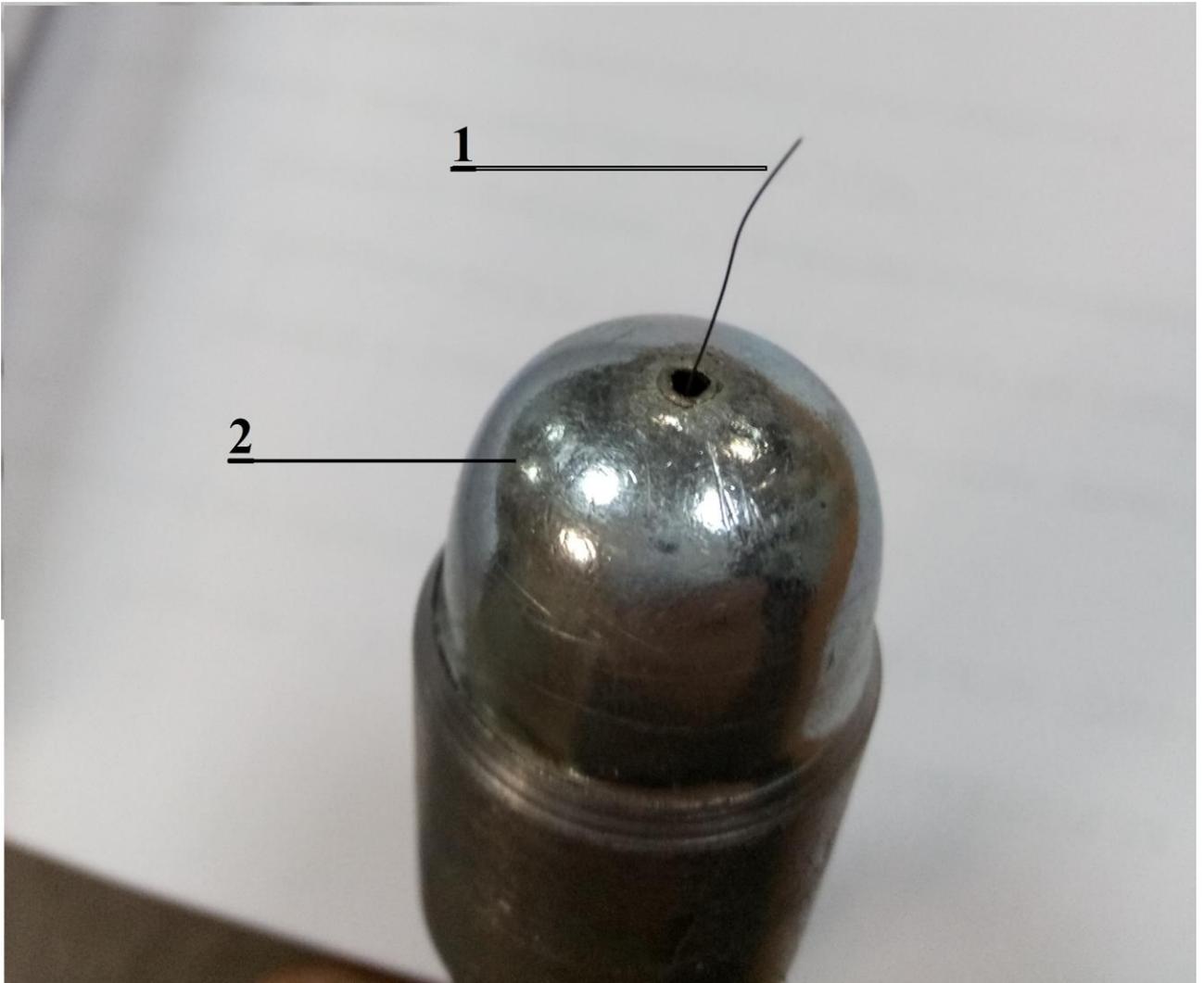


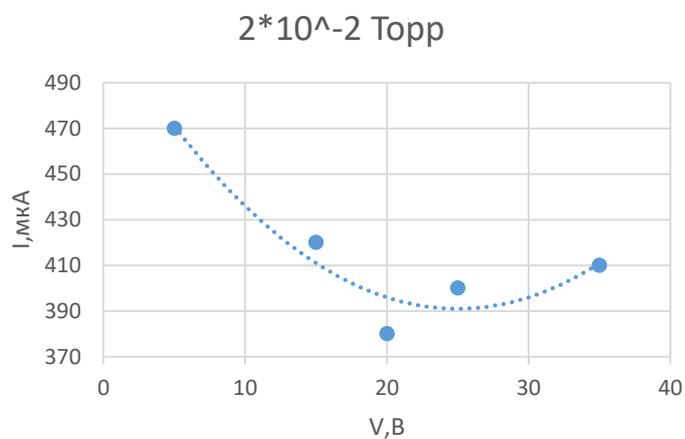
Рисунок18 –электрод: 1 – вольфрамовая проволоочка;2 – Колпачковая гайка.

2.4 Результаты проведения экспериментов

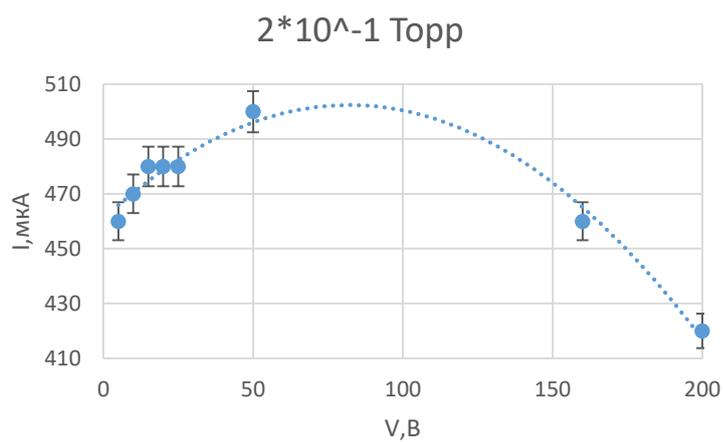
2.4.1 Поиск минимального напряжения зажигания короны

Условия эксперимента: расстояние $S=5$ мм, изменение давления P в пределах $1,6 \times 10^{-2}$ до 8 Торр. Полярность острия отрицательная.

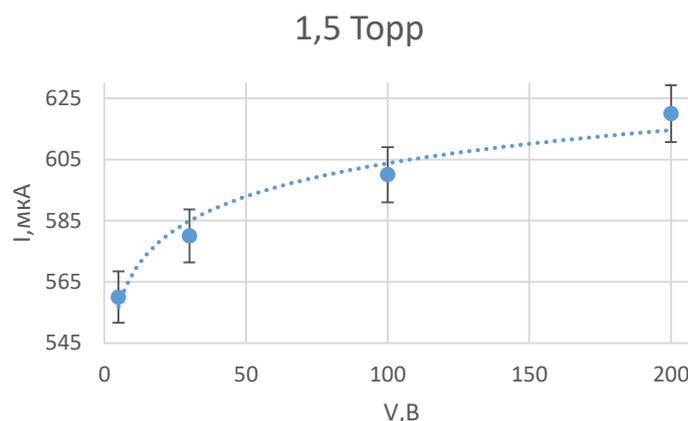
Ниже приведены оформленные результаты экспериментов в виде зависимостей для разных давлений. Для наглядности из всего множества выбраны с минимальными значениями напряжения и токов.



а)



б)



в)

Рисунок 19 – ВАХ разрядов в камере:

- а) Таунсендовский разряд, давление 2×10^{-2} Торр; б) тлеющий разряд, давление $2,5 \times 10^{-1}$; в) коронный разряд, давление 1,5 Торр

Таунсендовский (рис. 19а) имеет низкое напряжение и относительно пологое нарастание тока. Разряд характеризуется «падающей» вольт-амперной характеристикой. Нормальный тлеющий разряд (рис. 19б) обладает самым низким напряжением зажигания короны. Тлеющий разряд (рис. 19в) имеет относительно высокое напряжение зажигания короны из выше описанных.

Выбирая рабочее давления для проведения дальнейших экспериментов необходимо выполнение обоих условий:

- 1) Место повреждения должно быть как-либо обозначено (искра, пробой и т.д.)
- 2) Минимальное значение напряжения и тока.

На полученных фото видно, что при давлении 2×10^{-2} (рис. 20.) и $2,5 \times 10^{-1}$ (рис. 21) торр условие 1 не выполняется. Поэтому, не смотря на минимальные токи и напряжения, выбираем давление 1,5 торр (рис 22), так как выполняются оба условия. Токи лежат в пределах, которые были выбраны в ходе разработки прототипа установки, именно поэтому целесообразно выбрать именно это значение PS

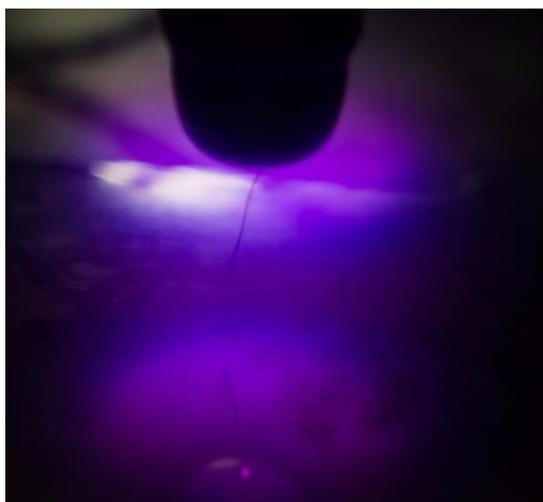


Рисунок 20 – Фото тлеющего разряда при давлении 2×10^{-2} торр.

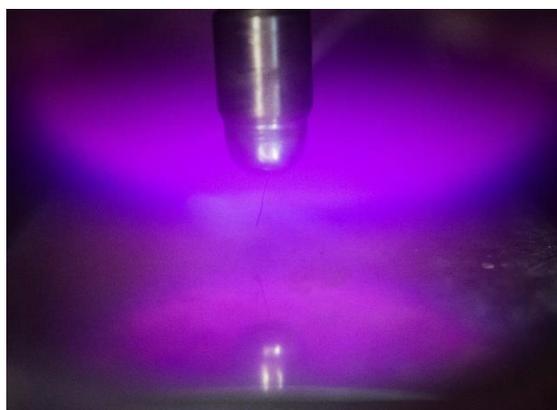


Рисунок 21 – Фото тлеющего разряда при давлении $2,5 \times 10^{-1}$ торр.

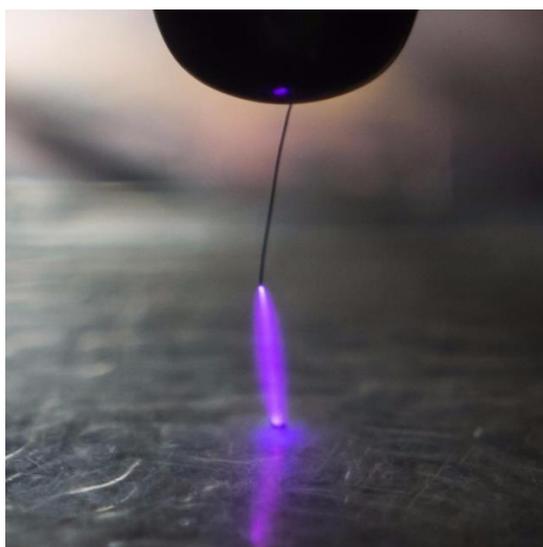


Рисунок 22 – Фото разряда при обнаружении дефекта в пленке

2.4.2 Поиск дефектов в диэлектрических пленках

Условия эксперимента: полиэтиленовая пленка толщиной 30 мкм., отверстие диаметром 2 мм. Проделанное отверстие в этом опыте имитирует потенциально возможный сквозной дефект. Расстояние между электродом и диэлектриком 5 мм, которое было выставлено помощью шаблона. Давление 1,5 Торр. Полярность электрода отрицательная.

Результаты эксперимента оформлены в виде графических зависимостей и представлены ниже.

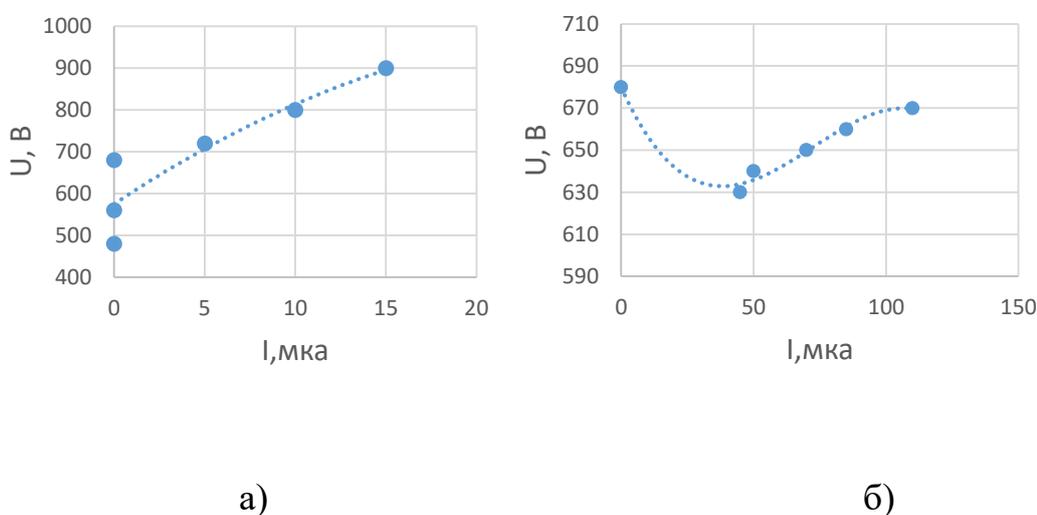


Рисунок 23 – ВАХ коронного разряда: а) бездефектной полиэтиленовой пленки; б) полиэтиленовой пленки с отверстием

Представленная на рисунке 23 (а), зависимость иллюстрирует отсутствие дефекта испытуемого образца, полученные значения токов представляют собой токи утечки. Токи утечки имеют место, поскольку площадь плоского электрода шире площади испытуемого объекта, что приводит к стеканию части заряда и фиксации тока утечки измерительным микроамперметром. Фото представлено на рисунке 24.

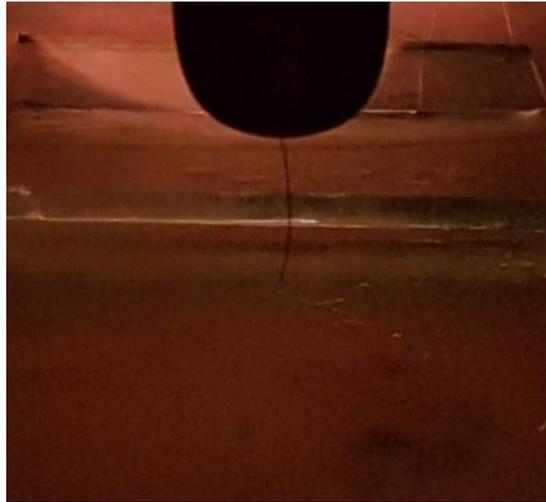


Рисунок 24 – Фото отсутствия дефекта в испытуемом образце ВАХ полиэтиленовой пленки, представленная на рисунке 23 (б), иллюстрирует наличие дефекта полиэтилена, т.к. полученные значения токов на порядок превышают значения, полученные в первом опыте, при напряжении 690 вольт видно резкое увеличение тока. Причина данного изменения заключается в появлении обратной короны. Фото представлено на рисунке 25.

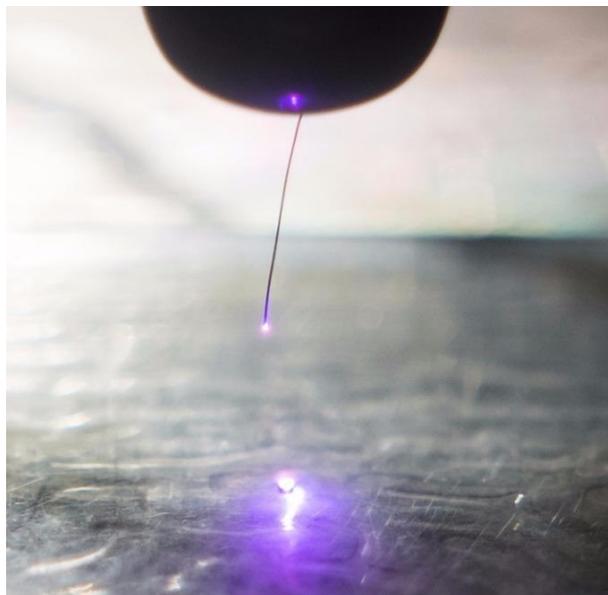


Рисунок 25 – Фото при наличии сквозного дефекта в испытуемом образце (свечение на высоковольтном электроде – отблеск свечения обратной короны в сквозном отверстии).

2.4.3 Определение зависимости ВАХ от расстояния в межэлектродном промежутке

Условия эксперимента: диэлектрическая пленка из лавсана толщиной 10мкм, диэлектрическая пленка из конденсаторной бумаги толщина 10 мкм. Давление P изменяется в пределах 0 до 10 Торр. Расстояние S меняется в пределах 5 до 20 мм. Полярность острия отрицательная.

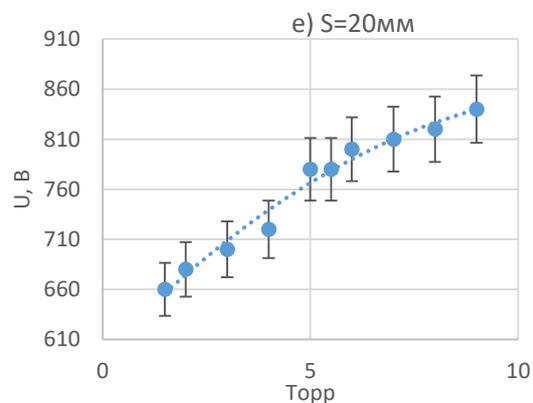
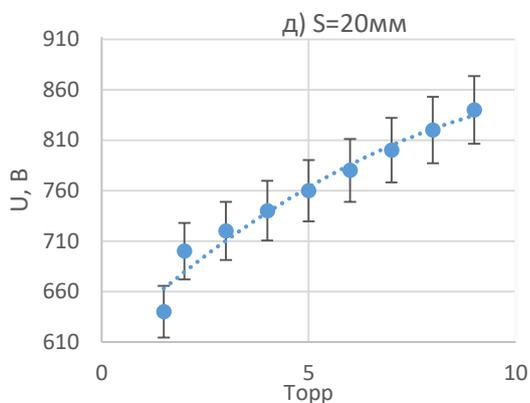
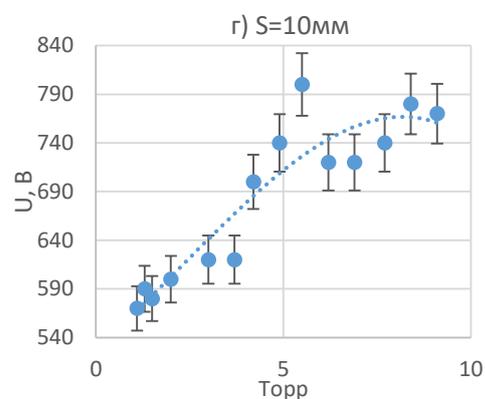
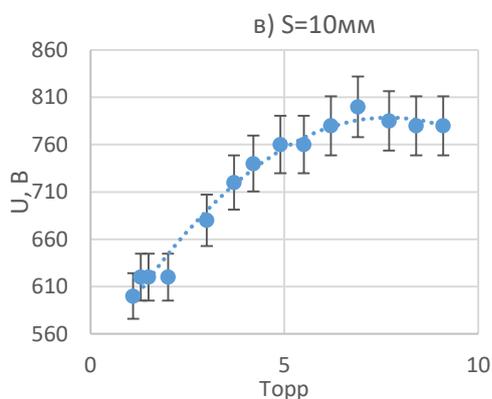
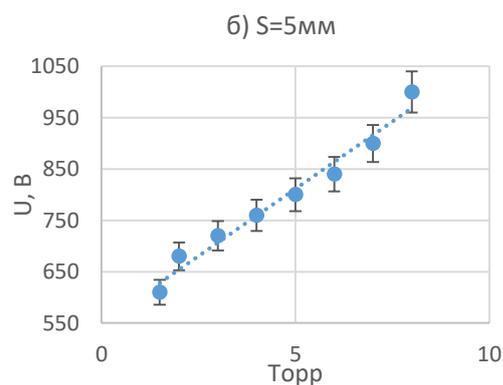
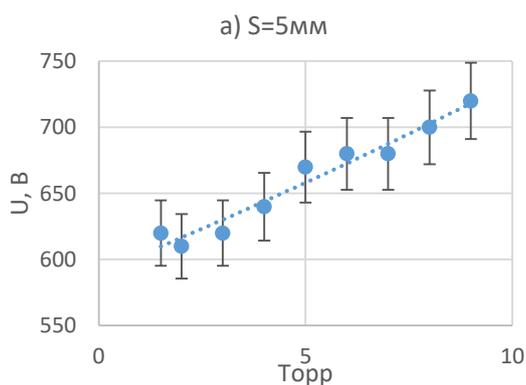
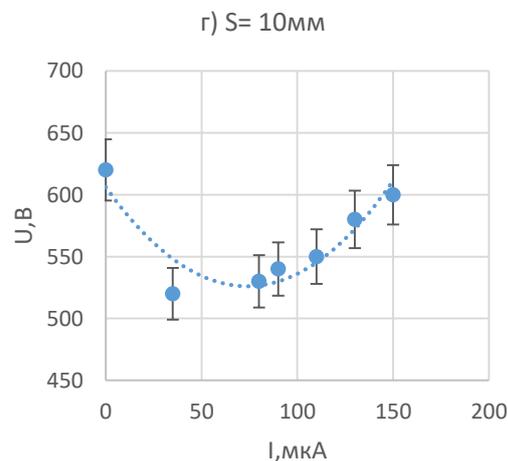
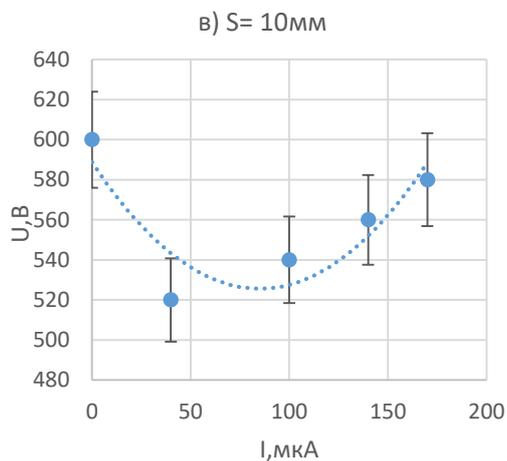
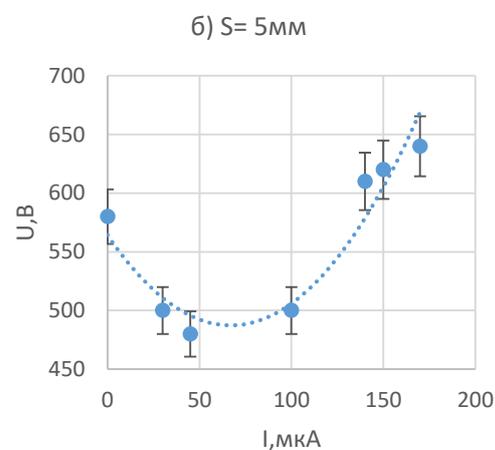
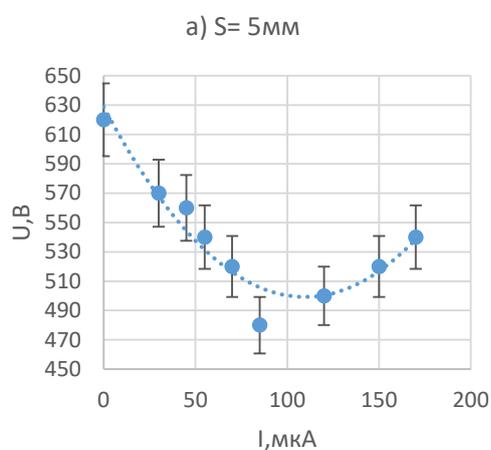


Рисунок 21 – Зависимость напряжения от давления при изменении межэлектродного расстояния: а) $S=5$ мм лавсан; б) $S=5$ мм конденсаторная бумага; в) $S=10$ мм лавсан; г) $S=10$ мм конденсаторная бумага; д) $S=20$ мм лавсан; е) $S=20$ мм конденсаторная бумага

Приведена серия графиков зависимостей ВАХ короны от межэлектродного расстояния S



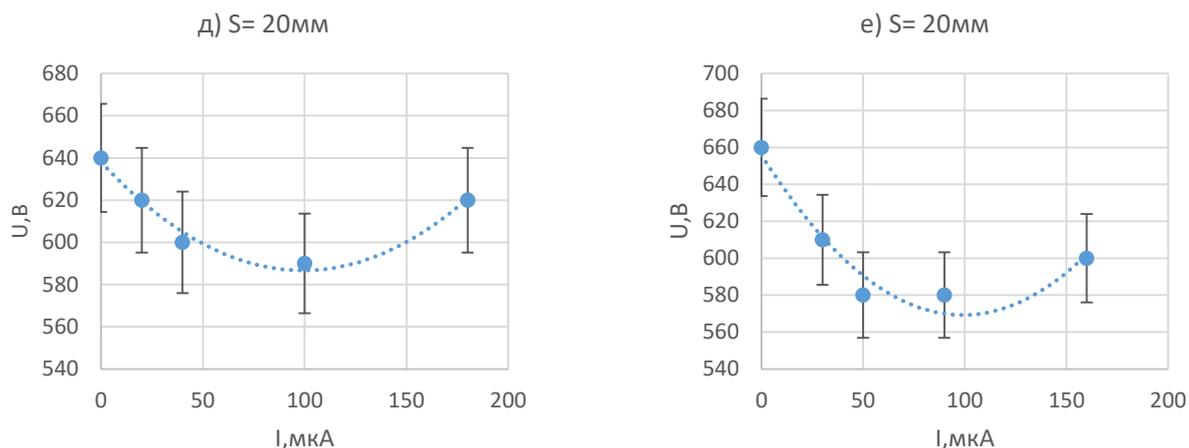


Рисунок 22 – Вольт-амперные характеристики разряда при изменении расстояния: а) S=5 мм лавсан; б) S=5 мм конденсаторная бумага; в) S=10 мм лавсан; г) S=10 мм конденсаторная бумага; д) S=20 мм лавсан; е) S=20 мм конденсаторная бумага

Из опыта можно сделать вывод, что диэлектрик практически не влияет как на напряжение зажигания (все значения лежат в пределах погрешностей приборов измерения), так и на ВАХ короны, а определяющим фактором является расстояние между электродами если оно возрастает, то и возрастает требуемое напряжение необходимое для появления тока короны.

Пример расчета для определения оптимального напряжения зажигания разряда приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Пример расчета для определения оптимального напряжения зажигания разряда.

U, Вольт	640	720	740
P, торр	8	4	2
S, мм	5	10	20
$P \times S$	4		

Из таблицы 1 видно, что минимальное напряжение зажигания разряда наблюдается при расстоянии $S=5$ мм и давлении $P=8$ торр.

Дальнейшее увеличение расстояния от острия до испытуемого образца нецелесообразно, т.к. потребует большее приложение напряжения. Исходя из этого в дальнейших экспериментах можно использовать к примеру лавсан толщиной 10 мкм, который отобразит общую закономерность как для конденсаторной бумаги, так и для любого другого диэлектрика толщиной 10 мкм.

2.4.4 Определение зависимости ВАХ от изменения расстояния между осями острия и дефекта

Условия эксперимента: диэлектрическая пленка лавсан толщиной 10 мкм со сквозным дефектом 0,2 мм; давление 1,5 торр. Высота $S=10$ мм. Полярность острия отрицательная.

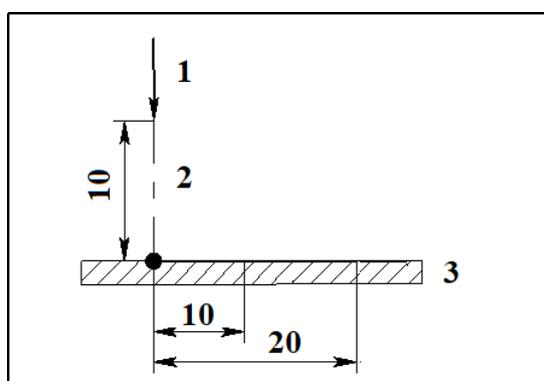


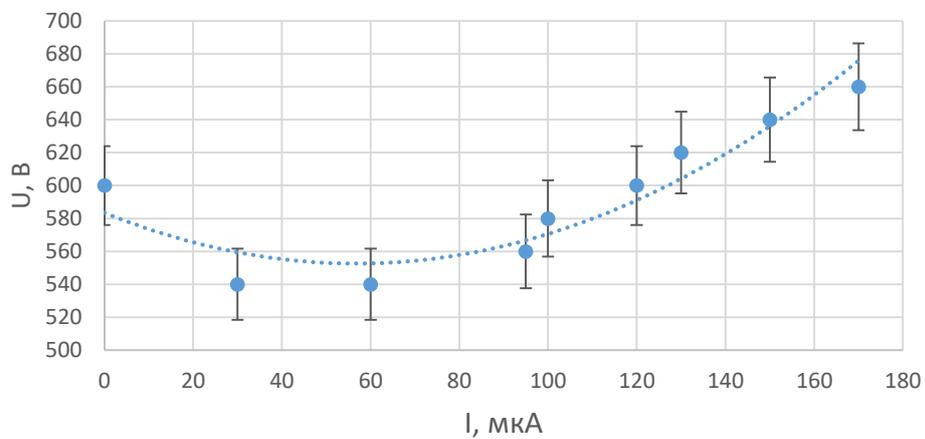
Рисунок 23 – Эскиз установки для опыта; 1–коронирующий электрод (острие); 2–ось острия; 3–металлическая подложка

Ход эксперимента.

Пленка с дефектом расположена так, что ось острия совпала с отверстием (сдвиг от центра 0 мм). По напряжению и току фиксировали появление обратной короны. Фиксация эффекта происходила с помощью

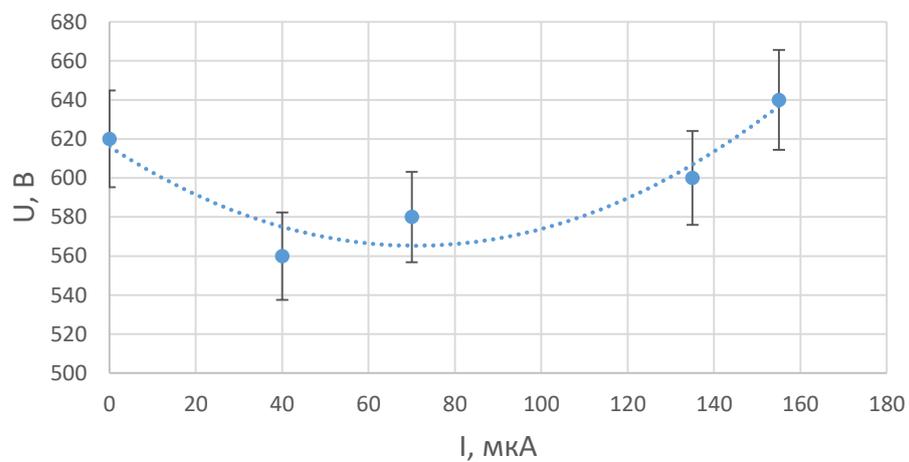
фотокамеры. Сдвиг пленки относительно оси острия фиксировали штангенциркулем.

Сдвиг 0 мм

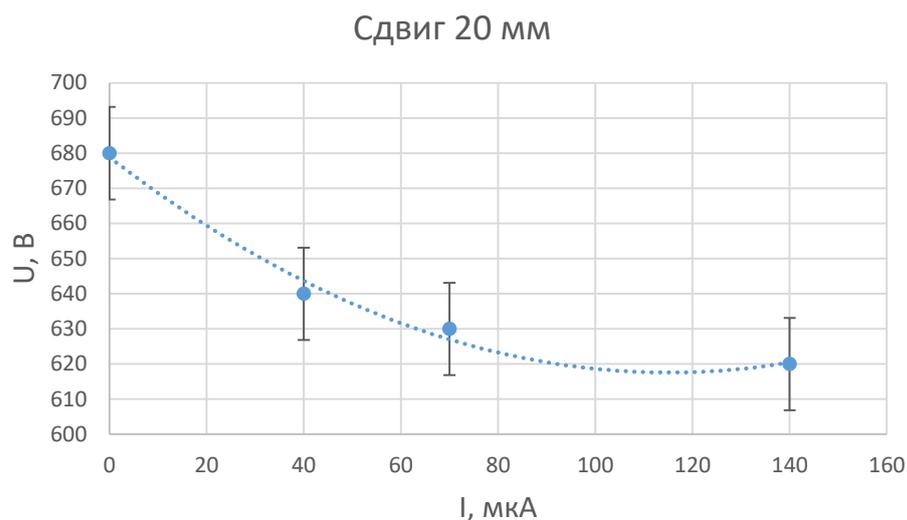


а)

Сдвиг 10 мм



б)



в)

Рисунок 24 – Вольт-амперные характеристики при смещении дефекта относительно соотрия.

По результатам построенных вольтамперных характеристик (рис. 24) можно определить, что радиус поиска дефектов с помощью коронного разряда не менее 20 мм, о чем свидетельствует фото представленное на рисунке 25. С увеличением расстояния от оси острия до отверстия необходимо приложить большее напряжение для того, чтобы появилась корона. Экспериментально дальнейшее смещение невозможно так как создаются более благоприятные условия для зажигания короны между электродом вблизи изолятора и стенкой вакуумной камеры, к тому же при дальнейшем увеличении расстояния необходимо приложить напряжение свыше 1000 В.

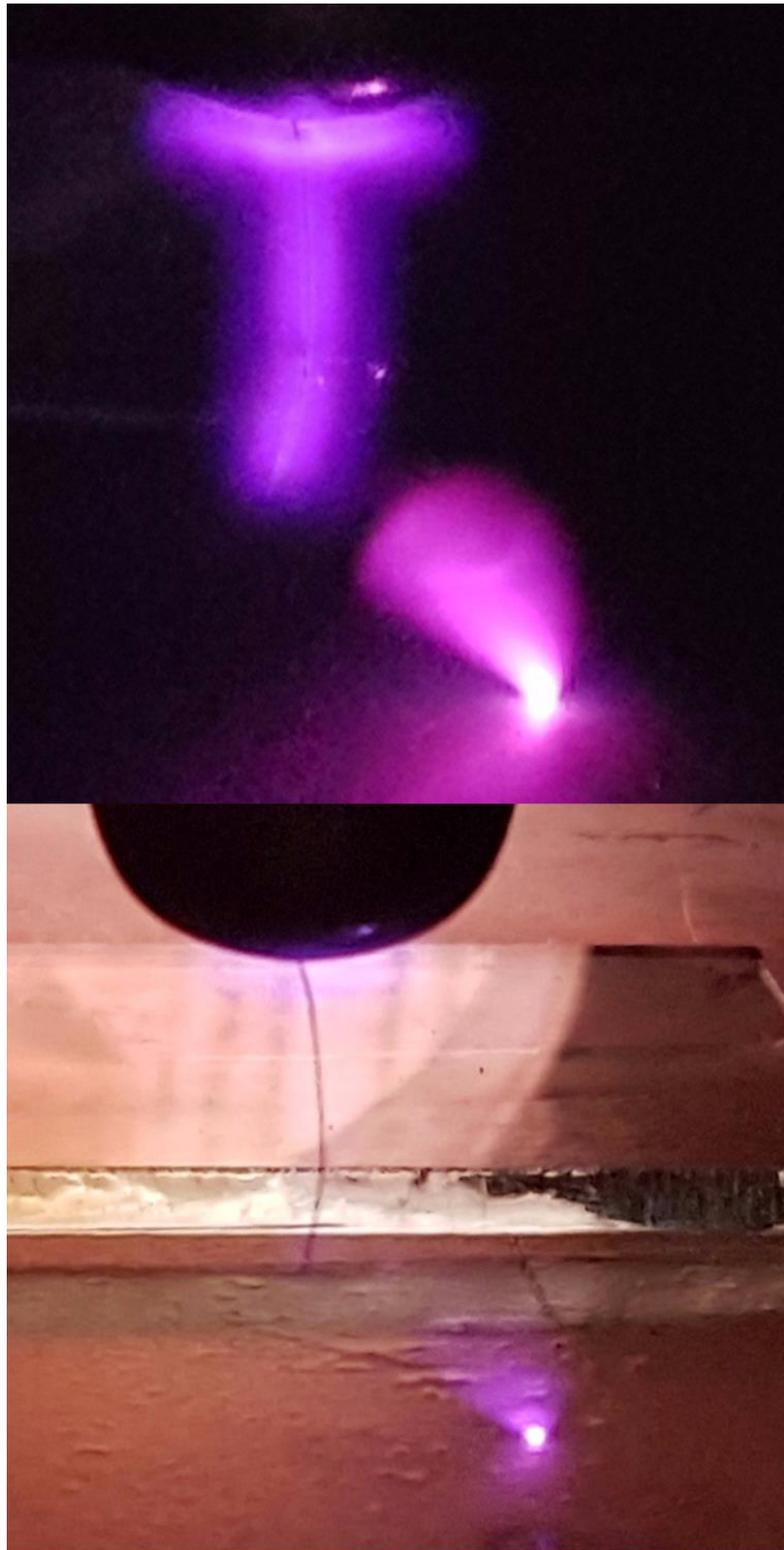


Рисунок 5 – Фото пленки со смещённым относительно острия дефектом при разных уровнях освещённости.

2.4.5 Экспериментальное выявление различий между отрицательной и положительной короны.

Условия эксперимента: полярность электрода меняется в ходе эксперимента; давление 1,5 торр; Расстояние от поверхности испытуемого образца до электрода 5 мм.

Табличные данные: U , В – напряжение короны в вольтах, I мкА – ток в системе остриё плоскость в микроамперах, R МОм – сопротивление ограничительного резистора в мегаомах

Таблица 2 – Отрицательная корона

U, В	I, мкА	R, МОм
560	0	2,4
520	10	2,4
500	35	2,4
490	60	2,4
520	110	2,4
540	130	2,4
560	145	2,4
580	155	2,4
600	180	2,4

При напряжении минус 560 вольт произошло появление коронного разряда, ток вырос скачком. При напряжении 500 вольт произошло возрастание интенсивности короны.

Таблица 3 – Положительная корона

Uк кВ	I, мкА	R, МОм
540	0	2,4
520	40	2,4
500	80	2,4
520	135	2,4
525	200	2,4

При напряжении 540 вольт произошло появление коронного разряда, ток вырос скачком.

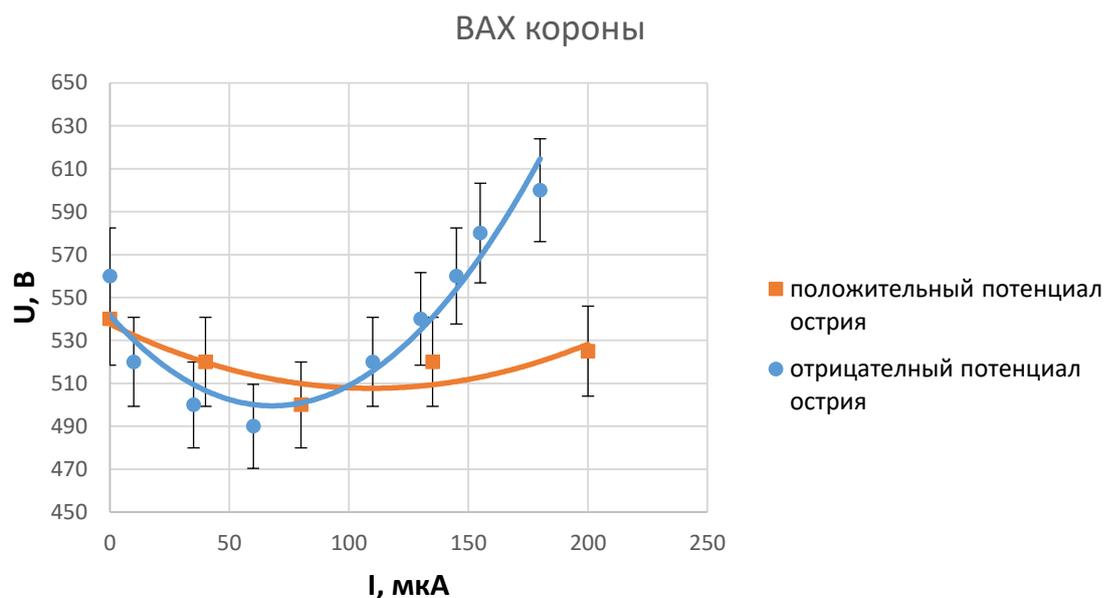


Рисунок 26 – ВАХ положительной и отрицательной короны

Полученные экспериментальные ВАХ (рис. 26) соответствуют общепринятой теории, также прослеживается совпадение с экспериментальными данными приведенные в статьях других авторов [15, 16].

Положительная корона имеет более крутую характеристику нарастания тока относительно напряжения, что является более приемлемым результатом, так как позволяет работать в меньшем диапазоне напряжений.

2.4.6 Опыт по определению возможности поиска более одного дефекта.

Условия эксперимента: диэлектрическая пленка лавсан толщиной 10мкм с двумя сквозными дефектами разного диаметра удаленные на разные расстояния до 20мм относительно острия; давление 1,5 торр. Высота S=10 мм. Полярность острия отрицательная.

В результате проделанного эксперимента удалось обнаружить оба дефекта. Свечение дефектов уменьшалось как от увеличения расстояния от

плоскости острия, так и от уменьшения диаметра дефекта. Фото результата эксперимента представлены на рисунке 27.



Рисунок 27 – Фото пленки с двумя дефектами, обнаруженными с помощью разряда

Было замечено, что, если диаметры дефектов отличаются более чем в два раза, дефект, обладающий большим диаметром “шунтирует” дефект с меньшим диаметром. Поэтому его свечение заметно тусклее. То же самое явление проявляется при увеличении расстояния т.е. при разной удалённости дефектов от острия дефект находящийся ближе шунтирует более удаленный.

Практически удалось обнаружить до 14 дефектов в пленке при различных расстояниях между дефектами, напряжения и токи при которых проводился эксперимент стремительно разрушают испытуемый образец, поэтому проведения опытов с целью определения максимального количества дефектов прекратились. Фото результатов эксперимента представлены на рисунке 28.



Рисунок 27 – Фото определения более одного дефекта (фото расположенное ниже сделано при выдержке 2 секунды)

2.4.7 Последствия проведения экспериментов

После проведения экспериментов было замечено, что стенки отверстия в полиэтилене были расплавлены (рис. 28), а в некоторых образцах конденсаторной бумаги было замечено обугливание (рис. 29). С помощью этих

данных можно приблизительно определить температуру разряда, но для полного понимания этого явления необходимо рассмотреть процессы, происходящие в тлеющем разряде.

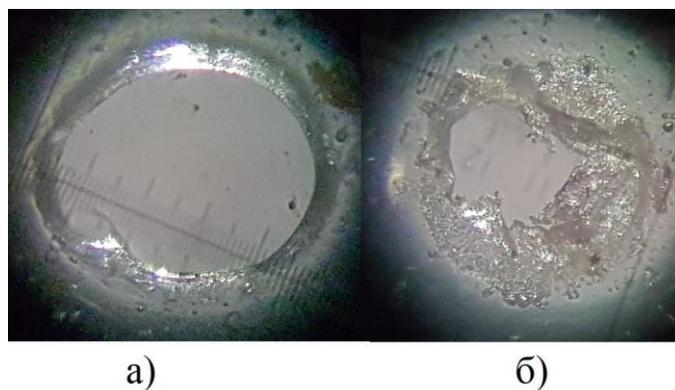


Рисунок 28 – дефект в полиэтилене: а) до эксперимента; б) после проведения экспериментов.

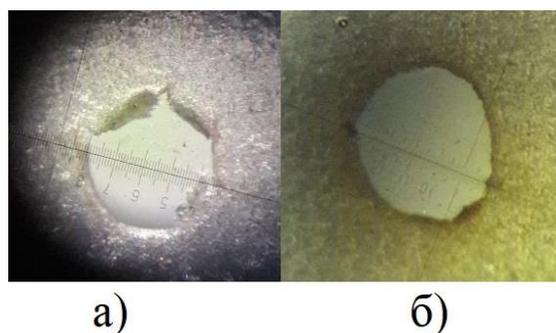


Рисунок 29 – дефект в конденсаторной бумаге: а) до эксперимента; б) после проведения экспериментов.

В газоразрядной плазме энергия электрического поля изменяет скорость движения частиц, в частности наиболее подвижных частиц – электронов. Ионы же в большей мере нагреваются за счет энергии, приобретенной от «горячих» электронов при кулоновском взаимодействии с ними. Можно сделать вывод, что температура электронов значительно выше температуры ионов. Это означает, что температура T_e электронного газа одна, а ионного T_i – другая,

причем $T_e > T_i$. Отсюда газоразрядная плазма является неравновесной, поэтому ее называют неизотермической. Неизотермическая плазма является низкотемпературной плазмой, значения температуры ионного газа T_i приблизительно равны нескольким сотням градусов, тогда как температура электронного газа T_e равна до 5000 °С.

Температура плавления полиэтилена находится в пределах от 109 до 120°С в зависимости от плотности, исходя из этого можно сделать вывод, что общая температура ионного и электронного газа может достигать температуры плавления полиэтилена, однако из-за высокой температуры именно электронного газа локальная температура может быть выше.

Из выше описанного можно сделать следующий вывод, что из-за локальных нагревов могла измениться форма острия вольфрама.

Для сравнения двух образцов использовался микроскоп «НИТАСНИ» ТМ3000. Для правильной интерпретации полученных фотографий образцов необходимо понять принцип работы растрового электронного микроскопа (Scanning Electron Microscope, SEM).[21]

Электронная пушка испускает пучок электронов на анализируемый образец. Электроны, которые взаимодействуя с образцом генерируют низкоэнергетичные вторичные электроны которые регистрируются детектором вторичных электронов. Так же регистрируются обратно отраженные электроны, оже-электроны, рентгеновское излучение, световое излучение. В результате эти сигналы являются носителями информации о топографической карте образца и его материала. [21]

На микрофотографии будут видны светлые поля показывающие высокую плотность материала, что соответствует металлу, а также темные поля для низкой плотности. [21]

Микрофотографии вольфрама представлены на рисунках ниже.

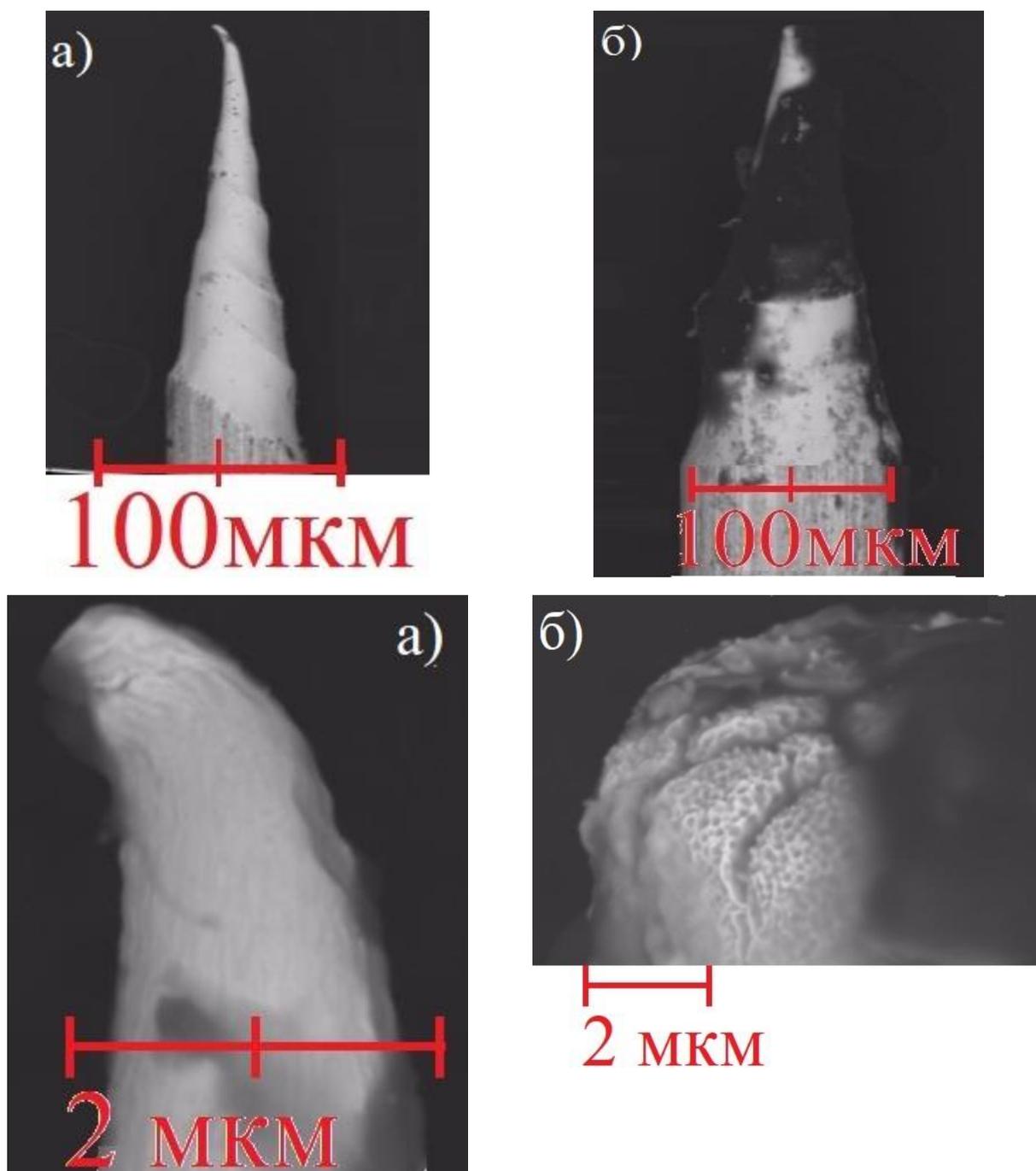


Рисунок 30 – Микрофотография образцов: а) вольфрам не использованный; б). вольфрам после проведения экспериментов

Видно, что использованный для опытов (рис. 30б) вольфрам имеет множество темных пятен, что предположительно свидетельствует о наличии оксидного слоя на поверхности. Не использованный вольфрам (рис. 30а),

находившийся при комнатной температуре практически не имеет темных пятен, что говорит о том, что оксидных пленок не имеет. Окисление вольфрама в воздухе происходит при температуре 400-490 С°[22], следовательно, это та температура, которая может возникнуть локально в плазменном разряде

Острие сильно деградировало, имеется множество пор, радиус скругления увеличился на порядок, имеются растрескивания.

Предположительно произошло это потому, что окись вольфрама испаряется с поверхности при температуре выше 800 °С эта температура ниже плавления вольфрама и создаются более благоприятные условия для разрушения острия. Растрескивания так же говорят о том, что температура была более 800 С° [24].

Уменьшить воздействие на острие можно если проводить эксперименты в среднем вакууме или в другой не окисляющей среде [23]. Работать при меньшем рабочем токе, давать остывать острию, перед тем как запускать воздух в камеру. Что касается пленки полностью исключить воздействие температуры невозможно, однако уменьшить негативное воздействие сократив время экспериментов и уменьшив рабочий ток.

2.4.8 Выводы по результатам эксперимента

По результатам проведения экспериментов подтвердилась возможность обнаружения сквозных дефектов в тонкопленочных покрытиях с помощью коронного разряда. Получены значения оптимально давления, при котором напряжение зажигания разряда минимальные. Определен радиус поиска дефектов в диэлектрических пленках, а также определены зависимости вольт-амперной характеристики от изменения расстояния в системе электрод-плоскость. Экспериментально выявлены различия при изменении полярности коронирующего электрода. Изучен результат воздействия коронного разряда как на испытуемый образец, так и на коронирующий электрод.

3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

3.1 Экспертная оценка поставщиков

Целью данного раздела является оценка коммерческого потенциала, перспективности проведения научного исследования с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения, планирование работ и расчет бюджета научного исследования.

SWOT – это акроним слов Strengths (силы), Weaknesses (слабости), Opportunities (благоприятные возможности) и Threats (угрозы). Внутренняя обстановка фирмы отражается в основном в S и W, а внешняя – в O и T.

Классический SWOT - анализ предполагает определение сильных и слабых сторон в деятельности, потенциальных внешних угроз и благоприятных возможностей и их оценку относительно стратегически важных конкурентов.

В данной работе рассматривается концепция проекта при организации малой инновационной производственной компании на территории особой экономической зоны города Томска. Данная компания в перспективе будет заниматься изготовлением дефектоскопов, разработанных в результате НИР.

Таблица 4 – SWOT- анализ проекта.

Сильные стороны (S)	Возможности внешней среды (O)
1 Инновационные технологии 2 Размещение в Томской ОЭЗ 3 Высокое качество продукции	1 Получение господдержки 2 Гранты на развитие 3 Выгодные условия экспорта (Валютные колебания)
Слабые стороны (W)	Угрозы внешней среды (T)
1 Узкий ассортимент 2 Малые объемы 3 Отсутствие внутренних накоплений	1 Кража технологии 2 Появление крупного конкурента

По итогам SWOT- анализа составляется матрица стратегических мероприятий или матрица решений, Таблица 5. Задача матрицы решений, прогнозирования возможного положения компании с учетом всех факторов и как следствие предоставления возможных решений. Основой для создания матрицы решений является сильные стороны компании и возможности внешней среды, их сочетание позволяет разработать ряд предложений, которые станут основой возможных решений.

Таблица 5 – Матрица решений

	Возможности (О)	Угрозы (Т)
Сильные стороны (S)	1. Вход в программу импортного замещения. 2. Льготы ОЭЗ	1. Запатентовать технологии в странах импортёрах
Слабые стороны (W)	1. Господдержку направить на расширение производства и на НИР 2. Направление финансы ресурсы на увеличение объема продукции	1. Внести в продукт новые свойства и качества (увеличение разрешающей способности) 2. Увеличение объема выпускаемой продукции за счет других компаний партнеров.

Итогом анализа стала матрица решений. Очевидно, что предлагаемые меры позволят нивелировать слабые стороны молодой компании, а также снизить влияние угроз, возникающих во внешней среде.

3.1.1 Структура работ в рамках проектирования

Планирование комплекса предполагаемых работ производится в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;

– построение графика проведения научных исследований.

Для выполнения работ по проектированию формируется группа, в состав которой входят: руководитель и инженер.

Порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в таблице 6.

Таблица 6 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№	Содержание работ	Должность
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления	2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер
	3	Выбор направления исследований	Инженер
	4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель
Теоретические исследования	5	Патентный поиск по тематике исследований	Инженер
	6	Проектирование электрических цепей для проведения эксперимента с помощью программного обеспечения ПК	Инженер
	7	Моделирование экспериментов с помощью программного обеспечения эксперимента ПК	Инженер
Практическое исследования	8	Сборка прототипа установки	Инженер
	9	Сборка прототипа установки	Инженер
	10	Проведение экспериментов	Инженер
	11	Обработка и оценка экспериментальных данных	Инженер
Социальный блок	12	Финансовый менеджмент	Инженер
	13	Социальная ответственность	Инженер
Обобщение и оценка результатов	14	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель
Оформление отчета (комплекта документации)	15	Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации)	Инженер

3.1.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников проектирования.

Трудоемкость работ — это показатель, характеризующий затраты живого труда, выраженные в рабочем времени, затраченном на производство продукции. Трудоемкость измеряется, как правило, в нормо-часах (фактических часах работы, затраченных на производство единицы работы).

Трудоемкость выполнения работ оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожі}$ используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5},$$

где $t_{ожі}$ — ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.;

$t_{\min i}$ — минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{\max i}$ — максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

3.1.3 Разработка графика проведения работ

Наиболее удобным является построение ленточного графика проведения научных работ в форме диаграммы Ганта.

Диаграмма Ганта состоит из полос, ориентированных вдоль оси времени. Каждая полоса на диаграмме представляет отдельную задачу в составе проекта (вид работы), её концы - моменты начала и завершения работы, её протяженность - длительность работы. Вертикальной осью диаграммы служит перечень задач.

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}}},$$

где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году;

Пример:

$$t_{\text{ож1}} = \frac{3 \cdot t_{\text{min1}} + 2 \cdot t_{\text{max1}}}{5} = \frac{3 \cdot 4 + 2 \cdot 11}{5} = 7 \text{ чел} - \text{дни},$$

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}}} = \frac{365}{365 - 119} = 1.48$$

На основе таблицы 13 строится календарный план-график.

График строится на основе таблицы 7 с разбивкой по месяцам и декадам.

Таблица 7 – Временные показатели проведения работ

Название работы	Трудоёмкость работ						Число исполнителей N чел	Длительность работ в рабочих днях T_{pi}	Длительность работ в календарных днях T_{ki}
	t _{min} , чел-дни		t _{max} , чел-дни		$t_{ожi}$, чел-дни				
	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель / Инженер	Руководитель / Инженер	Руководитель / Инженер
Составление и утверждение технического задания	5		10		7		1	7	11
Подбор и изучение материалов по теме		1		4		3	2	2	4
Выбор направления исследований		3		5		4	2	2	4
Календарное планирование работ по теме	1		3		2		1	2	4
Патентный поиск по тематике исследований		4		8		6	2	3	5
Проектирование электрических цепей для проведения эксперимента с помощью программного обеспечения ПК		8		9		7	2	5	8
Моделирование экспериментов с помощью программного обеспечения эксперимента ПК		10		12		13	2	6	10
Сборка прототипа установки		7		8		6	2	4	7
Пуско-наладка		5		8		7	2	4	7
Проведение экспериментов		4		8		9	2	3	5
Обработка и оценка экспериментальных данных		10		13		12	2	6	10
Менеджмент		8		9		8	2	5	8
Социальная ответственность		4		7		6	2	3	5
Оценка эффективности полученных результатов	4		5		5		1	5	8
Составление пояснительной записки		6		8		7	2	4	7
ИТОГ									103

Таблица 8 – Календарный план-график проведения проектирования по теме

№	Вид работ	Исполнители	T_{ki} кал дн	Продолжительность выполнения работ												
				фев			март			апрель			май			
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	11	■												
2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	4	▨												
3	Выбор направления исследований	Инженер	4		▨											
4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель	4		■											
5	Патентный поиск по тематике исследований	Инженер	5			▨										
6	Проектирование электрических цепей для проведения эксперимента с помощью программного обеспечения ПК	Инженер	8			▨										
7	Моделирование экспериментов с помощью программного обеспечения эксперимента ПК	Инженер	10			▨										
8	Сборка прототипа установки	Инженер	7					▨								
9	Сборка прототипа установки	Инженер	7						▨							
10	Проведение экспериментов	Инженер	5							▨						
11	Обработка и оценка экспериментальных данных	Инженер	10								▨					
12	Менеджмент	Инженер	8									▨				
13	Социальная ответственность	Инженер	5										▨			
14	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель	8											■		
15	Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации)	Инженер	7												▨	

Итого длительность работ в календарных днях руководителя равняется 23 дня, а инженера 82 дня.

3.2 Формирование бюджета затрат. Расчет затрат

3.2.1 Расчет материальных затрат

Материальные затраты - элемент себестоимости продукции, в котором отражается стоимость: приобретаемых со стороны сырья и материалов, входящих в состав вырабатываемой продукции или являющихся необходимым компонентом при изготовлении продукции; покупных материалов, используемых в процессе производства продукции для обеспечения нормального технологического процесса и для упаковки продукции или расходуемых на другие производственные и хозяйственные нужды.

Материальные затраты, необходимые для данной разработки, заносим в таблицу 9,10.

Таблица 9 – Материальные затраты на канцелярские нужды

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (Зм), руб.
Бумага для принтера, формат А4	Лист	120	2	240
Карандаш механический	Штука	2	35	70
Стержни на карандаш	Упаковка	1	20	20
Тетрадь	Штука	2	25	50
Ручка	Штука	2	15	30
Итого				410

Таблица 10 – Материальные затраты на установку

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (Зм), руб.
Электронный микроскоп	Шт.	1	5000	5000
Стеклотекстолита	м ²	1	1000	1000
Полипропиленовые трубы	м	1	50	50
Подводники медные одножильные	м	5	20	100
Источник тока	Шт.	1	10000	10000
ЛАТР	Шт.	1	1000	1000
Программное обеспечение	Шт.	1	1000	1000
Итого				18560

3.2.2 Зарботная плата исполнителей

Расчет основной заработной платы приведен в таблице 17.

Статья включает основную и дополнительную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НИИ:

$$Z_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}},$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата;

$Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата (15% от $Z_{\text{осн}}$).

Таблица 11 – Основная заработная плата

№ п/п	Наименование этапов	Исполнители по категориям	Трудо-емкость, чел.-дн.	Зарботная плата, приходящаяся на один чел.-дн., руб.	Всего заработная плата по тарифу (окладам), руб
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	11	4140	45540
2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	4	2760	11040
3	Выбор направления исследований	Инженер	4	2760	11040
4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель	4	517,5	2070
5	Патентный поиск по тематике исследований	Инженер	5	2760	13800
6	Проектирование электрических цепей для проведения эксперимента с помощью программного обеспечения ПК	Инженер	8	2760	22080
7	Моделирование экспериментов с помощью программного обеспечения эксперимента ПК	Инженер	10	2760	27600
8	Сборка прототипа установки	Инженер	7	2760	19320
9	Сборка прототипа установки	Инженер	7	2760	19320
10	Проведение экспериментов	Инженер	5	2760	13800
11	Обработка и оценка экспериментальных данных	Инженер	10	2760	27600

Продолжение таблицы 11

12	Менеджмент	Инженер	8	2760	22080
13	Социальная ответственность	Инженер	5	2760	13800
14	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель	8	517,5	4140
15	Составление пояснительной записки	Инженер	7	2760	19320
Итого:					272550

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}},$$

где $Z_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

$F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб.дн.

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}},$$

где $Z_{\text{тс}}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{\text{пр}}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от $Z_{\text{тс}}$);

$k_{\text{д}}$ – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5 (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: 15-20 % от $Z_{\text{тс}}$);

$k_{\text{р}}$ – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Тарифная заработная плата $Z_{тс}$ находится из произведения тарифной ставки работника: для инженера-13551, для руководителя - 20105, на тарифный коэффициент k_t и учитывается по единой для бюджетной организации тарифной сетке.

Пример:

$$Z_{тс} = ТС \cdot k_t = 13551 \cdot 1 = 13551 \text{ руб.}$$

Пример:

$$Z_m = Z_{тс} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p = 13551 \cdot (1 + 0,3 + 0,15) \cdot 1,3 = 25543 \text{ руб.}$$

$$Z_{дн} = 25543/21 = 1216 \text{ руб.}$$

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн},$$

где $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0,15 \cdot 272550 = 40882 \text{ руб.}$$

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}$$

$$Z_{зп} = 272550 + 40,882 = 313432,5 \text{ руб}$$

3.2.3 Отчисления во внебюджетные фонды

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации. Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}),$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

$$З_{\text{внеб}} = 0,271 \cdot (313432,5) = 84940,2 \text{ руб.}$$

3.2.4 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$З_{\text{накл}} = (\text{сумма статей}) \cdot k_{\text{нр}},$$

где $k_{\text{нр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 116%.

$$З_{\text{накл}} = 313432,5 \cdot 0,16 = 50149 \text{ руб.}$$

3.2.5 Формирование затрат научно-исследовательского проекта

Затраты – это ресурсы, которые предназначены или уже потрачены и приобретение определенных Товаров и услуг. Измерить затраты можно отдельно для любого вида или участка деятельности

Рассчитанная величина затрат проектирования работы является основой для формирования бюджета затрат проекта. Все расчеты затрат приведены в таблице 12.

Таблица 12 – Расчет бюджета затрат на НИ

Наименование статьи	Примечание	
	руб	%
Материальные затраты	18560	7,13
Заработная плата исполнителей	107473	41,15
Отчисления во внебюджетные фонды	84940,2	32,52
Накладные расходы	50149,12	19,2
Бюджет НИИ	261122,32	100

3.2.6 Определение ресурсной эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсэффективности.

Исп.1 – использование комплектующих производства Siemens

Исп.2 – использование комплектующих производства Toshiba

Исп.3 – использование комплектующих производства АВВ

Материалы, носящие конструктивный характер: корпуса, держатели, опоры, болты и т.д. – российского производства, применяются во всех видах исполнения. Каждый вид исполнения подразумевает применение

комплектующих рассмотренной фирмы или иной в зависимости от конкретной детали. В случае если компания не производит необходимый компонент для выбранного исполнения, то рассматриваются поставщики из того же региона или страны.

Таблица 13 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии \ Объект	Весовой коэффициент	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1.Надежность	0,2	5	5	4
2.Универсальность	0,2	4	4	5
3. Уровень материалоемкости	0,15	4	4	5
4. Функциональна мощность	0,2	5	5	4
5. Ремонтпригодность	0,1	5	5	5
6. Энергосбережение	0,15	4	4	5
ИТОГО	1	4,65	3,15	3,8

Пример расчета:

$$I_{p-исп1} = 5 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,15 = 4,5;$$

$$I_{p-исп2} = 5 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,15 = 4,5;$$

$$I_{p-исп3} = 4 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,15 = 4,55;$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки $I_{испi}$ определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{испi} = I_{p-испi} / I_{финр}^{исп.i}$$

$$I_{исп1} = 4,5 / 0,8 = 5,625; I_{исп2} = 4,5 / 1 = 4,5; I_{исп3} = 4,55 / 0,55 = 8,27$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта (см.табл.20) и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. Сравнительная эффективность проекта (\mathcal{E}_{cp}):

$$\mathcal{E}_{cp} = I_{исп1} / I_{исп\ max},$$

Таблица 14 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

№	Показатели	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,8	1	0,52
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,5	4,5	4,55
3	Интегральный показатель эффективности	5,625	4,5	8,75
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	0,64	0,51	1

Сравнив значения интегральных показателей эффективности можно сделать вывод, что реализация технологии в третьем исполнении является более эффективным вариантом решения задачи, поставленной в данной работе с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

Данная установка предназначена для поиска латентных дефектов в конденсаторных пленках. Обнаружение подобных дефектов является важной задачей, так их наличие приводит к сокращению срока службы изоляции, а, следовательно, преждевременному выходу из строя оборудования, что является затратами для производства. Применение устройства целесообразно на производственном предприятии или в испытательной

лаборатории. Устройство с высокой точностью способно обнаруживать дефекты широкий спектр дефектов.

На основании вышесказанного можно сделать вывод о том, что внедрение установки приведет к сокращению числа изделий со скрытыми недостатками поступающих к потребителю – это положительно отразится на имидже компании производителя, на уверенности покупателя в продукте и как следствие увеличит число продаж [18].