

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт сильноточной электроники Сибирского отделения  
Российской академии наук  
(ИСЭ СО РАН)

УДК 537.525; 62-768.3

ГРНТИ 29.27.43; 47.14.17; 47.14.21; 47.14.23

№ госрегистрации 01201356222

Инв. № 2013.08.15

УТВЕРЖДАЮ:

Директор ИСЭ СО РАН,  
ч.-корр. РАН



*Н.А. Ратахин* /Ратахин Н.А./  
\_\_\_\_\_ 2013 г.

М.П.

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

по теме:

«Проведение проблемно-ориентированных исследований по разработке методов выявления механизмов возникновения дуговых разрядов в бортовом оборудовании космических аппаратов при длительной эксплуатации в условиях космического пространства и разработка рекомендаций по их предотвращению»

«Экспериментальные исследования поставленных перед НИР задач.  
Обобщение и оценка результатов исследований»

(заключительный)

Шифр 2013-1.4-14-514-0010-013

Руководитель темы:

*А.В. Батраков* 09.09.2013 А.В. Батраков  
\_\_\_\_\_ подпись, дата

Томск 2013

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы,  
Заведующий  
лабораторией,  
канд. физ.-мат. наук

  
09.09.13  
подпись, дата

А.В. Батраков (введение,  
заклучение,  
разделы 2.4, 3, 5,  
Приложения А, В)

Ответственный  
исполнитель темы,  
Профессор,  
д-р техн. наук

  
подпись, дата

В.А. Лавринович (разделы 2, 4,  
Приложение В)

09.09.2013

Исполнители темы:

Заведующий  
лабораторией,  
д-р. физ.-мат. наук

  
09.09.2013  
подпись, дата


А.В. Козырев (разделы 1, 2,  
Приложение В)

Доцент,  
канд. физ.-мат. наук

  
09.09.2013  
подпись, дата

В.С. Ким (раздел 2)

Ведущий научный  
сотрудник,  
д-р техн. наук

  
09.09.2013  
подпись, дата

Г.Е. Озур (раздел 1.5)

Старший научный  
сотрудник,  
канд. физ.-мат. наук

  
09.09.2013  
подпись, дата

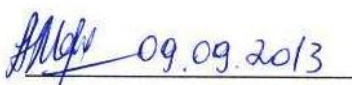
С.А. Попов (разделы 1.6, 2,  
Приложение В)

Старший научный  
сотрудник,  
канд. физ.-мат. наук

  
09.09.2013  
подпись, дата

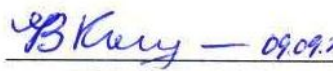
Е.В. Нефёдцев (раздел 4.2)

Старший научный  
сотрудник,  
канд. физ.-мат. наук

  
09.09.2013  
подпись, дата

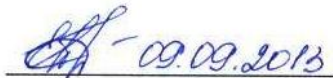
А.Б. Марков (раздел 4.1)

Младший научный  
сотрудник,  
канд. физ.-мат. наук

  
09.09.2013  
подпись, дата

В.Ю. Кожевников (раздел 1,  
Приложение В)

Младший научный  
сотрудник,  
канд. физ.-мат. наук

  
09.09.2013  
подпись, дата

Е.Л. Дубровская (Приложение Б)

Младший научный  
сотрудник


  
09.09.13  
подпись, дата


С.А. Онищенко (разделы 2.1, 2.2,  
2.3)


Младший научный  
сотрудник


  
09.09.2013  
подпись, дата

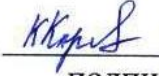
А.В. Шнайдер (разделы 2.1, 2.2, 2.3)

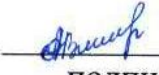
Аспирант  09.09.13 В.И. Петров (разделы 2.1, 2.2, 2.3)  
подпись, дата

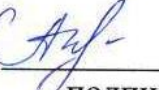
Аспирант  09.09.13 Е.В. Яковлев (разделы 2.1, 2.2, 2.3)  
подпись, дата


Аспирант  09.09.13 П.П. Кизириди (разделы 2.1, 2.2,  
подпись, дата 2.3)

Вед. конструктор  09.09.13 А.Г. Падей (разделы 1.5, 1.6)  
подпись, дата

Вед. инженер  09.09.2013 Карлик К.В. (разделы 2.1, 2.2, 2.3)  
подпись, дата

Вед. инженер  09.09.2013 А.В. Миков (разделы 1.5, 1.6)  
подпись, дата

Техник, студент  09.09.13 Г.С. Арестов (разделы 2.1, 2.2, 2.3)  
подпись, дата

Нормоконтролёр  09.09.13 С.В. Лыков  
подпись, дата

## РЕФЕРАТ

Отчет 193 с., 1 ч., 30 рис., 28 табл., 18 источников, 3 прил.

### КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ, ВАКУУМНАЯ ДУГА, НАДЕЖНОСТЬ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Объектом исследования является численно-аналитическая модель процессов возникновения дуговых разрядов в бортовом оборудовании в условиях космического пространства.

Целью работы является создание научно-технического задела в области разработки методов выявления латентных технологических дефектов бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов с длительным сроком активного существования, приводящих к возникновению дуговых разрядов в бортовом оборудовании в условиях космического пространства, которые могут привести к отказам при эксплуатации космических аппаратов, исследование процессов возникновения дуговых разрядов в бортовом оборудовании в условиях космического пространства и разработка рекомендаций по их предотвращению.

Методом исследования является компьютерное моделирование с проверкой модели компьютерным и физическим экспериментом.

В результате исследования была разработана численно-аналитическая модель процессов возникновения дуговых разрядов в бортовом оборудовании в условиях космического пространства, осуществлена её программная реализация и выполнена экспериментальная проверка. В результате продемонстрирована работоспособность модели и получены новые знания по влиянию различных факторов, таких как давление, расстояние, материалы электродов и наличие покрытий, состав и давление газовой среды, на вероятность вторичного дугообразования. Показано, что при отсутствии высокоэнергетических частиц в первичном плазменном потоке полное покрытие металлических поверхностей диэлектрической



плёнкой полностью предотвращает вторичное дугообразование. Необходимость сочленения элементов приводит к образованию тройных точек металл–диэлектрик–вакуум, которые могут быть эффективно экранированы конструкцией места сочленения. Показано, что при невозможности использования защитных диэлектрических покрытий следует использовать ограничение на выбор материала электродов таким образом, чтобы в окружающей газовой среде система «материал электрода – состав газовой среды» имела величину катодного падения потенциала газового разряда выше, чем используемое в космическом аппарате напряжение питания бортовой кабельной сети.

По результатам выполнения работы разработан результат интеллектуальной деятельности в виде заявки на патент Российской Федерации на «Способ определения стойкости к дугообразованию элементов радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов».

Результаты исследования рекомендовано использовать в научных исследованиях и опытно-конструкторских разработках по созданию рабочих мест наземной экспериментальной отработки радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов.

## СОДЕРЖАНИЕ

|  |     |
|--|-----|
| ВВЕДЕНИЕ .....   | 8   |
| 1 Экспериментальные исследования численно-аналитической модели процессов возникновения дуговых разрядов в бортовом оборудовании в условиях космического пространства .....   | 11  |
| 1.1 Внешний вид интерфейса численно-аналитической модели пробоя межэлектродного промежутка печатного монтажа .....   | 11  |
| 1.2 Пример экспериментальных исследований численно-аналитической модели разряда между проводящими элементами печатного монтажа.....  | 13  |
| 1.3 Пример экспериментальных исследований численно-аналитической модели разряда между проводящими шинами, покрытыми слоем диэлектрика с дефектом   | 20  |
| 1.4 Моделирование пробоя промежутка с различными газами.....   | 27  |
| 1.5 Моделирование первичного и вторичного дугового разряда.....  | 28  |
| 1.6 Моделирование зондовых измерений плотности плазменного потока первичного дугового разряда.....   | 32  |
| 1.7 Выводы к разделу .....   | 38  |
| 2 Проведение статистического и сравнительного анализа данных научно-информационных источников с результатами численного эксперимента на основе программной реализации численно-аналитической модели, включая построение зависимостей пробивного напряжения от расстояния между электродами, их материала, формы и покрытия, давления и состава газовой среды ..... | 38  |
| 2.1 Статистический анализ результатов моделирования зависимости вероятности дугообразования в зависимости от расстояния между электродами .....  | 38  |
| 2.2 Статистический анализ результатов моделирования зависимости вероятности дугообразования в зависимости от модели электродов и их покрытия.....  | 45  |
| 2.3 Статистический анализ результатов моделирования зависимости вероятности дугообразования в зависимости от давления и состава газа в окружающей среде ...  | 46  |
| 2.4 Сравнительный анализ данных научно-информационных источников с результатами моделирования дугообразования.....   | 48  |
| 2.5 Выводы к разделу .....   | 51  |
| 3 Техничко-экономическая оценка рыночного потенциала полученных результатов  | 52  |
| 4 Выработка рекомендаций и предложений по использованию результатов НИР в реальном секторе экономики, а также в дальнейших исследованиях и разработках   | 60  |
| 4.1 Общие рекомендации по использованию результатов НИР в разработках и при производстве РЭА КА.....   | 60  |
| 4.2 Технические рекомендации по использованию результатов НИР для защиты РЭА КА от дугообразования.....  | 61  |
| 4.3 Рекомендации по использованию в исследованиях дугообразования в газах и вакууме .....  | 70  |
| 5 Разработка проекта технического задания на проведение ОКР .....  | 71  |
| 6 Подготовка и публикация материалов, направленных на освещение и популяризацию результатов НИР.....   | 71  |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....   | 73  |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....  | 75  |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А. Проект ТЗ на ОКР .....   | 78  |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Отчёт о патентных исследованиях .....  | 102 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ В. Протоколы экспериментальных исследований .....   | 126 |

## ОБОЗНАЧЕНИЕ И СОКРАЩЕНИЯ

БКС – бортовая кабельная сеть.

КА – космический(е) аппарат(ы).

РИД – результат интеллектуальной деятельности.

РЭА – радиоэлектронная аппаратура.

СУБД – Система управления базами данных.

УФ – ультрафиолет, ультрафиолетовый.

ЭРИ – электрорадиотехнические изделия.

ЭСР – электростатический разряд.

## ВВЕДЕНИЕ

Использование вакуума в качестве диэлектрической среды является естественным в условиях эксплуатации КА. Однако реальные условия орбиты могут отличаться от чистых вакуумных условий, создаваемых в лабораторных экспериментах по электрической изоляции и разрядам в вакууме. Главным отличием является наличие неконтролируемой газовой среды, особенно в условиях набора высоты и низких орбит. Кроме того, КА имеют собственную газовую оболочку, формируемую в результате дегазации материалов, в первую очередь органических. Всё это создаёт предпосылки рассматривать условия электрической изоляции в РЭА и БКС КА соответствующими широкому спектру давлений от атмосферного до уровня глубокого вакуума.

При анализе проблем, связанных с электрической изоляцией в газе, как правило, используют данные по Таунсендовскому (одноэлектронному) механизму инициирования газового разряда, при котором электрическая прочность промежутков описывается законом Пашена. Данный подход даёт лишь верхнюю оценку электрической прочности, не учитывающей ключевое обстоятельство наличия плазмы в орбитальном космическом пространстве. Источником плазмы могут являться радиационные пояса Земли, заполняемые плазмой солнечного ветра, ионосферная плазма низких орбит, ЭСР во внешних и внутренних частях КА, электрореактивные двигатели, плазма дуговых разрядов, зажигаемых в результате выключения токов внутри РЭА. Наличие плазмы принципиальным образом изменяет механизм инициирования газового разряда, делая его многоэлектронным. Как результат, использование закона Пашена оказывается неправомерным, и реальные уровни электрической прочности могут существенно отличаться в меньшую сторону.

РЭА КА, даже в открытом исполнении, защищается от воздействия внешних плазменных потоков. Несмотря на это существуют источники плазмы внутри РЭА КА, связанные с выходом из строя ЭРИ. Для защиты



цепей используются средства отключения вышедшего из строя элемента. При отключении тока, превышающего пороговый ток вакуумной дуги, при напряжении БКС выше катодного падения потенциала дуги (несколько десятков вольт) возможно зажигание вакуумной дуги в течение периода выключения тока. Последствием первичного дугообразования внутри РЭА КА может быть инициирование вторичных дуг, способных переходить в самоподдерживающийся режим при пробое изолирующих промежутков силовой БКС. Такой процесс вторичного дугообразования внутри РЭА при относительно низких напряжениях имеет свою специфику и до настоящего времени остаётся неизученным. Использование результатов фундаментальных исследований в области физики вакуумной дуги необходимо, но не даёт полного представления о процессах в РЭА КА в силу их многофакторности. Таким образом, является актуальным целенаправленное моделирование процесса вторичного дугообразования в РЭА КА за счёт внутренних причин, связанных с инициированием первичных дуговых разрядов. Поскольку КА в начальный период эксплуатации находится в газовой среде в широком диапазоне давлений, модель должна быть основана на теориях и газового, и вакуумного разряда, законах и закономерностях твердотельной эмиссионной электроники, физике низкотемпературной плазмы. При этом должны быть учтены специфические условия окружающей среды и конструктивные особенности элементов бортового оборудования.

В процессе выполнения работы создан РИД «Способ определения стойкости к дугообразованию элементов радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов». При подготовке заявки на патент РФ выполнены патентные исследования, отчёт о которых прилагается к данному отчёту. В результате проведения патентных исследований установлено, что РИД «Способ определения стойкости к дугообразованию элементов радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов» не известен из действующих в настоящее время охранных документов и соответствует требованиям патентной чистоты. Оценка потребительской ценности и патентной чистоты полученного результата свидетельствует о

необходимости его правовой защиты в виде подачи заявки на изобретение РФ.

Планируемые результаты выполнения НИР могут представлять интерес для научных исследований и опытно-конструкторских разработок по созданию рабочих мест наземной экспериментальной отработки радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов.

При выполнении НИР подготовлен отчёт по первому этапу «Выбор направления исследований. Теоретические и экспериментальные исследования поставленных перед НИР задач», инв. № 2013.05.24, отчёт о патентных исследованиях № 1, Программа и методики экспериментальных исследований численно-аналитической модели процессов возникновения дуговых разрядов в бортовом оборудовании в условиях космического пространства № 14.514.11.4076.ПМ.

# 1 Экспериментальные исследования численно-аналитической модели процессов возникновения дуговых разрядов в бортовом оборудовании в условиях космического пространства

## 1.1 Внешний вид интерфейса численно-аналитической модели пробоя межэлектродного промежутка печатного монтажа

Разработанные программные компоненты обеспечивают доступность проектирования системы в рамках модели для научных и инженерно-технических работников, не имеющих опыта в программировании, благодаря наличию чёткой и интуитивно понятной единой системы блоков интерфейса. Для удобства проведения расчётов англоязычные названия могут быть переименованы в произвольные удобные для оператора названия на русском языке.

Интерфейс ввода начальных данных показан на рисунке 1.1. Начальные параметры задачи, представляющие входные данные задаются в табличном виде во вкладке Global Definition. Корректировка параметров модели, в том числе формы геометрии и граничных условий, осуществляется во вкладке Model 1. Управление процессом численного моделирования находится во вкладке Study 1. Совокупность получаемых данных и их представления может быть изменена во вкладке Results.

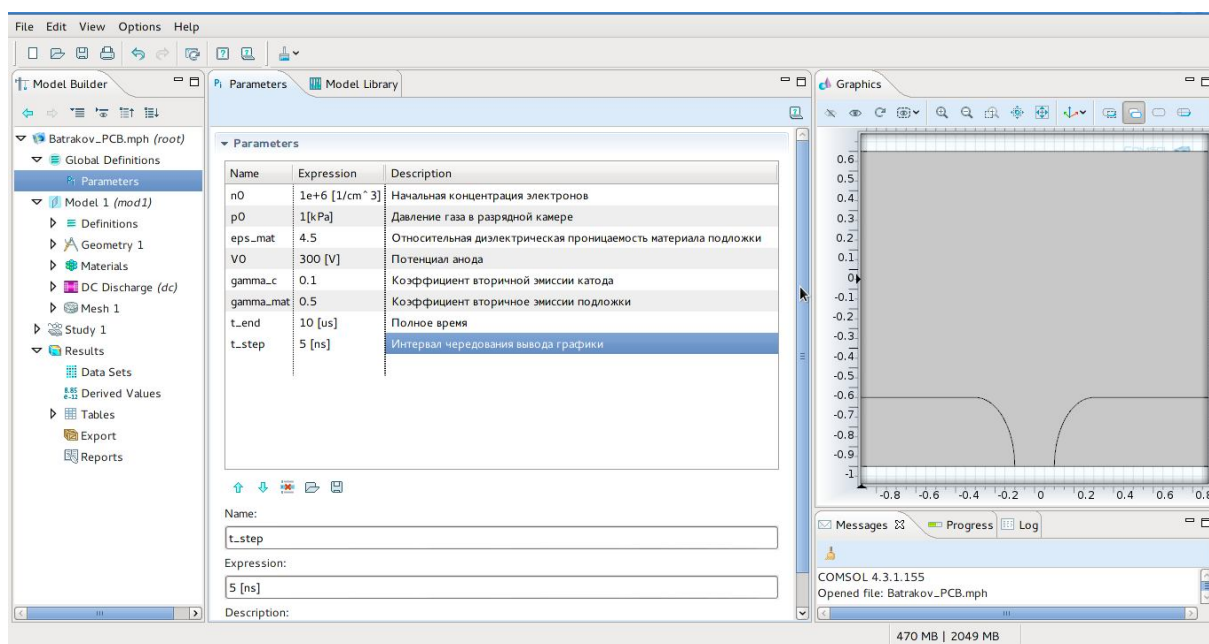


Рисунок 1.1 – Изображение интерфейса ввода начальных параметров

Выходные данные удобнее всего просматривать и анализировать в графическом формате. Интерфейс выходных данных показан на рисунке 1.2. Здесь можно посмотреть графические данные в виде цветовой денситограммы концентрации плазмы (electron density), электрического потенциала (electric potential) или средней кинетической энергии электронов (electron temperature). Но все результаты расчетов можно записать в виде табличных данных, указав имя и место расположения файлов выходных данных во вкладке Table, как показано на рисунке 1.2.

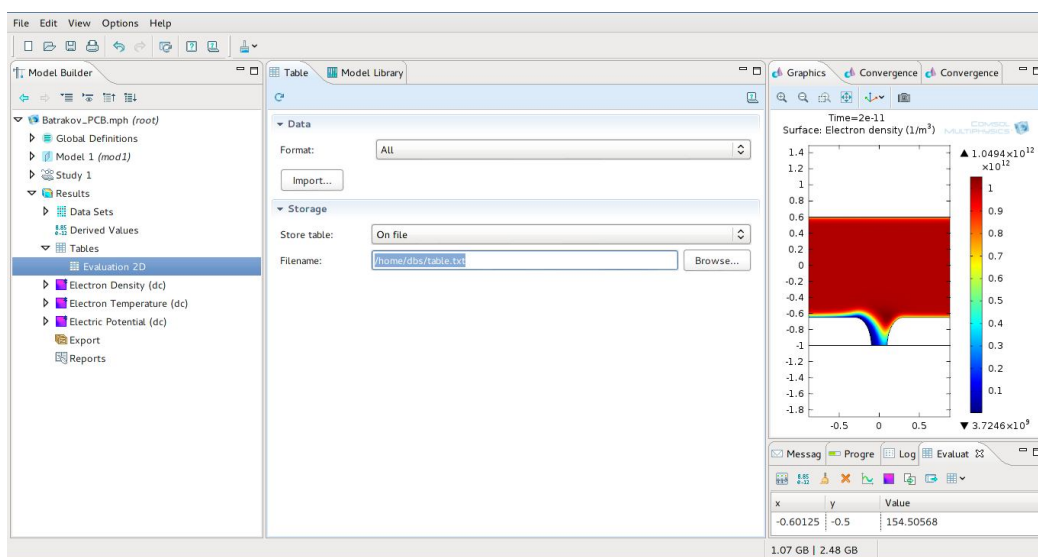


Рисунок 1.2 – Изображение интерфейса выходных данных

Все форматы выходных данных полностью совместимы с распространёнными офисными приложениями, такими как Microsoft Office, Adobe Photoshop, Paint, Corel Draw и т.п. Графические данные по желанию оператора сохраняются в форматах BMP, JPEG и PNG. Анимированная графика может быть сохранена либо в формате AVI или GIF, либо в виде кадровых снимков в форматах BMP, JPEG и PNG. Текстовые данные по выбору оператора сохраняются в виде текстовых таблиц, DAT или CSV файлов, установленных форматов.

## 1.2 Пример экспериментальных исследований численно-аналитической модели разряда между проводящими элементами печатного монтажа

В этом разделе излагаются исследования численно-аналитической модели развития разряда в различных условиях внешней среды применительно к наиболее часто встречающейся конфигурации электродов реального печатного монтажа.

Модельная геометрия, показанная на рисунке 1.3, выбрана для экспериментальных исследований численно-аналитической модели исходя из нескольких научно-практических соображений.



Рисунок 1.3 – Модельная геометрия разрядного промежутка

Во-первых, именно на диэлектрических подложках чаще всего располагаются шины печатного монтажа электрических цепей. Во-вторых, самым слабым местом в отношении электрической прочности газоразрядных промежутков являются места контакта металлических электродов и диэлектриков, особенно если в этих точках имеет место большая величина напряженности электрического поля. В-третьих, такая конфигурация электродной системы наиболее трудна для теоретического

анализа на возможность пробоя, так как влияние диэлектрика сильно усложняет расчет электрических полей и токов в плазме разряда.

В соответствии с программой экспериментальных исследований модели были просчитаны сценарии развития разряда в показанной на рисунке 1.1 геометрии, при различных давлениях рабочего газа. Кратчайшее расстояние между электродами вдоль диэлектрика было 0,2 мм, а напряжение на промежутке равнялось 300 В.

На рисунках 1.4 – 1.6 показаны выборочные стадии развития пробоя промежутка при различных давлениях рабочего газа. В левых колонках представлены пространственные распределения концентрации плазмы, а в правых – электрического потенциала в один и тот же момент времени от начала пробоя (время указано в секундах в верхней строчке каждого рисунка).

Во всех описанных ситуациях пробой начинает развиваться с области максимального поля на стыке плоской и искривленной части металлической шины, а потом перемещается в межэлектродную область.

Следует отметить, что момент пробоя удобнее всего идентифицировать с началом заметного перераспределения электрического потенциала в результате наработки плазмы в разрядном промежутке. На рисунках 1.4 – 1.6 эти моменты соответствуют временам 0,6 мкс, 0,1 мкс и 0,25 мкс соответственно. Как видно, пробой наиболее быстро формируется при средних давлениях (в данном случае 10 кПа). Так и должно быть, потому что при низких давлениях очень высока константа ионизации рабочего газа из-за высокой приведенной напряженности поля  $E/p$ , но сравнительно низка концентрация ионизируемых атомов газа. А при высоких концентрация атомов высокая, но вероятность их ионизации существенно ниже из-за резкого снижения отношения  $E/p$ .



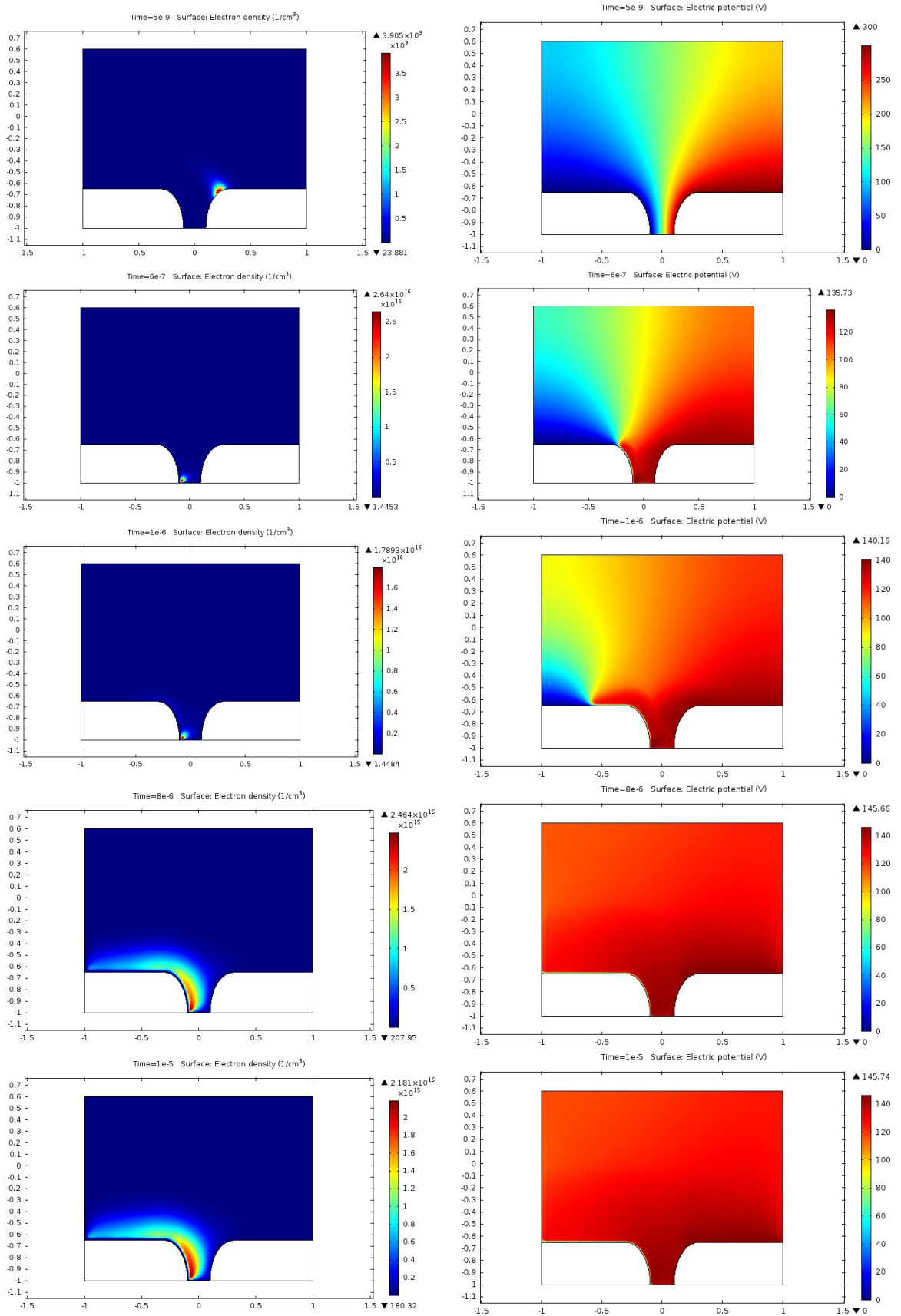


Рисунок 1.4 – Эволюция разряда при давлении 100 кПа,  $U = 300$  В

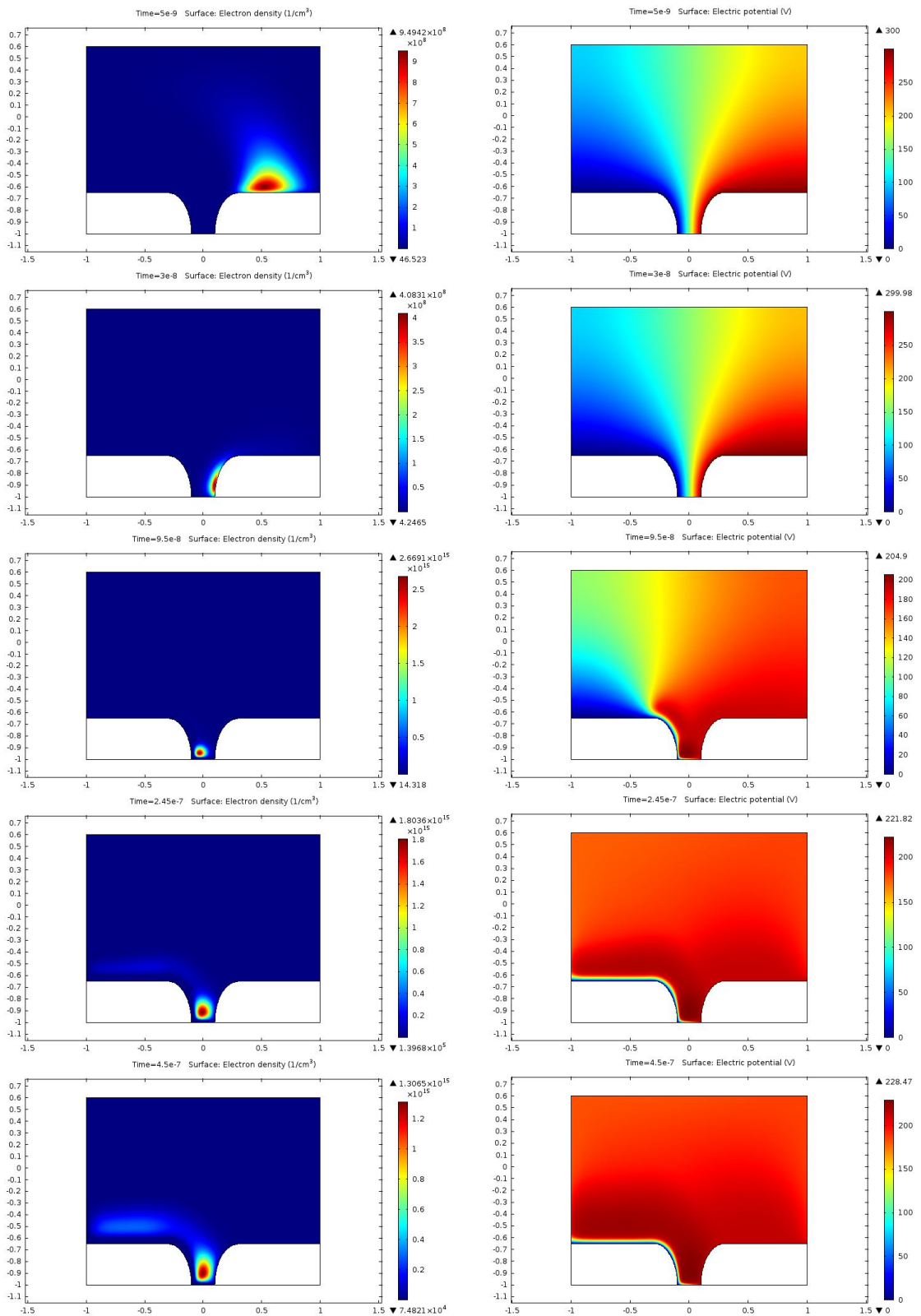


Рисунок 1.5 – Эволюция разряда при давлении 10 кПа,  $U = 300$  В

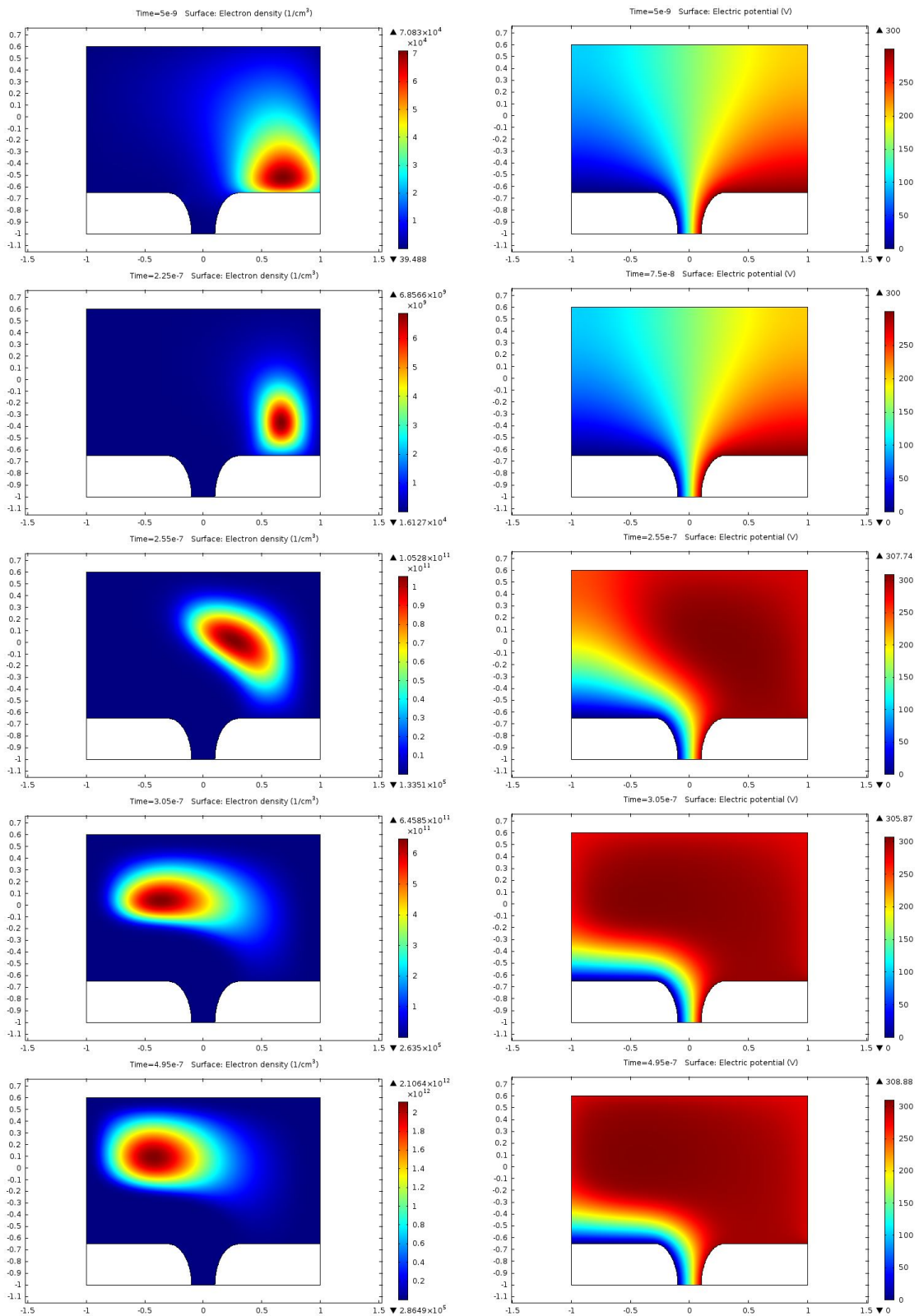


Рисунок 1.6 – Эволюция разряда при давлении 1 кПа,  $U = 300$  В

При низком давлении плазмы нарабатывается уже не в промежутке, а вне его, так как там именно там наиболее вероятна ионизация атомов из-за

протяженности необходимой для ионизации области. При этих давлениях основной межэлектродный промежуток «расположен на левой ветви кривой Пашена». Минимум напряжения на кривой Пашена для аргона имеет место при  $pd \sim 2 \text{ см} \cdot \text{Тор} = 2,7 \text{ мм} \cdot \text{кПа}$ , а рассматриваемый промежуток на порядок длиннее. В этом случае пробой развивается по длинному пути. Поэтому, в частности, и время формирования разряда начинает расти по сравнению со временем пробоя при средних давлениях.

Естественно ожидать, что при дальнейшем понижении давления разряд вообще не сможет сформироваться. Это и подтвердили расчеты: при давлении ниже 1 кПа ионизация газа практически прекращалась из-за разреженности газовой среды, и пробой не происходил ни при каких анодных напряжениях вплоть до 1000 В.

Во всех выше приведенных рисунках напряжение на электродах равнялось 300 В, так как напряжение в 100 В не приводило к формированию самостоятельного разряда ни при каких давлениях. На рисунке 1.7 показан пример расчета ситуации, когда пробой не происходит из-за низкого напряжения. Несмотря на изменения в концентрации из-за дрейфа заряженных частиц, концентрация остается очень низкой, и распределение потенциала не искажается.

Это результат полностью соответствует известным механизмам поддержания самостоятельного разряда в газе: такой разряд не может существовать при падении напряжения ниже минимума кривой Пашена, которое для аргона равно примерно 200 В [1, гл. 13].

Созданная программная реализация численно-аналитической модели пробоя позволяет рассчитать пространственно-временную эволюцию разряда при различных геометриях электродов в широком диапазоне начальных данных.

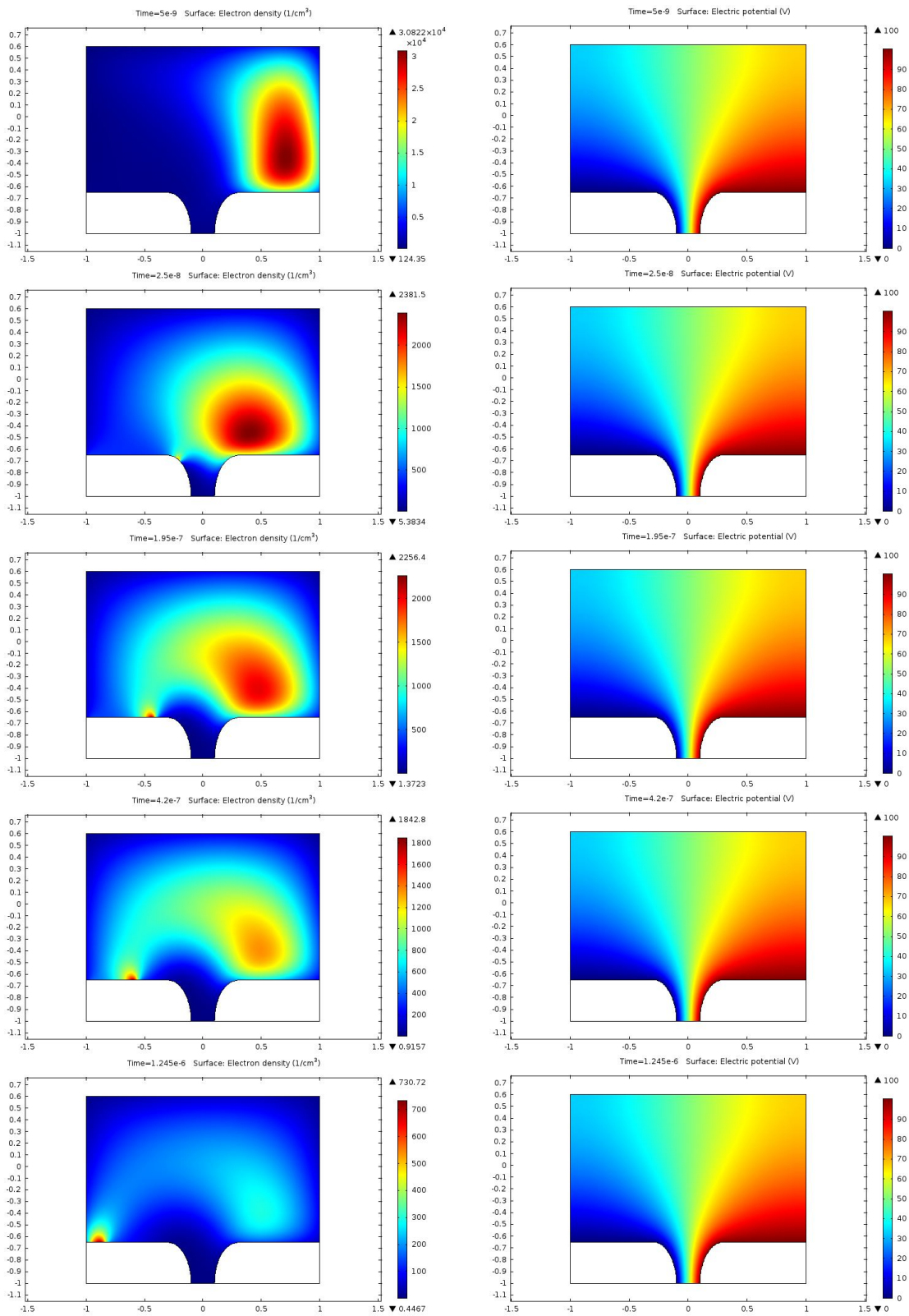


Рисунок 1.7 – Эволюция разряда при давлении 1 кПа,  $U = 100$  В

### 1.3 Пример экспериментальных исследований численно-аналитической модели разряда между проводящими шинами, покрытыми слоем диэлектрика с дефектом

В этом разделе излагаются исследования численно-аналитической модели развития разряда в геометрии, соответствующей конфигурации электродов реального эксперимента по инициированию дугового разряда, которая показана на рисунке 1.8.

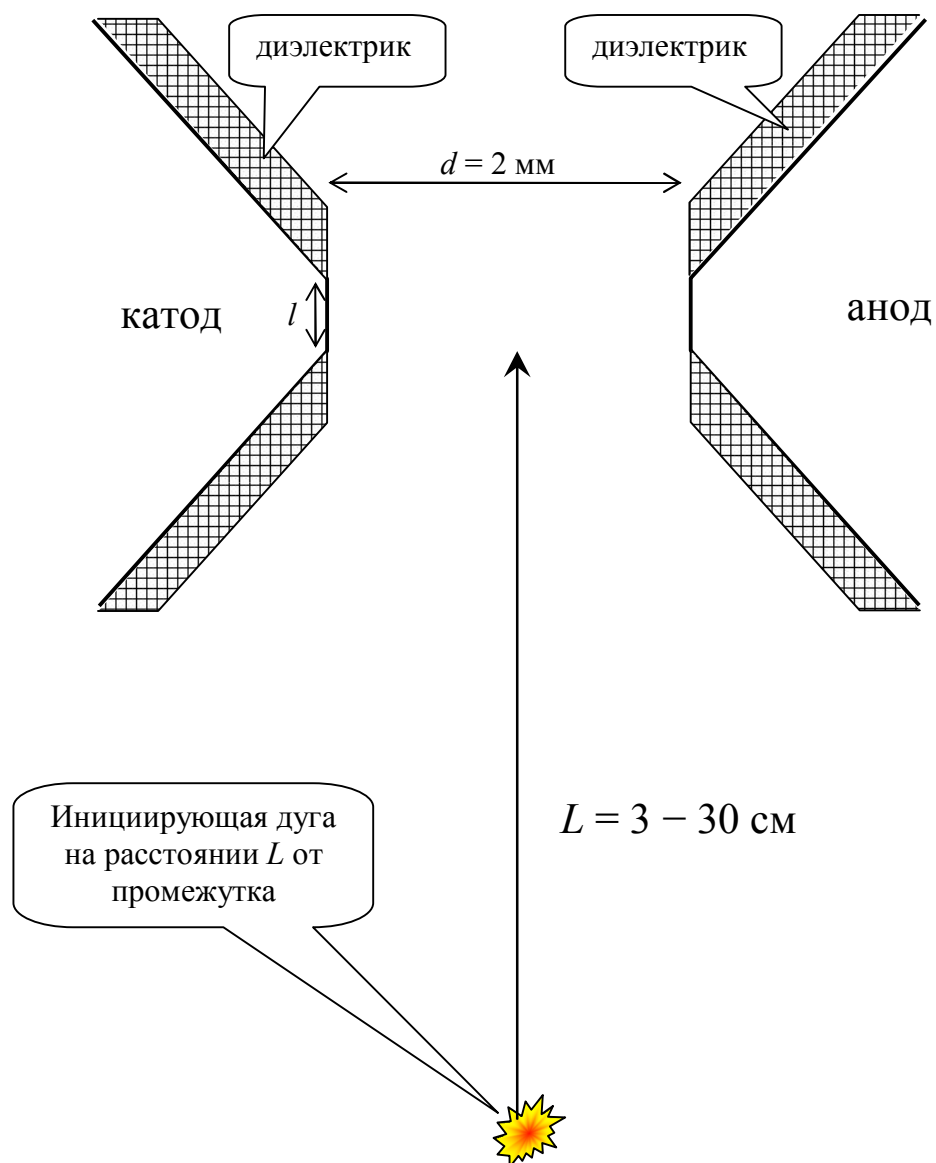


Рисунок 1.8 – Геометрия разрядного промежутка с эксперименте по инициированию дугового разряда между проводящими шинами, покрытыми слоем диэлектрика с дефектом на острой кромке



Две одинаковые параллельные металлические шины прямоугольного сечения, покрытые диэлектриком толщиной 50 мкм и  $\varepsilon = 4$ , с дефектом покрытия – срезанной вершиной (ширина открытой металлической поверхности  $l = 70$  мкм). Расстояние между шинами  $d = 2$  мм. Напряжение на аноде 100 В.

На расстоянии  $L = 3 - 30$  см от центра промежутка инициируется источник плазмы. Этот источник создает начальную ионизацию среды с концентрацией, которую можно рассчитать по формуле:

$$n(r, t = 0) = 10^{17} \text{ см}^{-3} \cdot \left( \frac{50 \text{ мкм}}{r} \right)^2, \quad (1.1)$$

где  $r$  отсчитывается от точки, расположенной на расстоянии  $L$  от центра промежутка.

Поскольку зазор 2 мм много меньше расстояния  $L$  до инициирующего источника, то можно приближенно полагать, что начальная концентрация плазмы (то есть электронов и однократных ионов) примерно однородна и равна

$$n_0(t = 0) = 10^{17} \text{ см}^{-3} \cdot \left( \frac{50 \text{ мкм}}{L} \right)^2. \quad (1.2)$$

В соответствии с программой экспериментальных исследований численно-аналитической модели процессов возникновения дуговых разрядов в бортовом оборудовании в условиях космического пространства (пункты 4.7 – 4.11 программы 14.514.11.4076.ПМ) были проведены расчеты эволюции разряда после его инициирования потоком плазмы от внешнего источника, удаленного на различное расстояние  $L$  от центра разрядного зазора.

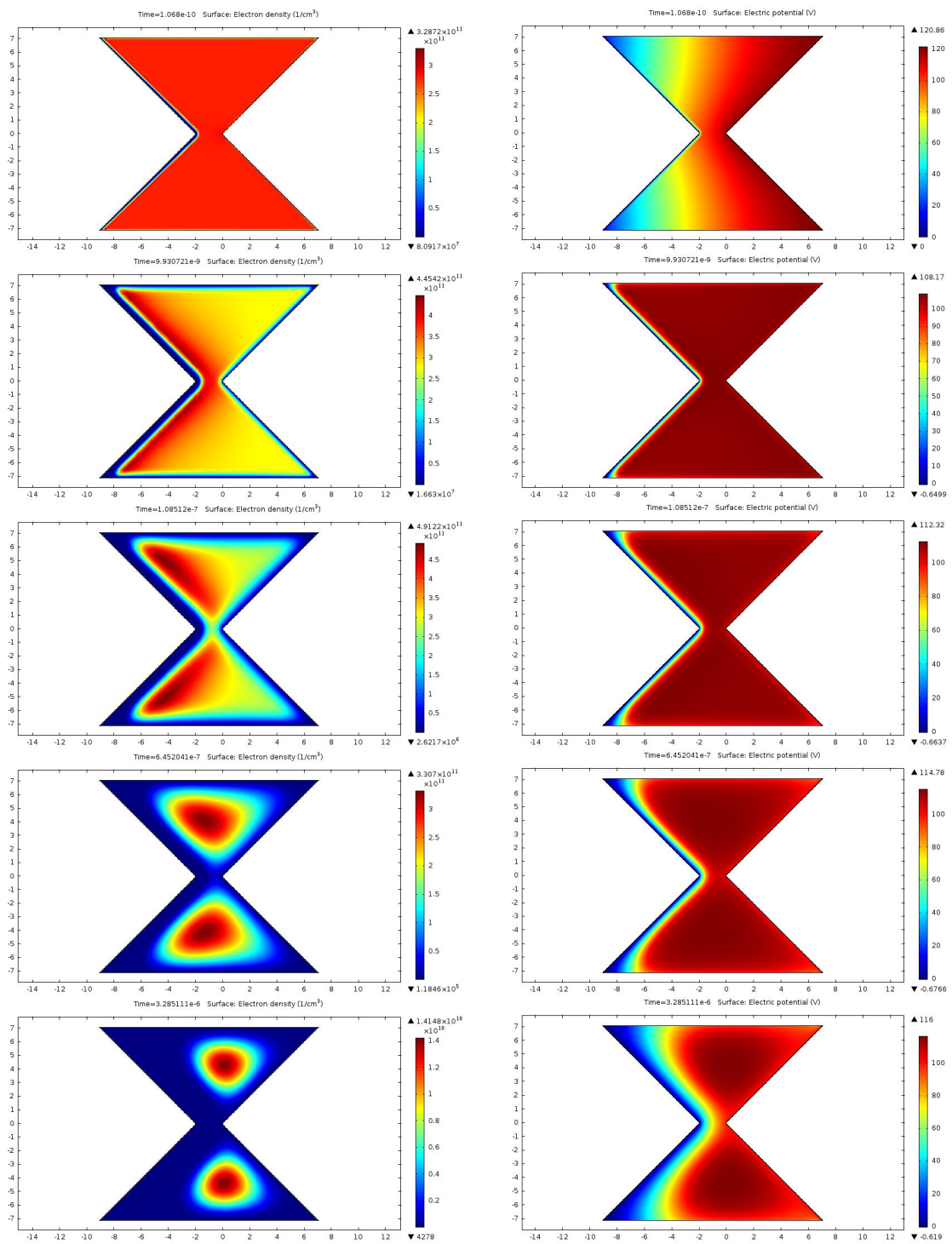
Расчеты показали, что для напряжения на аноде 100 В промежуток, заполненный аргоном при давлении от 100 Па и ниже, не пробивается ни при каких удалениях инициирующей дуги. В целом эволюция разряда в этих режимах показана на рисунке 1.9. При этом начальная плазма на начальной стадии практически полностью экранирует электрическое поле в промежутке, но затем происходит ее распад из-за недостаточно высокой

интенсивности ионизационных процессов при низких давлениях газа. Увеличение скорости ионизации при увеличении анодного напряжения до 180 В приводит все-таки к пробое промежутка даже при столь низких давлениях. Это демонстрируется на рисунке 1.10.

Повышение давления газа (аргона) до 1 кПа достоверно обеспечивает формирование самостоятельного разряда при анодном напряжении всего 100 В при наличие в промежутке иницирующей плазмы внешнего источника во всем диапазоне его удаления от 3 до 30 см до центра испытываемого зазора. Картина пробоя при  $L = 9$  см показана на рисунке 1.11, при других расстояниях меняется только время развития пробоя, но картина в целом остается похожей. Этот результат является весьма нетривиальным, так как напряжение 100 В в два раза ниже минимального напряжения пробоя аргона в соответствии с законом Пашена.

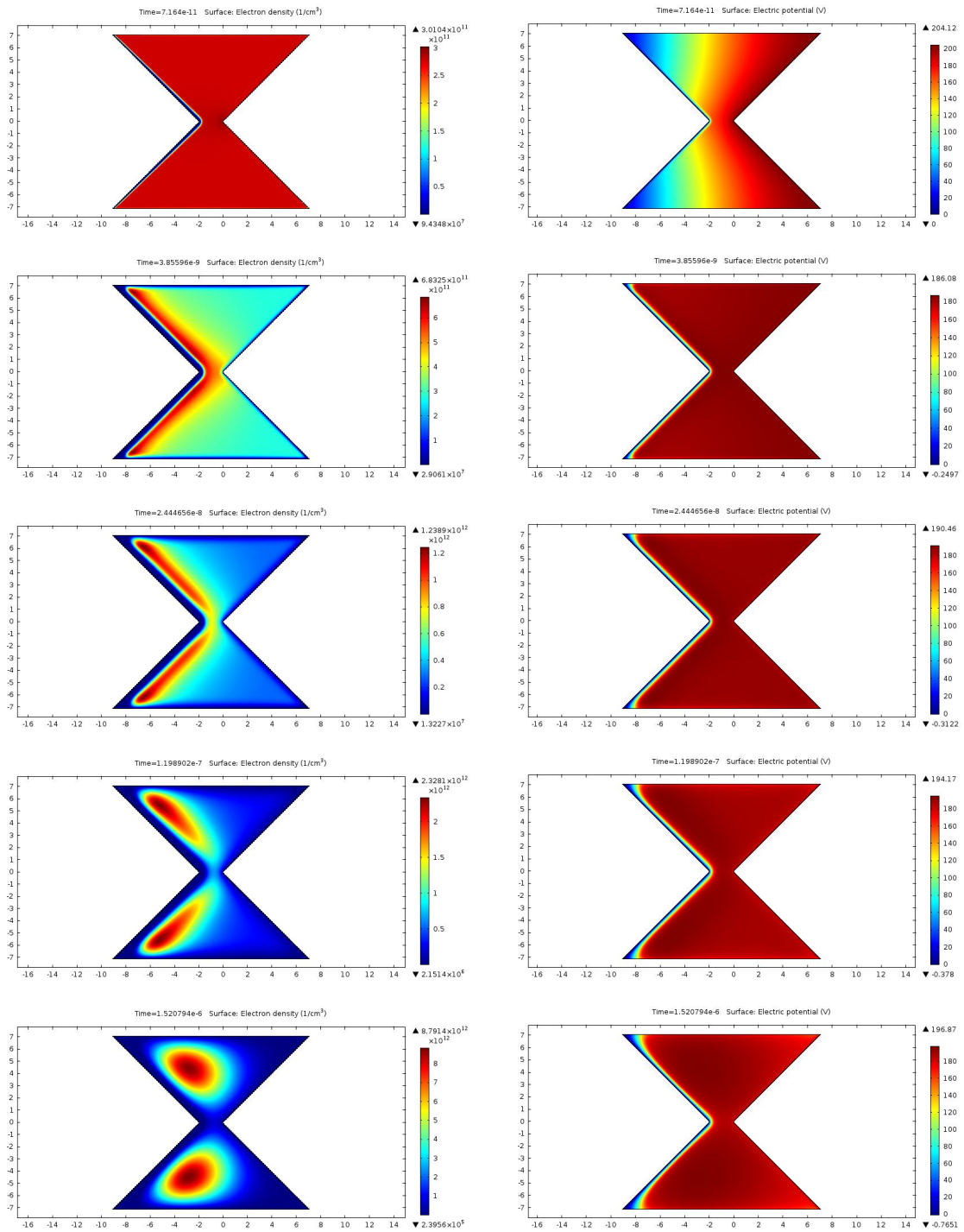
Дальнейшее увеличение расстояния от внешнего источника иницирующей плазмы до 30 см приводило к срыву самостоятельного разряда. То есть понижение начальной концентрации плазмы примерно на порядок по сравнению с той, что была на рисунке 1.11, не позволяет сформироваться разряду при анодном напряжении 100 В. Картина эволюции плазмы в этом случае показана на рисунке 1.12.

Таким образом, численно-аналитическая модель позволяет смоделировать практически все ситуации, которые наблюдаются в реальном эксперименте: распад начального плазменного состояния, формирование самостоятельного разряда при пробое промежутка высоким напряжением, формирование разряда с внешним иницированием при анодном напряжении, ниже статического пробивного значения. Сдвиг характерных режимов по давлению по сравнению с экспериментальными данными обусловлен тем, что в модели использовался аргон, а в эксперименте воздух.



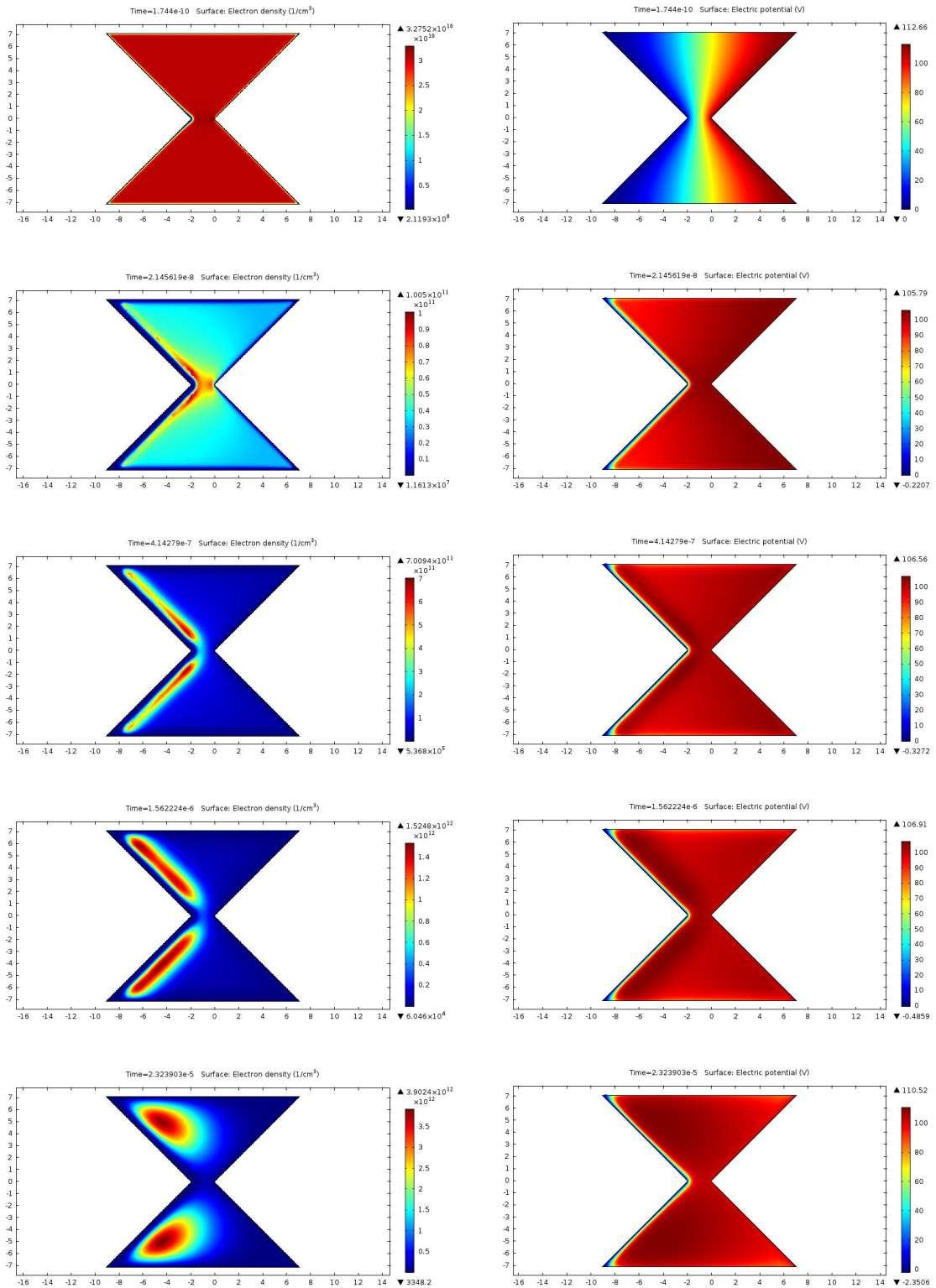
$$L = 3 \text{ см}, U = 100 \text{ В}$$

Рисунок 1.9 – Эволюция плазмы при давлении 100 Па. Распад начального плазменного состояния



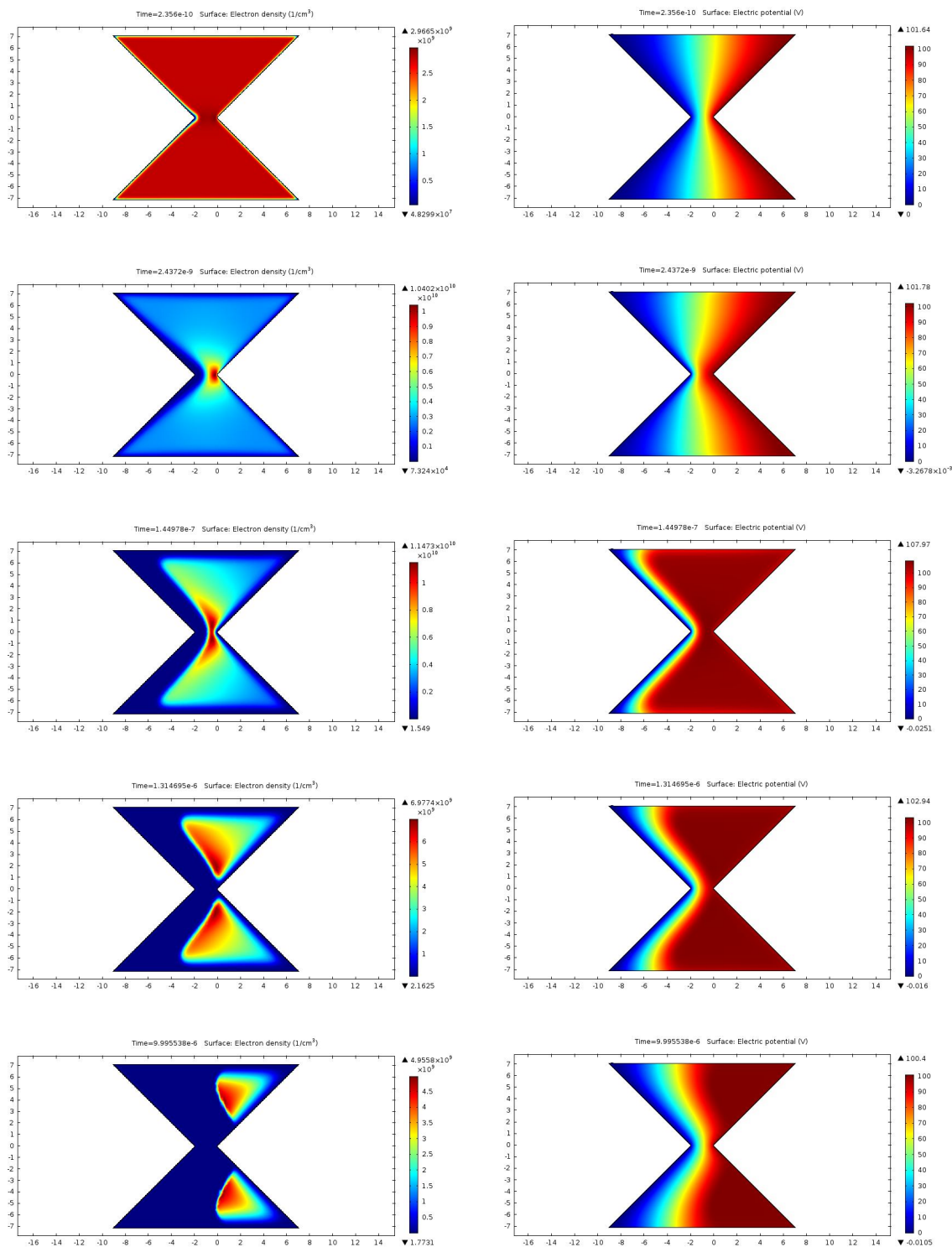
$$L = 3 \text{ см}, U = 180 \text{ В}$$

Рисунок 1.10 – Эволюция разряда при давлении 100 Па. Формирование структуры самостоятельного тлеющего разряда



$$L = 9 \text{ см}, U = 100 \text{ В}$$

Рисунок 1.11 – Эволюция разряда при давлении 1000 Па. Формируется структура самостоятельного тлеющего разряда при низком анодном напряжении



$$L = 30 \text{ см}, U = 100 \text{ В}$$

Рисунок 1.12 – Эволюция плазмы при давлении 1000 Па. Распад начального плазменного состояния

Таким образом, численно-аналитическая модель позволяет смоделировать практически все ситуации, которые наблюдаются в реальном эксперименте: распад начального плазменного состояния, формирование



самостоятельного разряда при пробое промежутка высоким напряжением, формирование разряда с внешним инициированием при анодном напряжении, ниже статического пробивного значения. Сдвиг характерных режимов по давлению по сравнению с экспериментальными данными обусловлен тем, что в модели использовался аргон, а в эксперименте воздух.

#### **1.4 Моделирование пробоя промежутка с различными газами**

Аргон был выбран в качестве модельного рабочего газа из следующих соображений. Это наиболее изученный газ, для которого в свободном доступе имеются все количественные данные сечений элементарных взаимодействий. Кинетика ионизации этого газа предельно проста: можно учитывать только ударную ионизацию электронами из основного состояния атома (ступенчатая ионизация из возбужденного состояния становится значимой только при очень высоких уровнях ионизации). По этой причине удалось создать программный продукт по расчету разряда, максимально близкий реальной ситуации.

После отработки режимов расчета были сделаны попытки запустить программу для других газовых сред: азота и кислорода. Эти газы являются двухатомными, и поэтому кинетика ионизации у них на порядок сложнее, чем у аргона. Так, приходится учитывать потери энергии электронов на колебательных степенях свободы, наличие возбужденных молекул, кроме ионизации и возбуждения требуется учесть процессы диссоциации молекул на атомы. Это, в свою очередь, приводит к необходимости записывать дополнительные уравнения по переносу ионов различных сортов (одно- и двухатомные). Кроме того, кислород, который является сильно выраженным электроотрицательным газом, образует в разряде не только положительные, но и отрицательные ионы, а это еще одно уравнение переноса.

Была сделана попытка расчета пробоя азота, которая закончилась относительной неудачей. А именно, программа расчет модели ведет, но скорость счета упала в десятки раз по сравнению с аргоновой средой. Если учесть, что один вариант расчета с простейшей кинетикой ионизации аргона требовал от 20 минут до 3 часов (в зависимости от давления газа), то ожидаемое время счета молекулярного газа возрастало до нескольких суток. В этой связи экспериментальная проверка численно-аналитической модели была осуществлена путём проведения дальнейшего физического моделирования в соответствии с Программой исследований, добавленной дополнительными измерениями, выполненными в аргоне. Такая мера позволила осуществить сшивку численного моделирования с физическим моделированием и осуществить адекватную проверку модели. В соответствии с Программой исследований были проведены экспериментальные исследования инициирования вторичной дуги в атмосфере воздуха, что позволило сравнить процессы в атомарного газа (аргона) и молекулярного газа (воздуха).

### **1.5 Моделирование первичного и вторичного дугового разряда**

В соответствии с пунктом 6.9 Методики исследований была осуществлена проверка по пунктам 4.7 – 4.12 Программы исследований. С этой целью была реализована схема для физического моделирования, изображённая на рисунке 1.13. Данная схема подобна схеме, приведённой в пункте 6.9 Методики, но имеет отличия, не нарушающие принцип функционирования схемы. Предполагаемое использование жидкометаллического катода для облегчения инициирования первичного разряда оказалось проблематичным в атмосфере воздуха из-за сильного окисления металла, препятствующего течению жидкости в область эмиссии. Проблема была решена использованием поджигающего разряда по поверхности диэлектрика. Для инициирования дугового разряда использовался импульс высокого напряжения амплитудой порядка 15 кВ

длительностью менее 1 мкс. Источник воздействия, используемый для испытания элементов РЭА и БКС КА к дугообразованию, должен моделировать выход из строя ЭРИ изделия внутри аппаратуры, сопровождаемый горением первичной дуги. Для питания первичной дуги должна использоваться разрядная цепь, состоящая из ёмкости и резистора, параметры которых подбираются таким образом, чтобы при напряжении, равном напряжению бортовой кабельной сети, ток первичной дуги при испытаниях был подобен по длительности и амплитуде току первичной дуги в реальных условиях эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов. Воздействие первичного дугового

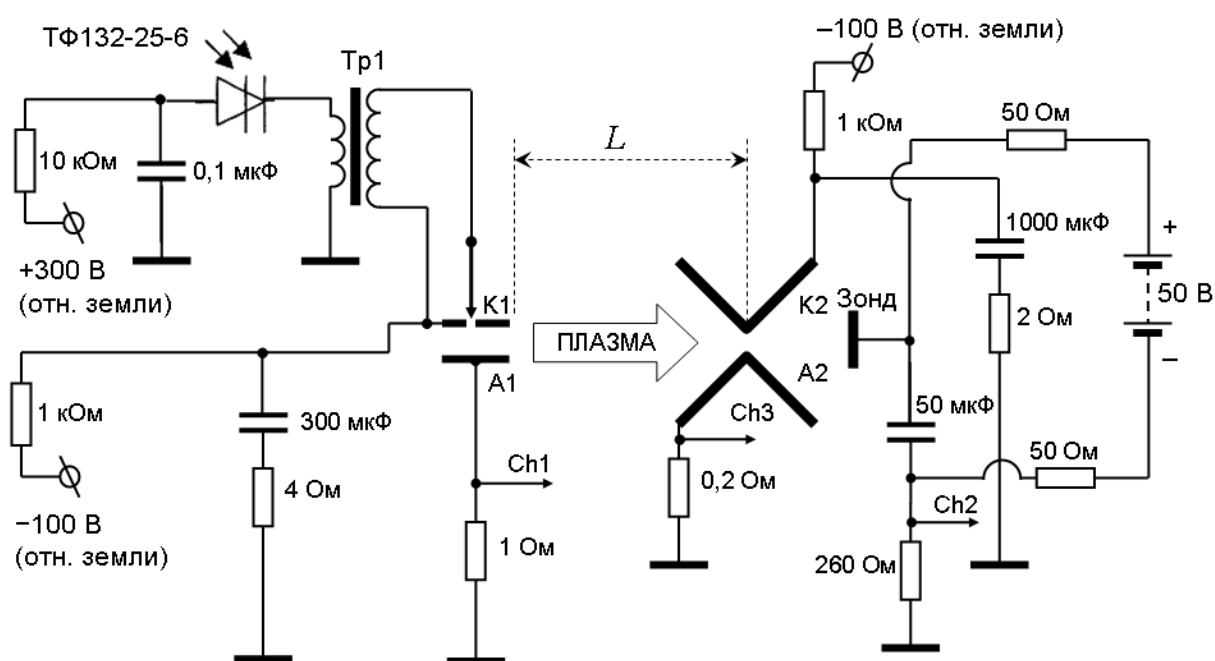


Рисунок 1.13 – Электрическая схема, используемая при физическом моделировании. Обозначения: K1, A1 и K2, A2 – катоды и аноды первичной и вторичной дуги соответственно.

разряда на испытываемый элемент должно соответствовать напряжению бортовой кабельной сети, и область возможного влияния поджигающего высоковольтного импульса не должна распространяться за пределы разрядного промежутка первичного дугового разряда. Именно поэтому длительность импульса высокого напряжения была сокращена до времени

менее 1 мкс, что не превышает время распространения плазмы, образуемой от протекания импульса тока высокого напряжения, вдоль поверхности электродов первичного разряда. В процессе испытания осуществлялась регистрация токов в испытываемом элементе радиоэлектронной аппаратуры, находящемся под напряжением бортовой кабельной сети. Геометрия разрядного промежутка первичного дугового разряда выбиралась таким образом, чтобы обеспечивать надёжное инициирование дуги в диапазоне давлений окружающей среды от атмосферного до соответствующего глубокому вакууму. Также при испытаниях регистрировалось оптическое излучение. Появление тока в изолирующем промежутке, превышающего пороговый ток дуги, сопровождаемое появлением света в промежутке интенсивностью, характерной для дугового разряда, идентифицировалось как инициирование вторичного дугового разряда и недостаточную стойкость элемента к дугообразованию.

Типичный набор осциллограмм токов, регистрируемых каналами Ch1, Ch2 и Ch3 (см. рисунок 1.13) представлены на рисунке 1.14.

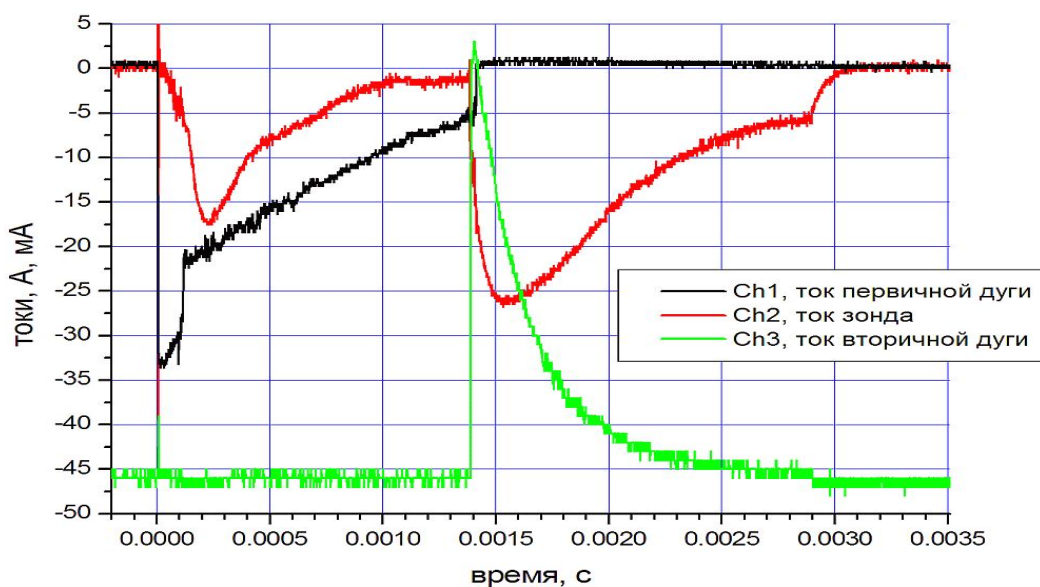


Рисунок 1.14 – Типичный набор осциллограмм первичной и вторичной дуги и тока зонда. Осциллограмма тока зонда инвертирована.

Осциллограмма тока вторичной дуги инвертирована,  
и её нулевая линия смещена вниз

На осциллограмме тока зонда отчётливо видны два пика, первый из которых вызван потоком плазмы первичной дуги, второй – потоком плазмы вторичной дуги. Время запаздывания вторичной дуги относительно первичной дуги не связано с временем пролёта плазмой первичной дуги расстояния  $L$ , равного 3 см для данного опыта. Распространяясь со скоростью порядка 10 км/с, плазма первичной дуги преодолевает 3 см за 3 мкс, в то время как время запаздывания составляет примерно 1 мс. Следует отметить, что время запаздывания, лежащее в микросекундном диапазоне длительностей, являлось скорее редким событием. Это свидетельствует о том, что пробой вторичного промежутка связан с процессами ионизации остаточного газа в самом промежутке, стимулированными плазмой и излучением первичного разряда.

На рисунке 1.15 приведены фотографии разрядного промежутка первичной дуги в собранном состоянии (а) и во время эксперимента (б) в атмосфере разреженного воздуха. Катод расположен на фотографиях сверху.

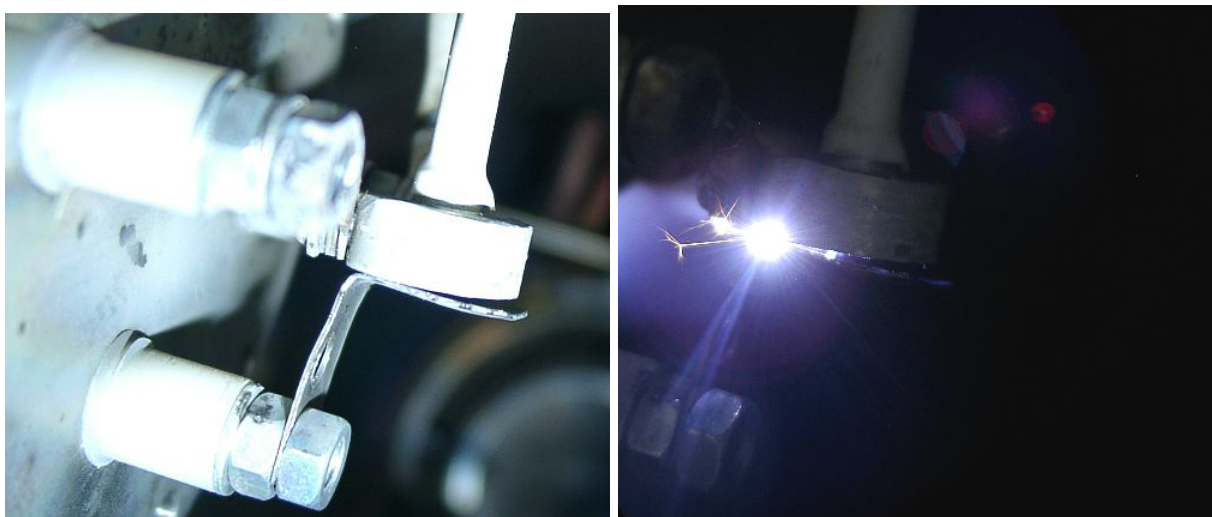


Рисунок 1.15 – Фотографии разрядного промежутка первичной дуги в собранном виде (а) и во время эксперимента в атмосфере разреженного воздуха (б).

На рисунке 1.16 приведена фотография вторичной дуги, инициированная на сегменте печатной платы.

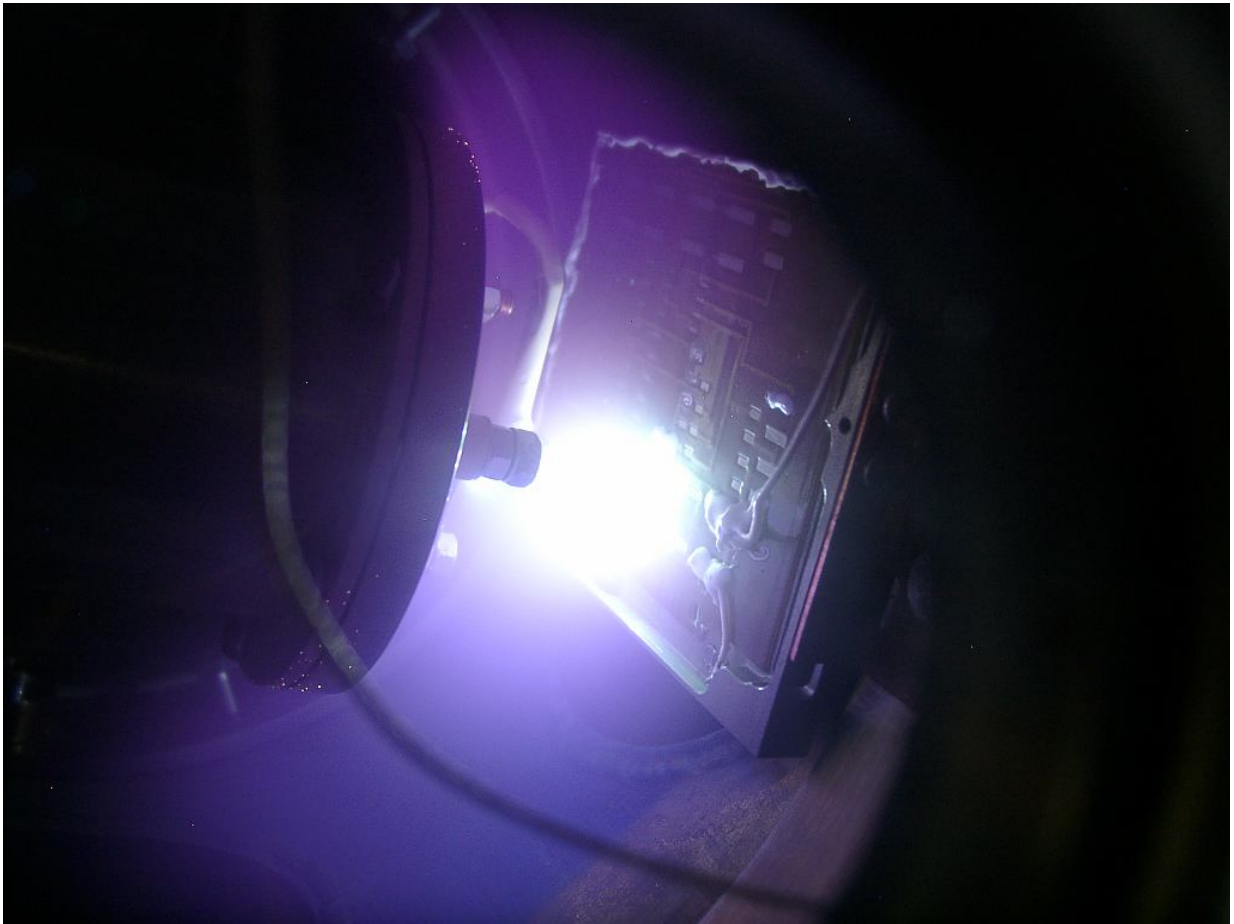


Рисунок 1.16 – Фотография вторичной дуги, инициированной на сегменте печатной платы во время эксперимента в атмосфере разреженного воздуха.

### **1.6 Моделирование зондовых измерений плотности плазменного потока первичного дугового разряда**

Моделирование зондовых измерений осуществлялось в соответствии с [2]. Для обеспечения максимальной чувствительности на стадии подготовки Методики исследований была выбрана ветвь электронного тока насыщения вольтамперной характеристики зонда Ленгмюра. Основанием для такого выбора является более высокая чувствительность метода в области низких концентраций плазмы, ожидаемых в эксперименте в силу значительного удаления источника первичной плазмы от испытываемых модельных промежутков.

Не менее важным аргументом в пользу использования электронной ветви насыщения зондовой характеристики является тот факт, что при давлении 1 Па и выше начинает «работать» диффузионное приближение, интерпретация данных, полученных с использованием ионной ветви зондовой характеристики требует большей осторожности в использовании модельных представлений.

Диффузионное приближение для электронной ветви начинается при давлениях порядка 100 Па [2] несмотря на то, что длина свободного пробега электронов становится много меньше размеров зонда уже при 10 Па. Дело в том, что в результате столкновений электрон отдаёт незначительную долю своей энергии, и для необходимости использования диффузионного приближения требуется выполнения более жёсткого условия на значительное превышение размеров зонда характерной длины релаксации энергии электронов. При достижении данного условия реализуется режим сплошной среды.

В случае, когда действуют бесстолкновительный и диффузионный режимы функционирования зонда регистрация электронного тока насыщения на зонд позволяет простым методом измерять электронную концентрацию плазмы. Электронная концентрация плазмы в окрестности зонда

$$n_e(t) = \frac{4j_e(t)}{ev_{eT}}, \quad (1.3)$$

где

$$v_e = \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}} \quad (1.4)$$

тепловая скорость электронов,

$$j_e(t) = i_p(t) / S_e(t) \quad (1.5)$$

плотность эмиссионного электронного тока из плазмы ( $i_p(t)$  – ток на зонд,  $S_e$  – площадь эмиссионной границы квазинейтральной плазмы вокруг зонда). В настоящей работе использовался плоский зонд площадью 5 мм<sup>2</sup>.

При давлениях 10 Па и выше следует учитывать потерю энергии электронов в процессе диффузии на зонд. В [2] отмечается, что плотность тока в режиме сплошной среды уменьшается в  $(0.75R_0+\lambda_e)/\lambda_e$  раз, где  $\lambda_e$  – длина свободного пробега электрона в среде,  $R_0$  – характерный размер зонда (в нашем случае можно принять равным 0,1 см). Соответственно, при одном и том же токе вычисляемые значения концентрации в режиме сплошной среды должны быть в  $(0.75R_0+\lambda_e)/\lambda_e$  раз выше значений, вычисляемых по (1.3). В свою очередь, длина свободного пробега в газе вычисляется [2] как

$$\lambda_e = \frac{(kT_e)^2}{\pi n_e e^4 \Lambda}, \quad (1.6)$$

где  $\Lambda$  – кулоновский логарифм, в нашем случае имеющий значение порядка 10.

Результат зондовых измерений в области испытываемого промежутка представлен на рисунке 1.17 для воздуха и на рисунке 1.18 для аргона.

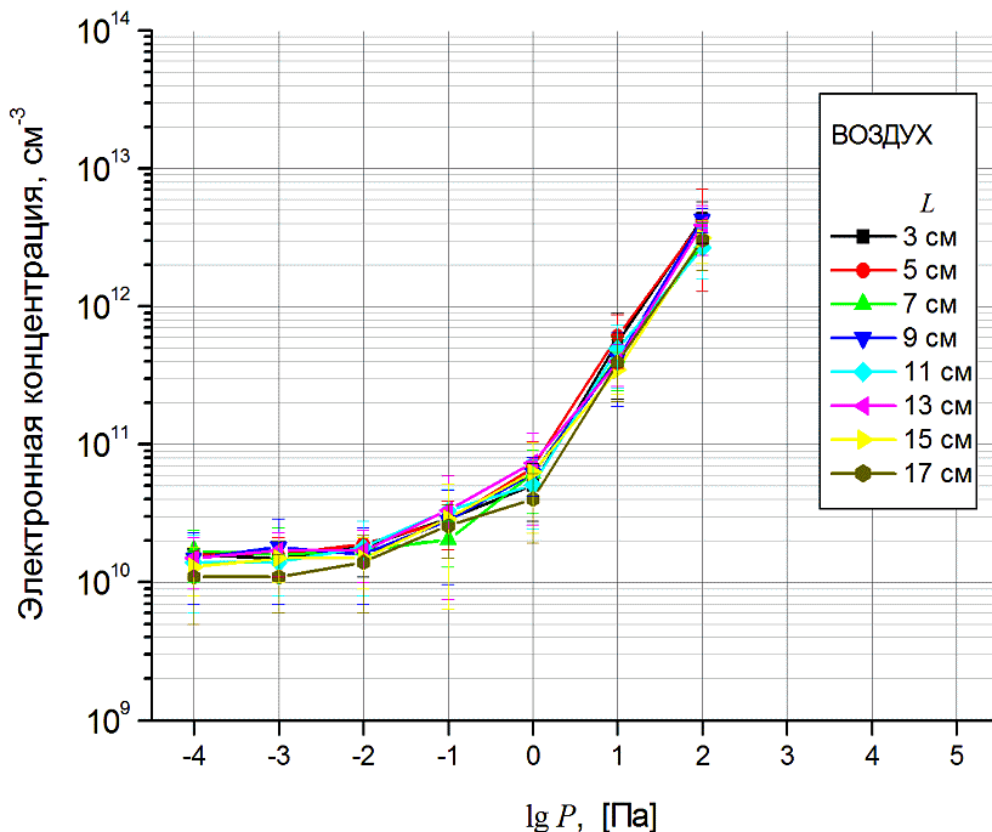


Рисунок 1.17 – Зависимости электронных концентраций от давления воздуха для разных расстояний  $L$ .



Характеристики измерялись с шагом по давлению в один порядок величины в соответствии с пунктами 4.7 – 4.11 Программы исследований.

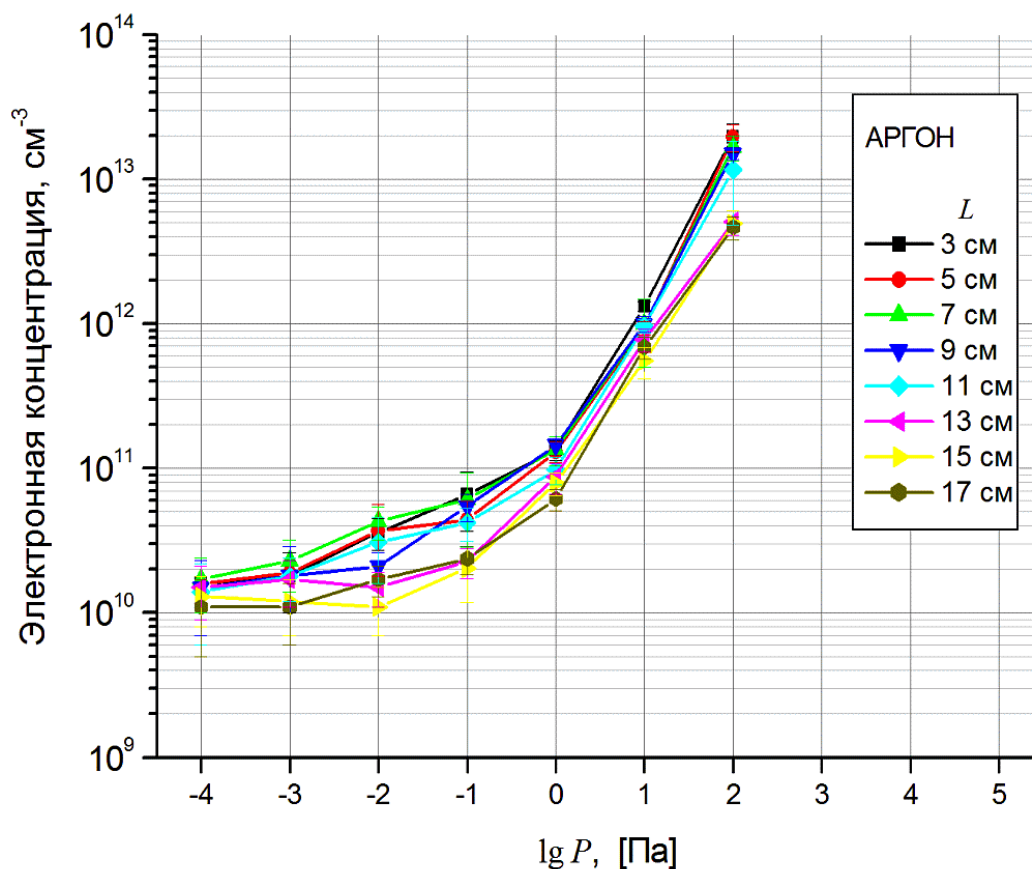


Рисунок 1.18 – Зависимости электронных концентраций от давления аргона для разных расстояний  $L$ .

Зависимости для обоих газов заканчиваются на давлении 100 Па, и на давлении 1000 Па сигнала в цепи зонда нет. Это говорит о том, что плазма первичного дугового разряда не достигает промежутка, и интенсивности УФ излучение дуги недостаточно для обеспечения степени ионизации среды, достаточно высокой для зондовых измерений.

Важным для анализа процесса инициирования вторичной дуги является тот факт, что при давлениях 10 Па и выше  $L \gg \lambda_e$ , что в сочетании с высокой измеренной концентрацией плазмы в области испытываемого промежутка указывает на значительное участие процессов объёмного плазмообразования.

Как это можно было ожидать на основании научно-технической литературы, распространение плазмы и ионизация газа в аргонной среде происходят с большей эффективностью, в результате чего при прочих равных условиях электронная концентрация плазмы в случае аргона выше. В области низкого давления, соответствующих вакууму, различий между аргоном и воздухом не наблюдается.

Зависимости концентрации плазмы от расстояния являются менее сильными, чем от давления (пример на рисунке 1.19).

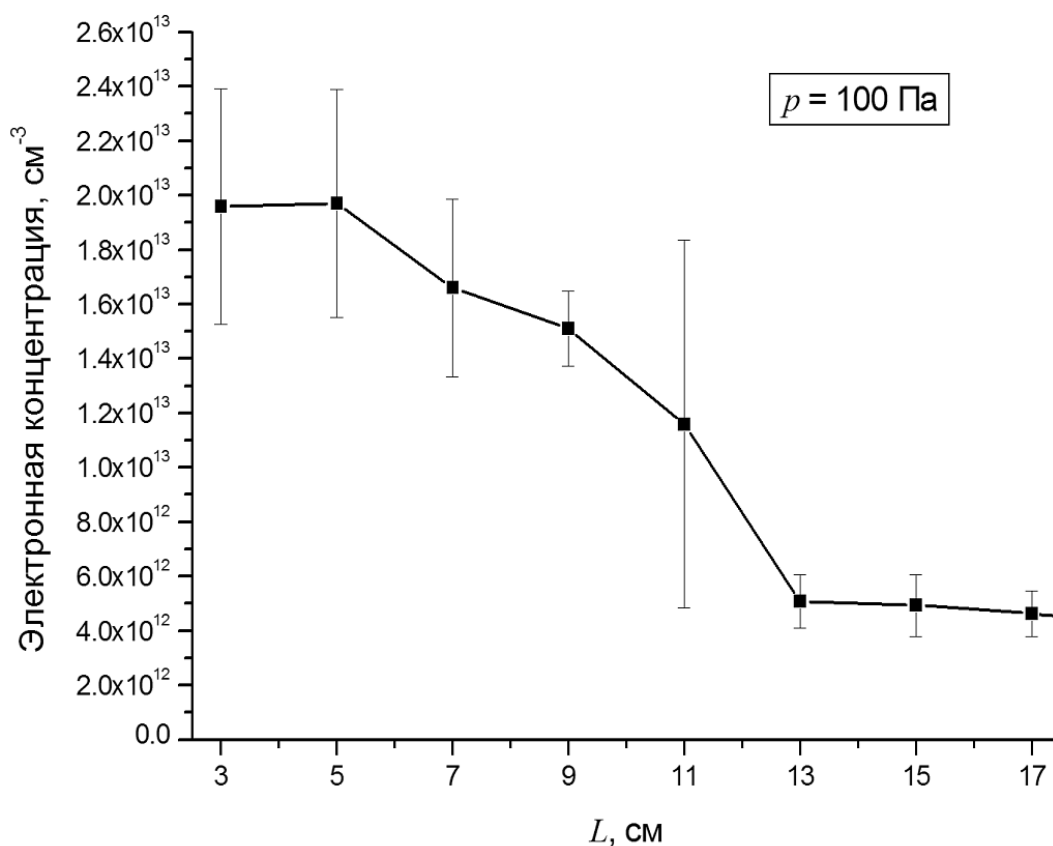


Рисунок 1.19 – Зависимость электронной концентрации от расстояния  $L$  при давлении аргона 100 Па.

Зависимости имеют особенность при расстоянии более 13 см, заключающуюся в резкой смене зависимости  $n_e$  от  $L$ . Характер особенности свидетельствует о зажигании газового разряда в полости, куда перемещается промежуток №1 для увеличения  $L$ . Данное обстоятельство привело к отсутствию зависимости  $n_e$  от  $L$  при  $L > 17$  см. Данное

обстоятельство не является препятствием для отказа от испытаний на больших расстояниях, поскольку более высокая концентрация плазмы оказывает более жёсткое воздействие на электрическую изоляцию. Кроме того, подобные эффекты имеют место и в реальных модулях РЭА КА, имеющих значительно более плотную упаковку, чем при моделировании.

Эффект полого катод, связанно с конструктивной особенностью используемых аппаратных средств, наиболее отчётливо проявился в области более низких давлений. В качестве примера на рисунке 1.20 приведена зависимость электронной концентрации плазмы от расстояния до источника плазмы, полученная в атмосфере воздуха при давлении 0.1 Па. Монотонное снижение концентрации по мере увеличения расстояния  $L$  сменяет ростом и последующей стабилизацией плотности плазмы.

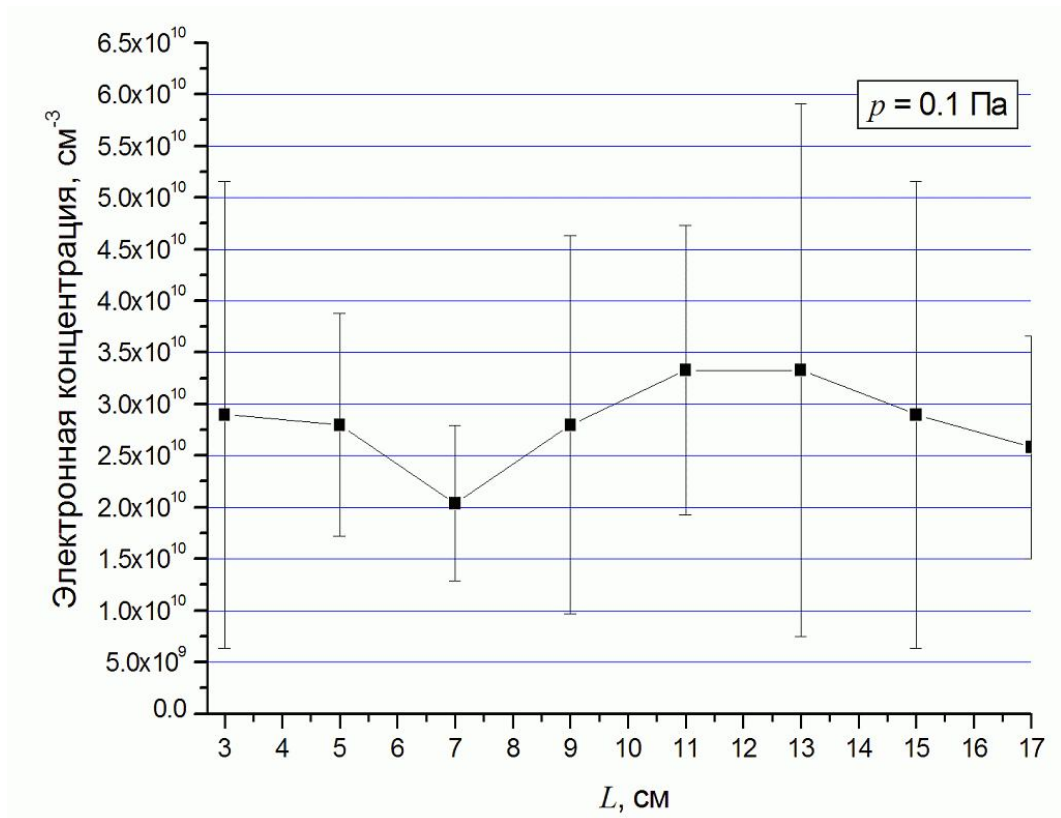


Рисунок 1.20 – Зависимость электронной концентрации от расстояния  $L$  при давлении воздуха 0.1 Па.

## **1.7 Выводы к разделу**

1) Численно-аналитическая модель процессов возникновения дуговых разрядов в бортовом оборудовании в условиях космического пространства, реализованная в среде COMSOL Multiphysics® Engineering Simulation Software обеспечивает удобство графического пользовательского интерфейса, как при формировании входного потока данных, включая задание геометрии системы, так и при анализе результатов моделирования, в том числе за счёт графического отображения результатов.

2) Осуществлена проверка модели и продемонстрирована её работоспособность в достижении критериев необратимого развития разряда с зажиганием самоподдерживающейся дуги для различных модельных объектов и в различных условиях.

3) Выполнено моделирование как непосредственно первичной и вторичной дуги для исследуемых систем, имитирующих модули РЭА, так и потоков плазмы первичной дуги, являющихся инициатором вторичной дуги.

**2 Проведение статистического и сравнительного анализа данных научно-информационных источников с результатами численного эксперимента на основе программной реализации численно-аналитической модели, включая построение зависимостей пробивного напряжения от расстояния между электродами, их материала, формы и покрытия, давления и состава газовой среды**

**2.1 Статистический анализ результатов моделирования зависимости вероятности дугообразования в зависимости от расстояния между электродами**

Моделирование процесса дугообразования в зависимости от расстояния между электродной системой промежутка № 1 и электродной системой промежутка № 2 является ключевым, поскольку определяет степень риска развития каскадных процессов при первичном процессе, приведшем к образованию первичной плазмы. Данным процессом может

служить либо ЭСР, что актуально, главным образом, для солнечных батарей и других внешних модулей БКС КА, либо короткоживущей дугой, вызванной испарением защитного проводника при выходе из строя ЭРИ, что актуально, в первую очередь, для РЭА КА. Основным фактором, приводящим к вторичному дугообразованию, является плазма первичного разряда, поэтому при моделировании фиксировалась концентрация плазмы в области промежутка № 2, образованная в результате протекания тока в промежутке № 1. Поскольку наличие напряжения в промежутке № 2 оказывает воздействие на плазму, концентрация которой регистрируется в области пространства, находящегося в непосредственной близости от промежутка № 2, но, тем не менее, расположенной за промежутком № 2, то регистрация концентрации плазмы осуществлялась без наличия разности потенциалов между электродами промежутка № 2. При проверке промежутка № 2 на устойчивость к дугообразованию при наличии разности потенциалов между электродами данного промежутка концентрация плазмы также регистрировалась, но при анализе учитывалась лишь как индикатор дугообразования, дополнительный к необратимому росту тока в промежутке, являющемуся основным индикатором дугообразования.

При моделировании выполнялись требования и использовался математический аппарат ГОСТ Р 8.563-96 ГСИ «Методики выполнения измерений» и ГОСТ 8.207-76 ГСИ «Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений». Для регистрации вероятности дугообразования для каждого набора параметров пунктов 4.7 – 4.11 Программы исследований, тип промежутка – давление – расстояние, регистрировалось количество вторичных дуг при горении 1000 первичных дуг.

Для промежутка № 2 по пункту 4.7 Программы, имеющего геометрию сегмента материальных шин без лакового покрытия, при напряжениях 100 В на промежутке № 2 и 100 В на промежутке № 1 вторичного

дугообразования зарегистрировано не было во всём диапазоне давления воздуха и во всём диапазоне расстояний  $L$  между промежутками.

На основании того, что при испарении защитного проводника в РЭА возможен всплеск напряжения при иницировании первичной дуги, были сделаны дополнительные измерения для той же конфигурации промежутков, но при напряжении на промежутке № 1, равном 180 В. При этом напряжение на промежутке № 2 всегда оставалось равным 100 В. Следует отметить, что при бóльших напряжениях, но ниже напряжения минимума кривой Пашена, источник первичной дуги становился нестабильным, и управляемое иницирование дуги в промежутке № 1 оказывалось нестабильным из-за зажигания разряда без применения иницирующего воздействия. Столь низкое напряжение не согласуется с законом Пашена для воздуха. Отклонение от кривой Пашена в данном случае может быть связано с неоднородными электрическими полями и наличием тройных точек металл–диэлектрик–вакуум. Такой режим нарушал протокол измерения вероятности дугообразования.

Для сравнения результатов измерения при напряжении 180 В на промежутке № 1 с результатами измерений при 100 В были выполнены две серии испытаний, в одной из которых ток разряда был оставлен без изменения (по сравнению с измерениями при 100 В) за счёт увеличения сопротивления, ограничивающего ток, а в другой без изменения оставлен ограничивающий резистор, что привело к увеличению тока в промежутке № 1. Физическое моделирование дугообразования во вторичном промежутке при повышенном напряжении на первичном промежутке выполнялось с шагом 2 см.

Зарегистрированные максимальные значения вероятности вторичного дугообразования в зависимости от расстояния  $L$  для промежутка № 2 в виде сегмента материальных шин с расстоянием между шинами 2 мм приведены на рисунке 2.1.

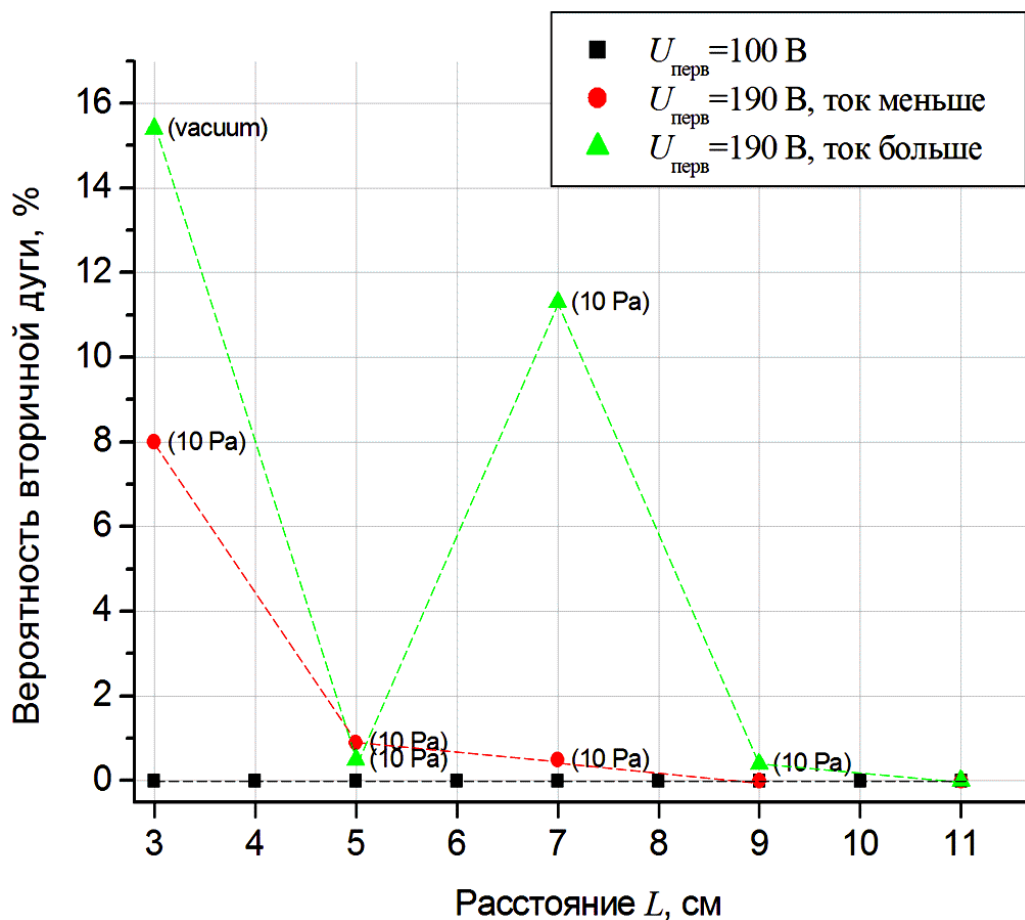


Рисунок 2.1 – Зависимости максимальной вероятности вторичного дугообразования от расстояния до источника первичной дуги для материальных шин в воздухе при различных режимах горения первичной дуги. Давления, при которых достигнута максимальная вероятность, указаны в скобках.

Из полученной зависимости можно сделать ряд принципиально важных выводов:

- Как напряжение на первичном промежутке, так и ток первичной дуги оказывают влияние на возможность дугообразования во вторичном промежутке. При этом ток разряда оказывает большее влияние, чем напряжение на промежутке.

- Преимущественным механизмом вторичного дугообразования является пробой газового промежутка. Пробой вакуумного промежутка



возможен лишь на относительно малых расстояниях от источника первичной плазмы, где концентрация первичной плазмы достаточно велика.

Для промежутка № 2 по пункту 4.8 Программы из всего многообразия возможностей формирования промежутка за счёт пар дорожек был выбран сегмент, соответствующий шинам высоко напряжения 100 В. Сегмент платы после испытаний приведён на рисунке 2.2. Расстояние по поверхности диэлектрика между дорожками составляло 0,7 см. На дорожках видны следы эрозии после горения дуг.

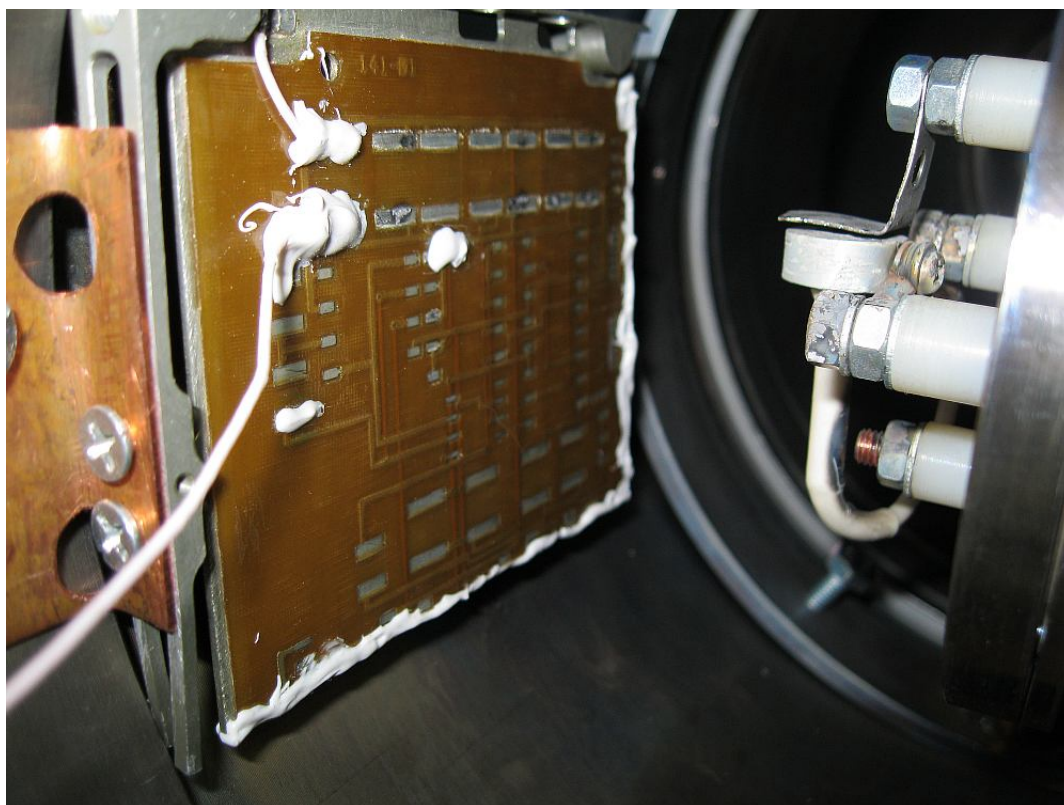


Рисунок 2.2 – Сегмент печатной платы, выбранной для физического моделирования вторичного дугообразования.

Для моделирующего элемента данного типа в атмосфере воздуха было зарегистрировано дугообразование лишь в очень ограниченных условиях. В связи с этим были выполнены дополнительные измерения в атмосфере аргона. Зависимости вероятностей вторичного дугообразования для данного модельного объекта от расстояния  $L$  приведены на рисунке 2.3. На расстояниях более 4 см дугообразования не наблюдалось.

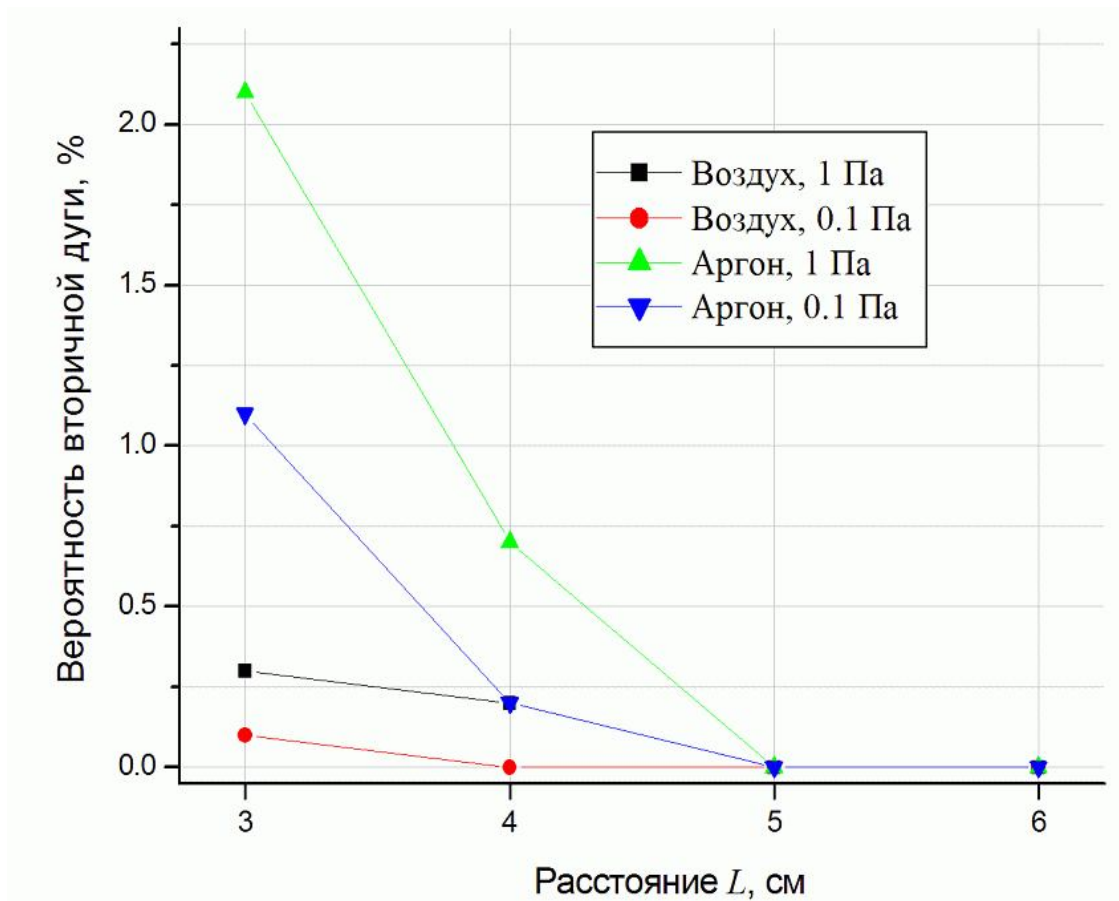


Рисунок 2.3 – Зависимости вероятности вторичного дугообразования от расстояния до источника первичной дуги для сегмента платы без покрытия в воздухе и аргоне различного давления.

Для промежутка № 2 по пункту 4.10 Программы исследований, представляющего собой сегмент материальной шины с дефектным лаковым покрытием. Характер дефекта схематически представлен на рисунке 1.18. Для данного модельного объекта были выполнены экспериментальные проверки для различных газовых сред – воздуха и аргона.

Зарегистрированные максимальные значения вероятности вторичного дугообразования в зависимости от расстояния  $L$  для промежутка № 2 в виде сегмента материальных шин с дефектным лаковым покрытием приведены на рисунке 2.4.

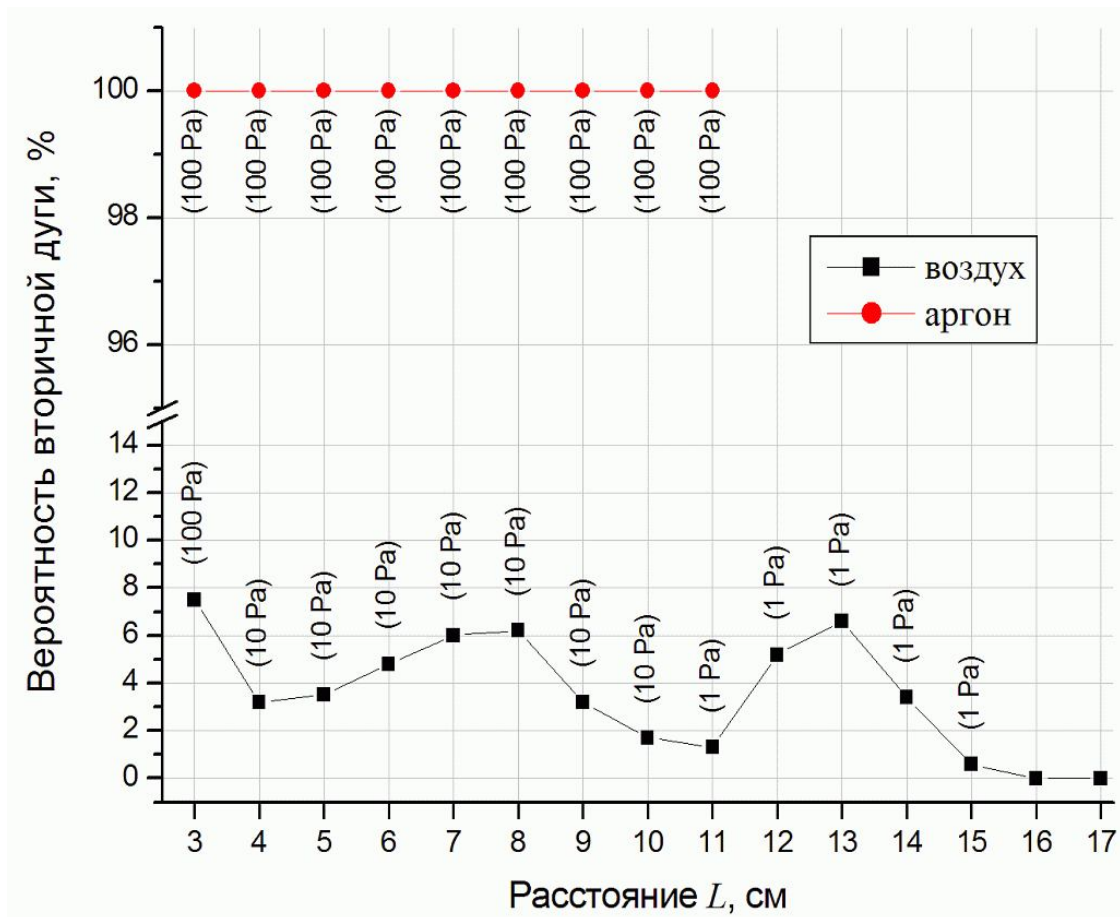


Рисунок 2.4 – Зависимости максимальной вероятности вторичного дугообразования от расстояния до источника первичной дуги для материальных шин с дефектами лакового покрытия. Давления, при которых достигнута максимальная вероятность, указаны в скобках.

Стопроцентная вероятность инициирования дуги для аргона свидетельствует о предельной близости условий эксперимента к состоянию, соответствующему минимуму кривой Пашена. Однако при этом само напряжение 100 В находится значительно ниже минимума кривой Пашена для аргона (порядка 200 В [1]), инъекция же первичной плазмы приводит к дугообразованию.

Зависимость, полученная в атмосфере воздуха, соответствует по характеру также кривой Пашена, описывающей зависимость напряжения пробоя от произведения давления на расстояние. В опыте, представленном

на рисунке 2.4 в виде кривой для воздуха, максимальная вероятность пробоя достигается при меньших давлениях на больших расстояниях.

## **2.2 Статистический анализ результатов моделирования зависимости вероятности дугообразования в зависимости от модели электродов и их покрытия**

В эксперименте испытывались модельные электродные промежутки двух различных форм, реализуемых в РЭА и БКС КА: сегмент платы и сегмент материальной шины. Прочность электрической изоляции и устойчивость к дугообразованию данных промежутков в значительной степени определяется физическими процессами, приводящими к дуге. В случае открытых промежутков, образованных двумя материальными шинами без покрытия, механизмы пробоя описываются в рамках физики газового разряда. В качестве примера можно привести зависимости, представленные на рисунке 2.4.

В изолирующих промежутках, представляющих собой сегмент печатной платы без покрытия, характер пробоя иной и соответствует в большей степени пробоем по поверхности диэлектрика в вакууме. В этом случае вторичное дугообразование наблюдается лишь при относительно небольших удалениях от первичной дуги. Для данного механизма пробоя требуется наличие достаточного количества адсорбированного газа на поверхности диэлектрика, и именно поэтому вторичные дуги были зарегистрированы при давлениях, соответствующих форвакууму (см. рисунок 2.3).

Наличие лакового покрытия без дефектов (пункты 4.9 и 4.11 Программы исследований) полностью исключает вторичное дугообразование при выполнении условия данного моделирования (отсутствие высокоэнергетических частиц). Для сегментов материальных шин, покрытых лаком, были проведены дополнительные испытания при

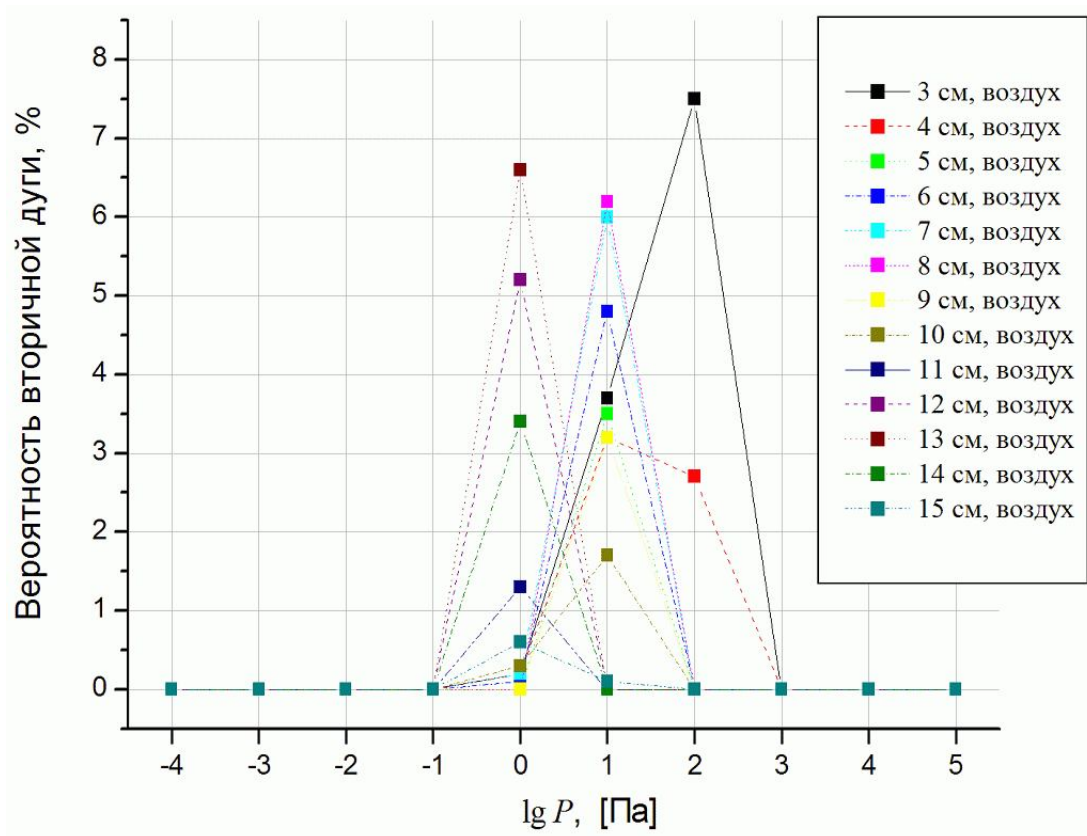
повышенном напряжении 180 В на первичной дуге. Вторичное дугообразование для данного промежутка не было зарегистрировано.

### **2.3 Статистический анализ результатов моделирования зависимости вероятности дугообразования в зависимости от давления и состава газа в окружающей среде**

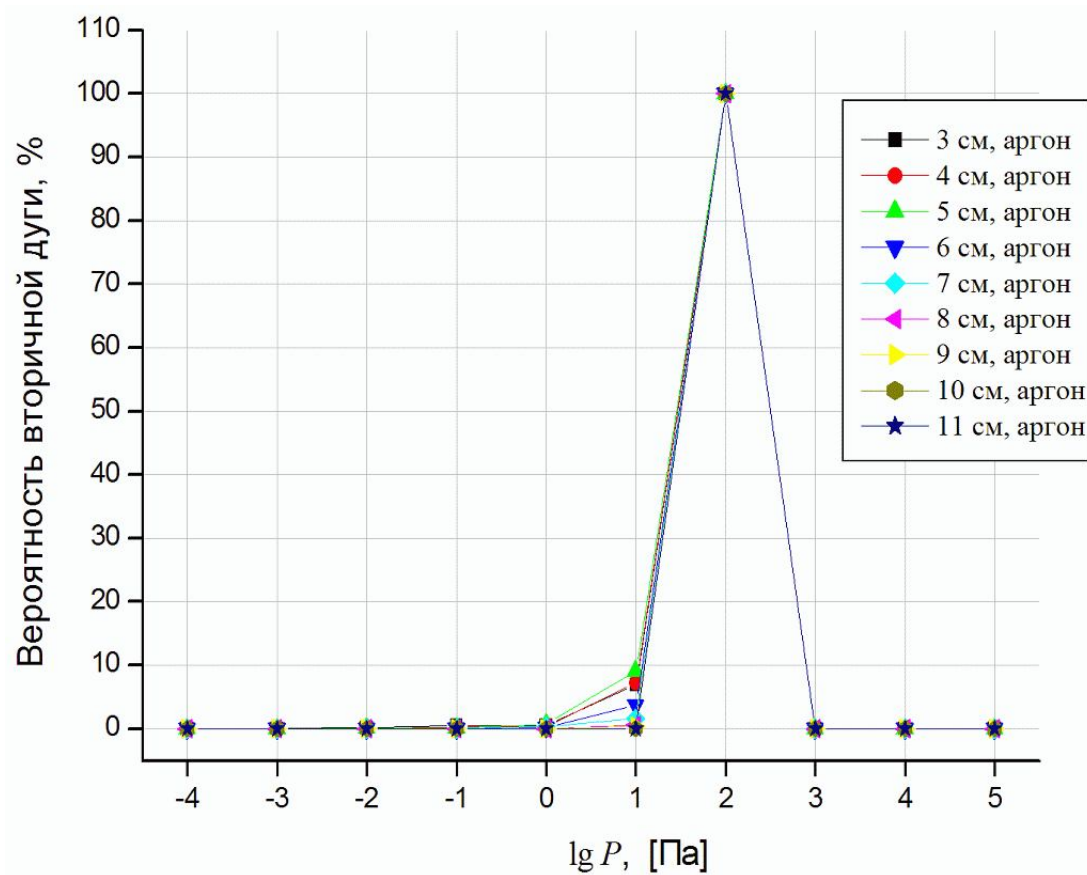
Для инициирования вторичной дуги по поверхности диэлектрика (пункт 4.8 Программы исследований, сегмент платы без лакового покрытия) характерна относительно слабая зависимость вероятности дугообразования от давления, поскольку роль окружающей среды состоит в обеспечении достаточного количества адсорбированного газа для скользящего разряда по поверхности диэлектрика, не препятствуя при этом образованию лавин. В условиях моделирования данной работы, как в воздухе, так и в аргоне, условия для вторичного дугообразованию реализуются при давлениях 1 Па и 0.1 Па.

Наиболее полно зависимость вероятности дугообразования от давления окружающей среды представлено для сегмента материальной шины с дефектным лаковым покрытием. В месте дефекта в виде неполного покрытия имеются тройные точки металл–диэлектрик–вакуум, являющиеся источниками повышенной эмиссионной активности [3], и в пограничных состояниях электрической изоляции наличие таких точек может приводить к пробоям ниже уровня, определяемого минимумом кривой Пашена.

На рисунке 2.5 представлены зависимости вероятностей пробоя от давления воздуха (а) и аргона (б). Обращает на себя внимание тот факт, что зависимость для аргона является одномодовой, поскольку реализуется режим 100% вероятности пробоя, подобный режиму, соответствующий минимуму кривой Пашена. Для воздуха наблюдаются три группы пиков, соответствующих различным расстояниям между первичным и вторичным дуговыми промежутками. Максимальные значения вероятностей для воздуха значительно ниже, чем для аргона, и согласуются с электроизоляционными характеристиками газа, образующего окружающую среду, которые для воздуха выше [1], чем для аргона.



(a)



(б)

Рисунок 2.5 – Зависимости вероятности вторичного дугообразования от давления воздуха (а) и аргона (б).



## 2.4 Сравнительный анализ данных научно-информационных источников с результатами моделирования дугообразования

Пробой газового промежутка, являющегося, как показали эксперименты, основным механизмом вторичного дугообразования, описывается законом Пашена, многократно изложенного в различных работах. Согласно многочисленным источникам, например [1], вблизи минимума кривой Пашена воздух является одним из наиболее электрически прочных газов, составляющих атмосферу Земли (см. рисунок 2.6). При этом наименее электрически прочным является аргон. Именно поэтому для экспериментальной проверки модели были выбраны эти два крайних случая.

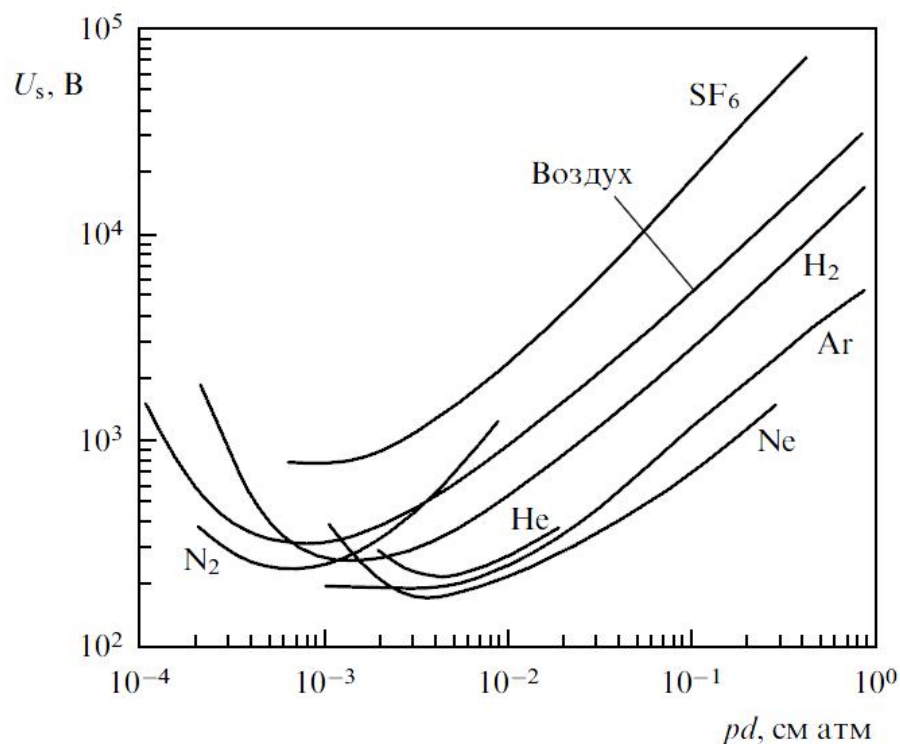


Рисунок 2.6 – Зависимости пробивного напряжения от отношения  $pd$  для ряда газов [1].

Выполненное моделирование вторичного дугообразования выявило специфику условий электрической изоляции при наличии источника плазмы от первичной дуги, заключающейся в пониженном напряжении достижения 100% вероятности пробоя (см. рисунок 2.4 и пояснения к выбору



напряжения 180 В в качестве максимального напряжения для инициирования первичной дуги). С другой стороны, данное отклонение от закона Пашена не является противоречием, поскольку закон Пашена получен в предположении Таунсендовского (одноэлектронного) механизма инициирования газового разряда, в то время как условия вторичного дугообразования подразумевают наличие большого числа носителей заряда в изолирующей промежутке. В этой связи можно ожидать, что критерием зажигания самоподдерживающегося разряда будет достижение катодного падения потенциала, значения которого лежат ниже минимумов кривых Пашена [4]. В таблице 2.1 приведены значения катодного падения потенциала  $U_c$  тлеющего разряда для различных газов и различных материалов электродов, опубликованных в [4]. Следует отметить, что влияние электродов не коррелирует с эмиссионной активностью поверхности материалов в вакууме, что отчётливо видно на примере сравнения платины и железа в аргоне и платины и меди в воздухе, поскольку минимальная эмиссионная активность (максимальная работа выхода) характерна для платины, что могло бы подразумевать максимальные значения  $U_c$  для поддержания разряда.

Таблица 2.1 – Нормальные значения катодного падения потенциала (в Вольтах) для различных пар катодный материал – газ [4].

|                | Al  | Ag  | Cu  | Fe  | Pt  | Zn  |
|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| He             | 140 | 162 | 177 | 150 | 165 | 143 |
| Ar             | 100 | 130 | 130 | 165 | 131 | 119 |
| H <sub>2</sub> | 170 | 216 | 214 | 250 | 276 | 184 |
| N <sub>2</sub> | 180 | 233 | 208 | 215 | 216 | 216 |
| Воздух         | 229 | 280 | 370 | 269 | 277 | 277 |

В этой связи из всех материалов электродов, приведённых в таблице 1.1, наихудшими электроизоляционными характеристиками с точки

зрения электрической изоляции в газе обладает алюминий, а в качестве наилучшего можно рассматривать медь. Преимущество меди в качестве материала электродов связано, по-видимому, с существованием естественного оксида на её поверхности, для которого характерен аномально низкий коэффициент вторичной электронной эмиссии [5], в то время как коэффициент вторичной эмиссии платины является одним из самых больших среди металлов [6], и большая работа выхода (низкая эмиссионная способность термоэлектронной и автоэлектронной эмиссии) не может компенсировать высокую эмиссионную активность платины при вторичной электронной эмиссии.

Таким образом, есть основания рассматривать достижение напряжением БКС катодного падения потенциала тлеющего разряда для системы «материал электрода материальных шин – газовый состав окружающей среды» в качестве критерия высокой вероятности вторичного дугообразования в РЭА и БКС КА.

Для инициирования вторичной дуги по механизму газового разряда высокая концентрация первичной плазмы не требуется, и роль первичной дуги заключается в инжекции некоторого количества свободных носителей заряда, в то время как от концентрации первичной плазмы может зависеть время запаздывания пробоя и вторичной дуги.

Другим механизмом вторичного дугообразования является инициирование взрывной электронной эмиссии на катоде изолирующего промежутка. Данный процесс был идентифицирован как при тестировании сегмента материальных шин (см. рисунок 2.1), так и для сегмента печатной платы (см. рисунок 2.3), однако лишь в случае непосредственной близости источника плазмы первичной дуги к испытываемому промежутку. Критерием инициирования вакуумной дуги по взрывоэмиссионному механизму является достижение критической плотности тока в предпробойном эмиссионном центре [7]. В случае плазменного окружения пробой развивается в катодном лэнгмюровском слое, и для его

инициирования требуются высокие концентрации плазмы. В этой связи процесс инициирования вторичных дуг по взрывоэмиссионному механизму может происходить лишь в пределах модуля РЭА или БКС, в котором произошло инициирование первичной дуги, и этот механизм представляет собой меньшую опасность.

## **2.5 Выводы к разделу**

– Покрытие поверхности электродов, находящихся под разностью потенциалов БКС, защитным диэлектрическим покрытием защищает от вторичного дугообразования даже в случае значительного (в выполненном моделировании в 1.8 раза) превышения напряжения при первичном разряде.

– Промежуток, образованный материальными шинами под разностью потенциалов БКС равной 100 В выдерживает воздействие первичной дуги во всём диапазоне расстояний при напряжении, используемом для инициирования первичной дуги равном 100 В. При напряжении 180 В происходит инициирование вторичной дуги, причём, преимущественно по механизму тлеющего газового разряда, переходящего в дуговой разряд.

– Наименьшей электрической прочностью обладает промежуток, образованный материальными шинами с дефектным лаковым покрытием, представляющим собой оголённые участки металла с протяжёнными участками тройных точек металл–диэлектрик–вакуум.

– Основным механизмом инициирования вторичной дуги является газовый разряд, переходящий в дуговой разряд. В связи с этим влияние состава газового окружения, его давление, межэлектродных расстояний на вероятность вторичного дугообразования носит такой же характер, какой те же факторы оказывают влияние на электрическую прочность газовых промежутков без инъекции первичной плазмы.

– Взрывоэмиссионный механизм инициирования вторичной дуги проявляется лишь на относительно малых расстояниях, менее 5 см в

условиях данного моделирования, между источником первичной дуги и тестируемым промежутком.

– В качестве критерия инициирования вторичной дуги со 100% вероятностью можно рассматривать достижение напряжения, равного катодному падению потенциала тлеющего разряда для определённой системы «материал электрода – окружающий газ». При напряжениях ниже этой величины вторичное дугообразование также возможно, но с меньшей вероятностью.

### **3 Технико-экономическая оценка рыночного потенциала полученных результатов**

РИД, полученный в данной работе, предназначен для создания исследовательского и испытательного оборудования, используемого для НЭО при проектировании и производстве КА. Для оценки рыночной стоимости интеллектуальной деятельности используются следующие подходы [8], закреплённые в «Методических рекомендациях по определению рыночной стоимости интеллектуальной собственности», утверждённых Минимуществом РФ 26 ноября 2002 г. № СК-4/21297:

- доходный,
- сравнительный,
- затратный.

Для оценки по доходному подходу требуется выполнение условия возможности получения дохода (выгоды) при использовании РИД. Оценка по данному подходу является достоверной для любых РИД, направленных на создание товаров и услуг. Однако в случае объекта исследования данной НИР оценка с использованием доходного подхода является затруднительной и, вероятно, недоступной в силу невозможности получения дохода при его использовании. Данное обстоятельство характерно для таких направлений деятельности, как, например, создание средств защиты от поражающих факторов стихий. Для решения таких задач

экономиками стран тратятся значительные ресурсы на создание средств предупреждения и защиты, которые могут не давать экономического прироста в отсутствие катаклизмов, но необходимость создания которых очевидна.

В связи с вышесказанным, более достоверной является оценка по сравнительному подходу, которая может быть выполнена на основании данных о стоимости конечного продукта (КА) и комплексов испытательного оборудования, используемого для НЭО КА.

В качестве примера оценки стоимости КА можно рассмотреть российский КА дистанционного зондирования Земли, созданный ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» и успешно выведенный на орбиту 25 июня 2013 [9]. Проектная себестоимость КА доступна на сайте государственных закупок и составляет 2 999 138 000 российских рублей [10], а полная стоимость, включая поставку изделия, 3 446 200 000 руб. Поэтому максимальный убыток от недостатков в НЭО, способных привести к потере КА, измеряется миллиардами рублей. Структура себестоимости КА представлена в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Структура себестоимости КА «Ресурс-П» в соответствии с [10].

| № п/п | Наименование статей затрат                                   | Стоимость, руб.  |
|-------|--|------------------|
| 1.    | Затраты на материалы,<br>в том числе:                        | 2 071 074 000,00 |
|       | Сырье и основные материалы                                   | 19 079 000,00    |
|       | Покупные полуфабрикаты                                       | 4 585 000,00     |
|       | Возвратные отходы  | 656 000,00       |
|       | Комплектующие изделия  | 1 727 943 000,00 |
|       | Работы и услуги сторонних организаций                        | 250 058 000,00   |
|       | Транспортно-заготовительные расходы                          | 70 065 000,00    |
| 2.    | Затраты на оплату труда основных<br>производственных рабочих | 78 753 000,00    |
| 3.    | Отчисления на социальные нужды                               | 25 540 000,00    |

|    |   |                  |
|----|---|------------------|
| 4. | Затраты на специальную технологическую оснастку | 105 704 000,00   |
| 5. | Специальные затраты                             | 311 980 000,00   |
| 6. | Накладные расходы                               | 406 087 000,00   |
| 7. | Прочие производственные затраты                 | 0,00             |
|    | Производственная себестоимость                  | 2 999 138 000,00 |
| 8. | Внепроизводственные затраты                     | 0,00             |
|    | Полная себестоимость                            | 2 999 138 000,00 |

Работы, связанные с НЭО, сосредоточены в статьях «Работы и услуги сторонних организаций», «Затраты на специальную технологическую оснастку» и «Специальные затраты», составляющих в сумме примерно 20%. Доля затрат на создание оборудования для НЭО частей КА в структуре стоимости КА «Ресурс-П» не расшифровывается, поэтому оценка стоимости оборудования для НЭО может быть сделана на основании дополнительных источников. Информация, доступная на сайте государственных закупок, представлена в таблице 3.2. Стоимости комплектов оборудования для создания рабочих мест НЭО, использующих в своём составе РИД данной работы, составляют примерно 25 млн. руб.

Таблица 3.2 – Государственные заказы на создание НЭО для работ по проектированию КА.

| № п/п | Наименование работы. Номер государственного заказа   | Стоимость, руб. |
|-------|--|-----------------|
| 1.    | Поставка комплекта оборудования для дооснащения лабораторной базы по разработке малых космических аппаратов. Заказ №0342100017711000092 [11].                  | 24 150 000,00   |
| 2.    | Поставка и ввод в эксплуатацию комплекта оборудования для отработки и исследования малого космического аппарата СГАУ АИСТ-2. Заказ № 0342100017712000056 [12]. | 26 353 000,00   |

Рабочее место НЭО согласно [11] предназначено для отработки системы управления ориентацией КА, включая ориентацию фотоэлектрических преобразователей энергии на Солнце. В комплект оборудования входят измерительные приборы, устройства прецизионной механики, имитатор светового потока Солнца, программное обеспечение LabView с модулями GPS и GLONASS, а также комплект программного обеспечения, обслуживающего измерительные приборы.

Рабочее место НЭО согласно [12] предназначено для отработки приёмопередающих модулей связи СВЧ диапазона. В комплект оборудования входит РЭА и минимальный комплект программного обеспечения, обеспечивающего поддержку команд интерфейса I2C для имитации бортового компьютера КА.

Ни один из рассмотренных аналогов не даёт достаточно точного представления о возможных затратах на создание рабочего места НЭО для исследования и испытания РЭА КА на устойчивость к дугообразованию, поскольку технические требования включают в себя более широкий набор параметров, включая изменение давления от атмосферного до соответствующего уровню глубокого вакуума, изменение температуры от минус 80°C до +150°C, плазменное окружение, источники высокоэнергетических заряженных частиц, имитирующих условия полярных и геостационарных орбит. Кроме средств имитации условий орбитального КП, анализируемое рабочее место НЭО должно содержать максимально широкий спектр диагностического оборудования и методик для локализации и диагностики разрядных явлений. В этой связи требуется выполнение оценки по затратному подходу.

Для оценки по затратному подходу разработан проект сметы на создание автоматизированного рабочего места по имитации условий орбитального КА при НЭО устойчивости РЭА и БКС к ЭСР и дугообразованию. За основу взяты цены, доступные в on-line каталогах компаний-поставщиков



электронного и вакуумного оборудования, коммерческие предложения, используемые в закупках Исполнителя в 2013 году в рамках других контрактов, и цены на оборудование, разрабатываемое и поставляемое на рынок Исполнителем и удовлетворяющее техническим требованиям для создания рабочего места НЭО. Накладные расходы приняты равными 15% себестоимости. Норма прибыли принята равной 5% себестоимости. Научное и специальное оборудование, интегрированное в рабочее место НЭО, не включено в себестоимость. Время выполнения работ по созданию рабочего места НЭО оценивается в 3 года. Результаты оценки стоимости создания рабочего места НЭО представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Проект сметы на создание автоматизированного рабочего места по имитации условий орбитального КА при НЭО устойчивости РЭА и БКС к ЭСР и дугообразованию.

| Наименование, шифр работы, этапы                         | Стоимость работы, всего, тыс. руб. | (тыс. рублей в ценах соответствующих лет) |        |         |
|--|------------------------------------|---|--------|---------|
|  |                                    | В том числе по годам                      |        |         |
|  |                                    | 1-й                                       | 2-й    | 3-й     |
| <b>Смета затрат:</b>                                     |                                    |   |        |         |
| Затраты на материалы, комплектующие и ПО                 | <b>6014,5</b>                      | 5601,5                                    | 299,6  | 113,4   |
| Затраты на оплату труда                                  | <b>14400,0</b>                     | 4800,0                                    | 4320,0 | 5280,0  |
| Отчисления на социальные нужды                           | <b>4348,8</b>                      | 1449,6                                    | 1304,6 | 1594,6  |
| Прочие прямые затраты                                    | <b>0,0</b>                         | 0,0                                       | 0,0    | 0,0     |
| Накладные расходы  | <b>4370,0</b>                      | 2091,4                                    | 1045,5 | 1233,2  |
| Итого себестоимость собственных затрат                   | <b>29133,3</b>                     | 13942,5                                   | 6969,7 | 8221,1  |
| Затраты на специальное оборудование                      | <b>14434,1</b>                     | 5400,0                                    | 0,0    | 9034,1  |
| Затраты по работам, выполняемым сторонними организациями | <b>0,0</b>                         | 0,0                                       | 0,0    | 0,0     |
| Итого себестоимость                                      | <b>43567,4</b>                     | 19342,5                                   | 6969,7 | 17255,2 |
| Прибыль  | <b>1456,7</b>                      | 697,1                                     | 348,5  | 411,1   |

|  |                |         |                     |                               |
|--|----------------|---------|---------------------|-------------------------------|
| Цена   | <b>45024,1</b> | 20039,6 | 7318,2              | 17666,3                       |
| <b>Материалы, комплектующие и ПО</b>   |                |         |                     |                               |
| <b>Наименование материалов и других материальных ресурсов</b>  | Ед. изм.       | Кол-во  | Цена ед., тыс. руб. | Сумма, тыс. руб., включая НДС |
| Электронные компоненты   | комплект       | 1       | 42,00               | 42,00                         |
| Прокат алюминиевый АМГ6Б   | кг             | 90      | 0,19                | 17,50                         |
| Провод медный  | кг             | 50      | 0,38                | 19,00                         |
| Прокат стальной  | кг             | 310     | 0,03                | 9,30                          |
| Прокат из нержавеющей стали 12x18н10т  | кг             | 370     | 0,23                | 85,10                         |
| Вакуумные компоненты (на основании on-line каталога VACOM Vakuum Komponenten & Messtechnik GmbH (Германия))                | комплект       | 1       | 5601,5              | 5601,5                        |
| Откачная высоковакуумная станция в комплекте, коммерческое предложение ООО "Вакуумные системы и электроника" № 080413 – М1 | комплект       | 1       | 1567,8              | 1567,8                        |
| Криостат LOIP FT-311-80, коммерческое предложение ООО "Вакуумные системы и электроника" № 160413 – М1                      | шт.            | 1       | 224,0               | 224,0                         |
| Источник электронного пучка энергией 150-220 кэВ   | шт.            | 1       | 2400,0              | 2400,0                        |
| Источники рентгеновского и УФ излучения  | комплект       | 1       | 1800,0              | 1800,0                        |
| Источники плазмы   | комплект       | 1       | 1200,0              | 1200,0                        |
| Контрольно-  | комплект       | 1       | 5394,3              | 5394,3                        |

|   |                              |                         |                                 |                  |
|---|------------------------------|-------------------------|---------------------------------|------------------|
| измерительное оборудование и источники питания (на основании on-line каталога ЗАО "АКАДЕМЛАН")  |                              |                         |                                 |                  |
| Источники питания и средства автоматизации, расшифровка на листе "Питание и управление"   | комплект                     | 1                       | 1848,0                          | 1848,0           |
| ПО - COMSOL Multiphysics, базовый комплект, 1 лицензия  | шт.                          | 1                       | 100,1                           | 100,1            |
| ПО - Plasma Module для COMSOL Multiphysics, 1 лицензия  | шт.                          | 1                       | 100,1                           | 100,1            |
| ПО - MS Visual Studio   | шт.                          | 1                       | 40,0                            | 40,0             |
| <b>ФОТ, трудоемкость по этапам:</b>   |                              |                         |                                 |                  |
| <b>Наименование основных этапов работ</b>   | <b>Количество участников</b> | <b>Ср. месячный ФОТ</b> | <b>Трудоемкость (чел.-мес.)</b> | <b>Сумма ФОТ</b> |
| Этап 1. Разработка технического предложения на создание автоматизированного рабочего места по имитации условий орбитального КА при НЭО устойчивости РЭА и БКС к ЭСР и дугообразованию (далее "рабочее место НЭО"). Проведение патентных исследований. | 8                            | 40,0                    | 48,0                            | 1920,0           |
| Этап 2. Разработка конструкторской документации на макеты составных частей рабочего места НЭО. Изготовление макетов составных частей автоматизированного  | 12                           | 40,0                    | 72,0                            | 2880,0           |

|  |    |      |       |        |
|--|----|------|-------|--------|
| рабочего места.<br>Проведение испытаний макетов составных частей автоматизированного рабочего места.   |    |      |       |        |
| Этап 3. Разработка конструкторской документации на рабочее место НЭО. Разработка конструкторской документации на имитаторы бортовой РЭА. Разработка трёхмерных математических моделей модулей РЭА для анализа дугообразования.   | 14 | 40,0 | 84,0  | 3360,0 |
| Этап 4. Разработка методики интеллектуального анализа результатов испытаний бортовой РЭА. Разработка ПО рабочего места НЭО. Проведение вычислительного моделирования эмиссионных и плазменных процессов в модулях РЭА. Разработка трёхмерной модели бортовой РЭА и БКС по ЭСР и дугообразованию. | 18 | 40,0 | 108,0 | 4320,0 |
| Этап 5. Создание опытного образца рабочего места НЭО. Разработка эксплуатационной документации. Изготовление   | 12 | 40,0 | 72,0  | 2880,0 |

|  |    |      |      |        |
|--|----|------|------|--------|
| имитаторов бортовой РЭА.   |    |      |      |        |
| Этап 6. Проведение автономных испытаний опытного образца рабочего места НЭО. Корректировка конструкторской, программной и эксплуатационной документации по результатам испытаний. Доработка опытного образца рабочего места НЭО. Присвоение документации литеры "О". | 10 | 40,0 | 60,0 | 2400,0 |

Таким образом, итоговая рыночная стоимость продукта, основанного на РИД «Способ определения стойкости к дугообразованию элементов радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов», составляет 45 млн. руб. в ценах 2013 года, и срок реализации продукта составляет 3 года.

#### **4 Выработка рекомендаций и предложений по использованию результатов НИР в реальном секторе экономики, а также в дальнейших исследованиях и разработках**

##### **4.1 Общие рекомендации по использованию результатов НИР в разработках и при производстве РЭА КА**

Одним из ключевых моментов Приказа ФКА РФ № 149 от 04.10.2010 является разработка и создание метрологического обеспечения НЭО. Это касается производства как РКТ, так и КА. Применительно к объекту исследования настоящей работы можно отметить в качестве основного направления использования результатов выполнения данной работы

проведение наземных испытаний РЭА, БКС и СБ на устойчивость к дугообразованию, создавая либо используя следующие инструменты:

– РИД «Способ определения стойкости к дугообразованию элементов радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов».

– Вакуумно-тепловые испытания в соответствии с ГОСТ Р 50109-92, совмещённые с методикой испытания на устойчивость к дугообразованию в условиях эксплуатации КА.

– Испытания на устойчивость к УФ излучению в соответствии с ГОСТ Р 25645.338-96, совмещённые с методикой испытания на устойчивость к дугообразованию в условиях эксплуатации КА.

– Испытания на устойчивость к термоциклированию в соответствии с ГОСТ 28236-89, совмещённые с методикой испытания на устойчивость к дугообразованию в условиях эксплуатации КА.

Для тестирования РЭА при НЭО в будущем потребуется разработка и принятие нормативных документов, регламентирующих программы и методики испытаний РЭА открытого исполнения на устойчивость к вторичным процессам, инициируемым ЭСР и срабатыванием средств защиты внутри модулей РЭА. Зарубежным аналогом подомного стандарта является стандарт ISO 11221:2011 «Space systems - Space solar panels - Spacecraft charging induced electrostatic discharge test methods», используемый в странах Евросоюза при разработке и производстве солнечных батарей. Подходы, используемые в этом стандарте, применимы к РЭА и БКС, при этом использование РИД, полученного при выполнении данной НИР, позволит существенно повысить достоверность испытаний.

#### **4.2 Технические рекомендации по использованию результатов НИР для защиты РЭА КА от дугообразования**

В результате проведения как численного, так и физического моделирования, было показано, что электрической пробой и дугообразование при отсутствии плазмы в изолирующих промежутках не

возникает при напряжениях ниже минимума кривой Пашена. Наличие плазмы, генерируемой первичным разрядным процессом, способно привести к пробоя и дуге при напряжении 100 В в промежутке, образованном электродами, покрытыми диэлектрической плёнкой с дефектами в виде областей нарушения сплошности изоляционной покрытия. При напряжении 180 В пробои наблюдаются также в промежутках с непокрытыми цельнометаллическими электродами. Вторичное дугообразование наблюдается при давлениях  $0.1 \div 10$  Па, соответствующих разреженной атмосфере, и при расстояниях от источника первичной плазмы вплоть до 15 см. Учитывая, что источник первичной плазмы представляет собой слаботочный разряд токком в среднем порядка 10 А и длительностью в единицы миллисекунд, на таких расстояниях плазма является разреженной до концентрации порядка  $10^{10}$  см<sup>-3</sup>. Таким образом, даже разреженная плазма способная приводить к инициированию устойчивой дуги. При таких концентрациях длина Дебая порядка 100 мкм, и если внутренне пространство модулей РЭА зонировать с использованием тонкой проводящей сетки с ячейей, размеры которой не превышают длину Дебая, можно с уверенностью исключить влияние плазмы на изолирующие промежутки. Такая защита подобна камере Фарадея и используется для защиты от электромагнитного шума по ГОСТ Р 51317.4.2-99. Использование такой меры в [13] рекомендовано в качестве одной из радикальных мер защиты от дугообразования.

Результаты исследования вероятности дугообразования в модельных условиях выявили, что наиболее уязвимой является проводящая поверхность, находящаяся под отрицательным потенциалом относительно окружающей её плазмы и при этом содержащая тройные точки контакта металл-диэлектрик-вакуум. Наиболее защищённой является поверхность, полностью покрытая слоем диэлектрика толщиной, достаточной для выдерживания напряжения, равного напряжению БКС, либо превосходящего его в силу индуктивности цепи, в которой происходит

обрыв тока с инициированием первичного дугового разряда. В этой связи при отсутствии потоков высокоэнергетических частиц для защиты от дугообразования, вызванного первичным разрядом, может быть рекомендовано покрытие проводящих поверхностей, находящихся под потенциалом, диэлектрическим покрытием, электрическая прочность которого достаточна для изоляции напряжения, ожидаемого при разрыве цепей в РЭА и БКС.

Предложенный подход может иметь существенное ограничение, связанное с необходимостью электрического контакта двух металлических элементов, находящихся под одним потенциалом. В этом случае вблизи контакта диэлектрическое покрытие должно отсутствовать, что может приводить к формированию тройных точек металл-диэлектрик-вакуум. Возможная ситуация схематически представлена на рисунке 4.1. Элементы *1* и *2* покрыты диэлектрической плёнкой. В области контактной площадки *3* плёнка отсутствует, что создаёт две протяжённые области тройных точек, обведённые окружностью. Тройные точки расположены на дне полости, глубина которой определяется толщиной покрытия, а ширина точно технологического процесса нанесения покрытия и не может быть сведена к нулю.

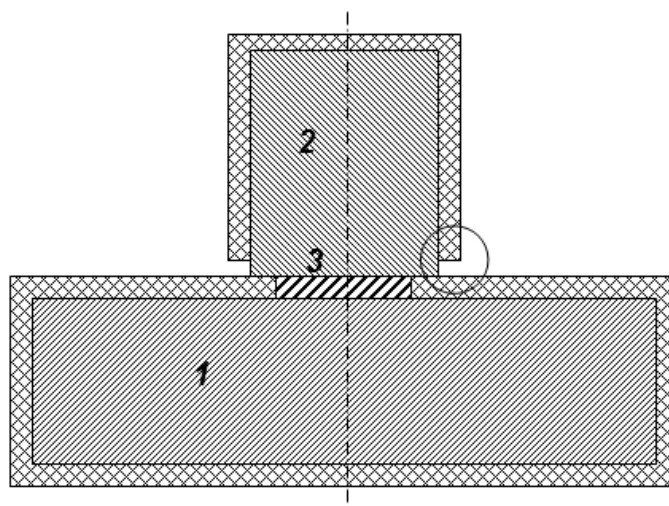


Рисунок 4.1 – Схематическое представление области тройных точек (отмечено окружностью), возникающей при контакте покрытых диэлектриком элементов *1* и *2* через контактную площадку *3*.



Для анализа активности тройных точек в области соединения металлических элементов, покрытых защитным слоем диэлектрика, проанализировано электрическое поле, возникающее в такой системе в катодном слое под плазмой.

Толщину слоя вычисляем из решения системы уравнений [14] для тока ионов на поверхность катода, одно из которых является законом Чайльда-Ленгмюра, а другое током Бома:

$$\begin{cases} j = \frac{4\sqrt{2}}{9} \varepsilon_0 \left(\frac{Ze}{M}\right)^{1/2} \frac{1}{d_{3/2}^2} U^{3/2} \\ j = 0,4 e n \sqrt{\frac{2kT_e}{M}} \end{cases}, \quad (4.1)$$

где  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая постоянная,  $e$  – заряд электрона,  $M$  – масса покоя иона,  $Z$  – среднее зарядовое число ионов плазмы,  $d_{3/2}$  – толщина катодного слоя,  $U$  – модуль отрицательной разности потенциалов между катодом и плазмой,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T_e$  – температура электронов,  $n$  – концентрация плазмы в глубине. Точное решение системы уравнений (4.1) имеет вид

$$d_{2/3} = \left(\frac{10\varepsilon_0}{9n}\right)^{1/2} \left(\frac{1}{ekT_e}\right)^{1/4} U^{3/4}. \quad (2.4.2)$$

Средняя напряжённость в слое вычисляется как

$$E_{cp} = \frac{U}{d_{2/3}}. \quad (4.3)$$

Но с учетом неравномерного распределения потенциала, напряженность поля у стенки должна быть выше. Точный анализ дает для этой напряженности:

$$E_0 = 2 \left(0,4 \frac{n}{\varepsilon_0} \sqrt{ekT_e}\right)^{1/2} U^{1/4}. \quad (4.4)$$

Полагаем температуру электронов соответствующей энергии 4 эВ, массу иона равной 14 АМУ, и напряжение на катоде равном минус 100 В. Тогда для  $n = 10^{10} \text{ см}^{-3}$  получаем  $E_{cp} = 5,7 \cdot 10^4 \text{ В/м}$  и  $E_0 = 7,6 \cdot 10^4 \text{ В/м}$ . Для

эффективной толщины катодного слоя можем записать выражение, отличающееся от (4.2) лишь числовым коэффициентом, имеющее вид:

$$d_{ek} = 0,79 \left( \frac{\varepsilon_0}{n} \right)^{1/2} \left( \frac{1}{ekT_e} \right)^{1/4} U^{3/4} . \quad (4.5)$$

На расстоянии  $d_{ek}$  от потенциального электрода следует установить заземленную стенку, чтобы получить напряженность поля, равную той, которая была бы создана плазмой с указанными в формуле параметрами.

Зависимость  $d_{ek}$  от  $n$  приведена в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Значения  $d_{ek}$  в зависимости от  $n$ .

|                      |                      |                      |                      |                      |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| $n, \text{ см}^{-3}$ | $10^{10}$            | $10^{11}$            | $10^{12}$            | $10^{13}$            |
| $d_{ek}, \text{ см}$ | $1.31 \cdot 10^{-1}$ | $4.15 \cdot 10^{-2}$ | $1.31 \cdot 10^{-3}$ | $4.15 \cdot 10^{-4}$ |

Моделирование проведено в Comsol Multiphysics на геометрическом эквиваленте, показанном на рисунке 2.4.2. Размеры даны в метрах. Геометрия плоская (X-Y). Поскольку эмиссия с катода не рассматривается, для упрощения потенциал взят по модулю.

На рисунке 4.3 показан результат расчета для  $d = 0,1$  мм. Это соответствует концентрации плазмы  $1,7 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ . Цветовая гамма – модуль напряженности (в диапазоне от 0 до  $2 \cdot 10^3$  В/см), контуры потенциала – через 1 В. В горизонтальное защитное покрытие попадают только линии 99 и 98 В, в боковую  $99 \div 96$  В. Структура сетки в щели показана на рисунке 4.3,б. Вычисленная напряжённость поля в области тройных точек оказалась пренебрежимо малой с точки зрения инициирования разряда и не превысила 200 В/см для щели шириной 4 мкм.

Очевидно, что при бóльших концентрациях окружающей плазмы в области тройных точек будут обнаруживаться бóльшие электрические поля. Пересчет напряженности для других концентраций осуществляется следующим образом. Поскольку  $U = \text{const}$ , то из (4.5) следует пропорция  $d_{ek} \sim n^{-1/2}$ . Предположим, что мы сделали конкретное измерение для

случая  $n_1$  и  $d_1$ . При этом напряженность на стенке в какой-то точке составила  $E_1$ . Требуется определить напряженность поля  $E_2$  в той же точке, при концентрации плазмы  $n_2$ . С этой целью определяем толщину слоя Чайльда-Ленгмюра при неизменном напряжении и другой концентрации  $d_2 = d_1(n_1/n_2)^{1/2}$ . При уменьшении концентрации ширину слоя следует расширить в соответствии с этой же пропорцией. Но в геометрическом приближении можно оставить ширину и уменьшить напряжение, чтобы сохранить напряженность поля, причем уменьшить в той же пропорции. Из этих рассуждений и в силу линейности уравнения электростатики, можно использовать выражение для вычисления напряженности поля как

$$E_2(L) = E_1(L) \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^{1/2}. \quad (2.4.6)$$

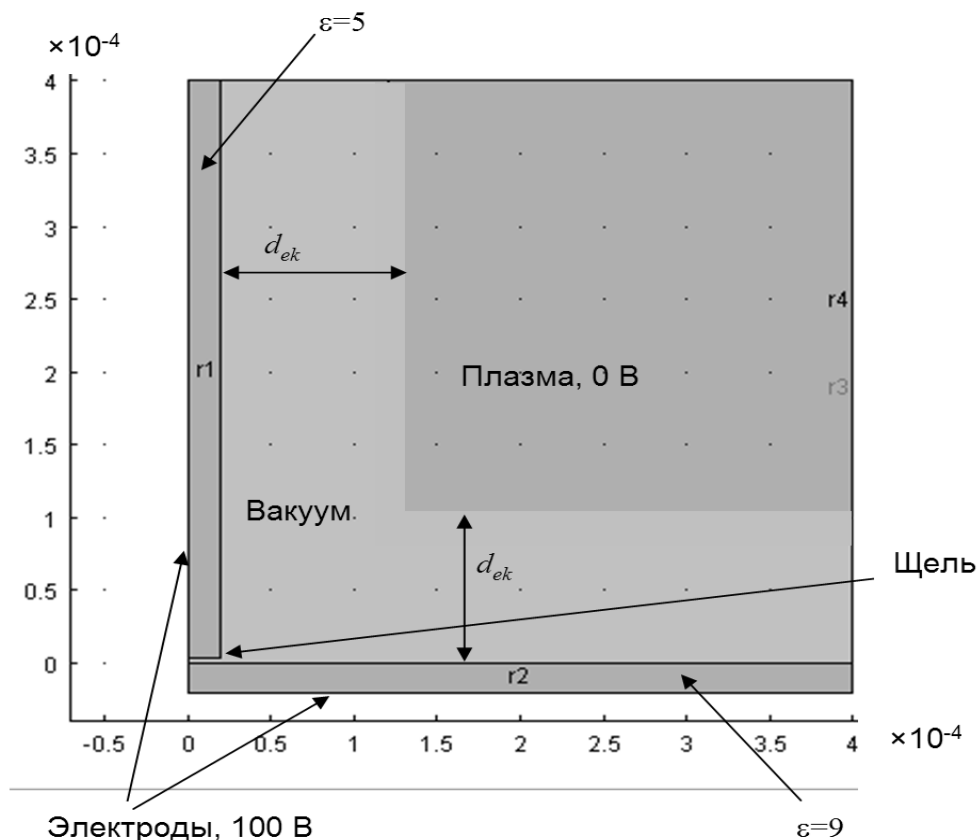
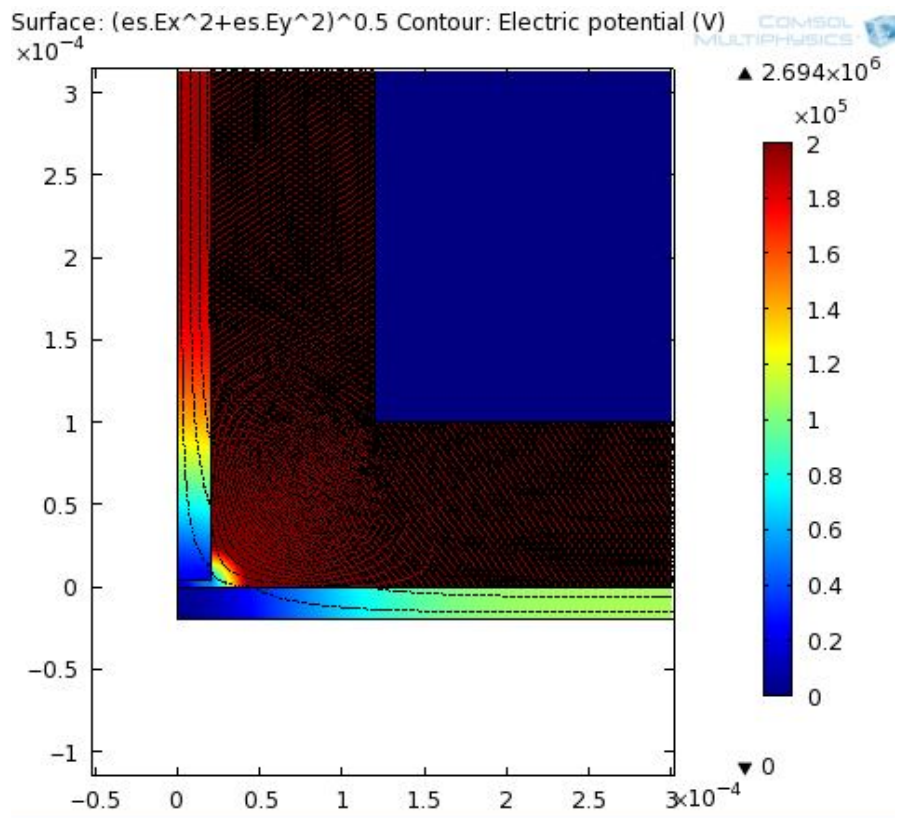
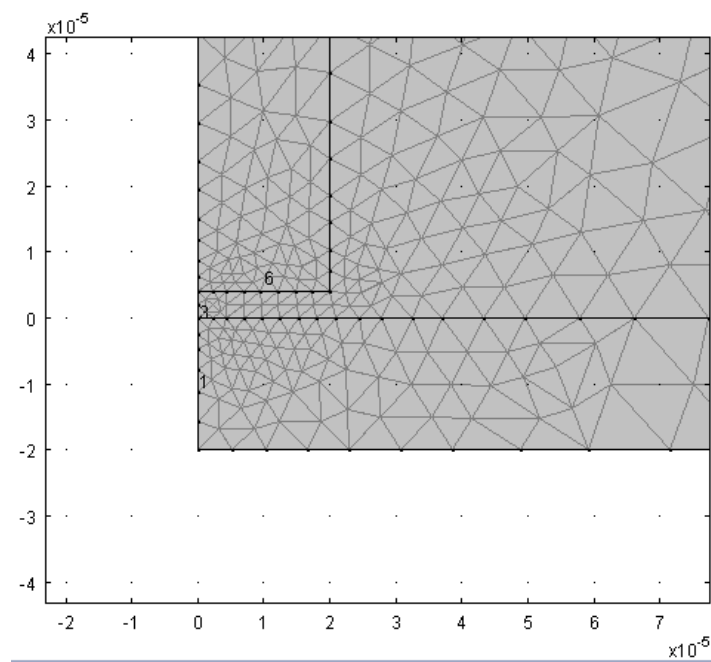


Рисунок 4.2 – Геометрия системы для анализа напряженности электрического поля в области тройных точек при соединении проводящих элементов, находящихся под потенциалом.



(a)



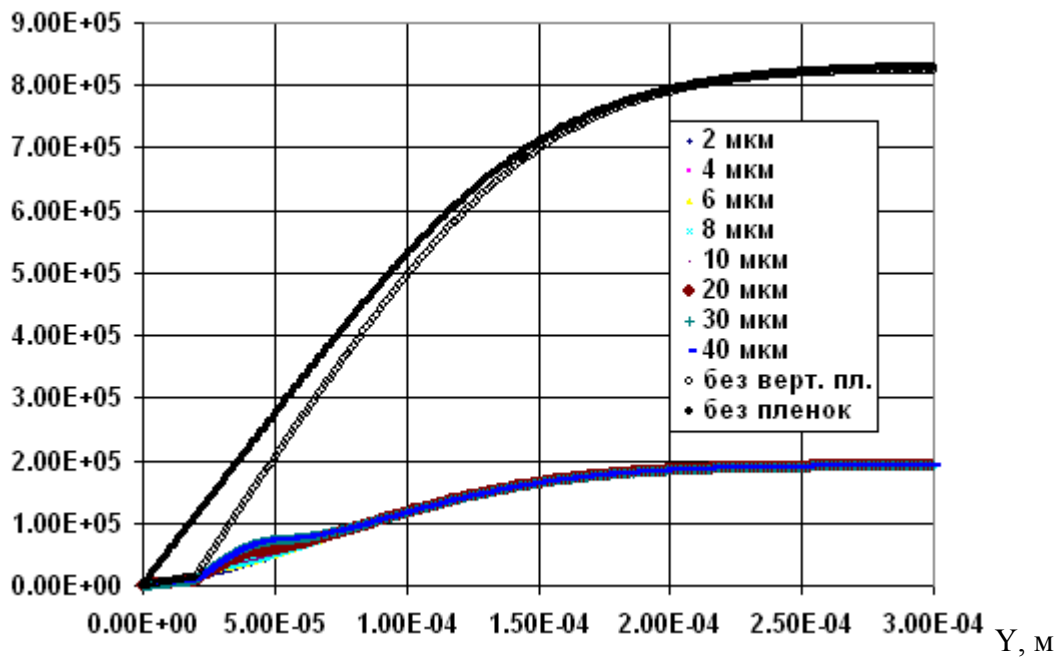
(б)

Рисунок 4.3 – Результат моделирование электрического поля в катодном слое при нарушении сплошности защитного диэлектрического покрытие в месте соединения элементов (а) и структура сетки при моделировании в области щелевого разрыва покрытия (б).

Успешность экранировки тройных точек в случае узкого щелевого нарушения сплошности защитного диэлектрического покрытия не означает успешного решения задачи защитного покрытия для разборной системы. Поэтому требуется проведение анализа зависимости напряжённости электрического поля в тройных точках от ширины щели. С этой целью были проведены расчёты напряжённости электрического поля в районе тройной точки при ширине щели  $\delta$ , варьируемой от 2 до 40 микрометров. Для сравнения представлены кривые для предельного случая отсутствия вертикального покрытия и отсутствия обоих покрытий. Результаты расчётов представлены на рисунке 4.4. Налицо ослабление поля в  $\sim 5$  раз, т.е. в соответствии с отношением проницаемостей. Имеет место ослабление и в щели, протяженность которой  $\delta$  начинается от координаты 20 мкм (толщина горизонтального покрытия).

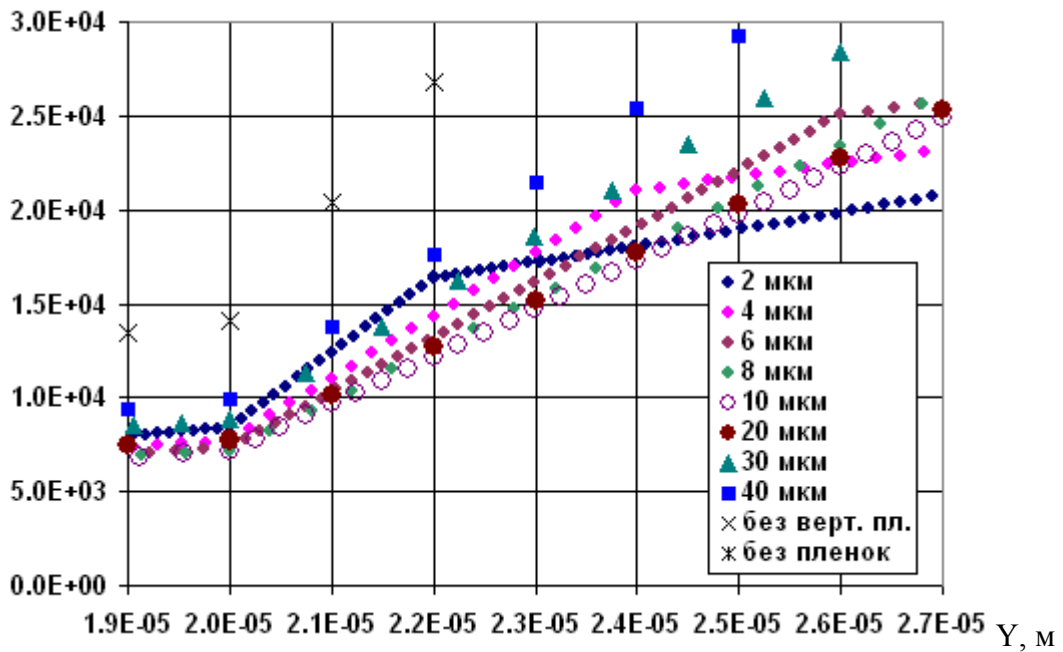
Более детальная картина представлена на рисунке рисунке 4.4,б. Случай  $\delta \rightarrow 0$ , очевидно, не является оптимальным из-за резкого скачка проницаемости и, по-видимому, должен привести к большой локальной напряженности поля. Поэтому, с ростом  $\delta$  происходит некоторый спад напряженности поля (для одной и той же координаты) до тех пор, пока ширина щели не станет равной 10÷20 мкм. При более широких щелях экранировка ухудшается – напряженность начинает расти для фиксированной координаты. Предельный случай – отсутствие вертикального покрытия. Однако даже в этом случае напряжённость поля относительно невелика с точки зрения интенсивной эмиссии, способной приводить к пробое и дуге. Это связано с общей экранировкой тройной точки за счёт углового соединения элементов. Влияние различных геометрических конфигураций проводников и диэлектриков на напряжённость электрического поля в тройной точке проанализирована в [15].

$E, \text{В/м}$



(a)

$E, \text{В/м}$



(б)

Рисунок 4.4 – Зависимость напряжённости электрического поля вдоль вертикальной поверхности для разных значений ширины щели, показанной на рисунке 4.2.

Таким образом, покрытие элементов РЭА открытого исполнения, находящихся под потенциалом, достаточным для поддержания горения вакуумной дуги, является эффективной мерой при условии соблюдения принципа электростатической экранировки тройных точек металл-диэлектрик-вакуум и может быть рекомендовано в качестве защитной меры от дугообразования при условии отсутствия потоков высокоэнергетических частиц, способных приводить к накоплению объёмного заряда внутри диэлектрика.

#### **4.3 Рекомендации по использованию в исследованиях дугообразования в газах и вакууме**

Исследования по фундаментальным и прикладным вопросам физики вакуумной дуги проводятся в течение длительного времени. В настоящее время интерес исследователей к данному явлению из года в год растёт, о чём свидетельствуют данные поисковых систем [16]. Однако сравнение объёма информации по поисковому запросу «vacuum arc satellite» в < <http://scholar.google.com> > к объёму по запросу «vacuum arc» в там же указывает на то факт, что лишь 3% исследований вакуумной дуги связано с проблемами КА. Это указывает на специфичность исследований. Специфика проявляется, прежде всего, в многофакторности процессов, имеющих место при эксплуатации КА. Именно поэтому максимальный учёт всех факторов является необходимым условием для получения достоверной информации в данной специфической области исследования вакуумной дуги. В этой связи можно рекомендовать методологические подходы, разработанные в данной работе, к использованию в комплексных исследованиях при НЭО. Исследования, выполненные в данной работе, должны быть продолжены в направлении усложнения процедуры испытания путём добавления таких факторов, как вакуумное термоциклирование в широком диапазоне температур и радиационной воздействие на исследуемые системы.

## **5 Разработка проекта технического задания на проведение ОКР**

Проект технического задания на проведение ОКР по теме: «Разработка комплекса оборудования для диагностики деградации электроизоляционных характеристик элементов РЭА в условиях термоциклирования в вакууме в диапазоне температур от минус 80°С до +180°С, ассистированного радиационным воздействием, приводящей к возникновению дуговых разрядов в бортовом оборудовании в условиях космического пространства» разработан в соответствии с пп. 4.2.1, 5.1.19 и 7.6 Технического Задания настоящей НИР.

Документ разработан в соответствии с рекомендациями Федерального агентства по науке и инновациям и Министерства образования и науки для выполнения опытно-конструкторских разработок (ОКР) [17,18].

Документ представлен в приложение А.

## **6 Подготовка и публикация материалов, направленных на освещение и популяризацию результатов НИР**

Методы диагностики плазмы вакуумной дуги, разрабатываемые в рамках данной работы, вошли в исправленную версию публикации [A.V. Schneider, S.A. Popov, A.V. Batrakov, G. Sandolache, H. Schellekens. Anode Temperature and Plasma Sheath Dynamics of High Current Vacuum Arc After Current Zero // IEEE Trans. Plasma Sci.- 2013.- vol. 41.- No. 8.- pp. 2022-2028], высланную в редакцию журнала «IEEE Transactions on Plasma Science» 26 апреля 2013 года и принятую в печать 20 мая 2013 года. Данная статья содержит ссылку на настоящий государственный контракт. Статья опубликована в августовском выпуске журнала «IEEE Transactions on Plasma Science».

Фактический материал, посвященный процессам в плазме при погасании вакуумной дуги, изложен в рукописи статьи [А.В. Шнайдер, С.А. Попов, А.В. Батраков. Зондовый метод диагностики катодного слоя после нуля тока вакуумной дуги], представленной в редакцию журнала



«Известия вузов. Физика» для публикации. Статья содержит ссылку на настоящий государственный контракт. Статья принята в печать, что подтверждается справкой из издательства. Статья будет опубликована в 2013 году.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения НИР получены следующие результаты:

– Созданная численно-аналитическая модель процессов возникновения дуговых разрядов в бортовом оборудовании в условиях космического пространства, основанная на дрейфово-диффузионном механизме переноса тока в газовой среде в сочетании с критериями достижения условий необратимого роста тока на поверхности электродов газонаполненных и вакуумных промежутков способна адекватно описывать процессы, приводящие к электрическому пробоя и дугообразованию, и может быть использована для проверки модулей РЭА КА на устойчивость к дугообразованию на стадии проектирования.

– Использование среды автоматизированного инженерно-физического проектирования COMSOL Multiphysics® Engineering Simulation Software позволяет осуществить программную реализацию численно-аналитической модели.

– Разработанная Программа и методики экспериментальных исследований численно-аналитической модели процессов возникновения дуговых разрядов в бортовом оборудовании в условиях космического пространства позволяет осуществить экспериментальную проверку численно-аналитической модели путём численного и физического моделирования в соответствии.

– Численно-аналитическая модель даёт согласие с результатами экспериментальной проверки.

– Полученные в результате моделирования статистические закономерности вероятности вторичного дугообразования в РЭА КА в зависимости от таких параметров системы, как расстояние между первичной и вторичной дугой, давление и состав окружающей газовой атмосферы, наличие или отсутствие защитных покрытий, наличие дефектов на защитных покрытиях, напряжение иницирования первичной дуги указывают на доминирование объёмных механизмов ионизации среды изолирующих промежутков на стадии развития пробоя, при этом процессы в катодном слое являются основным спусковым механизмом для

инициирования пробоя, как в условиях газовой среды низкого давления, так и в вакууме.

– При давлении газовой среды 1000 Па и выше вторичного дугообразования при напряжении БКС 100 В не наблюдается.

– В качестве полной защиты от вторичного дугообразования, вызванного внутренними процессами в РЭА, может быть использовано диэлектрическое покрытие, способное выдерживать напряжение БКС с учётом возможного индуктивного всплеска напряжения, возникающего при выключении токов.

– В условиях плазменного окружения тройные точки металл–диэлектрик–вакуум, возникающие в местах соединения покрытых диэлектриком элементов и находящиеся под напряжением БКС, могут быть эффективно экранированы геометрией соединения.

– Напряжением возникновения тлеющего разряда со 100% вероятностью инициирования, способного переходить во вторичный дуговой разряд в условиях наличия плазмы первичного разряда, следует рассматривать не напряжения минимумов кривых Пашена, а катодные падения потенциалов тлеющего разряда, зависящие как от состава окружающей газовой среды, так и от материала электродов. При этом наилучшими характеристиками обладают материалы электродов, способные сочетать низкий коэффициент вторичной электронной эмиссии поверхности с высокой работой выхода. В этой связи может быть рекомендована постановка НИР по исследованию влияния антидинаatronных покрытий с высокой работой выхода на вероятность вторичного дугообразования в условиях разреженной атмосферы.

Поставленные задачи НИР выполнены в полном объеме в соответствии с Техническим заданием. Полученные результаты являются оригинальными. Работа выполнена на мировом уровне разработок в предметной области исследования.

Полученные результаты и разработанная методологическая база будут использованы в исследованиях и разработках при наземной экспериментальной отработке РЭА и БКС КА.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Райзер Ю.П. Физика газового разряда. Научное издание. - 3-е изд., испр. и доп. - Долгопрудный: Издательский дом "Интеллект", 2009. - 736 с.
- 2 Козлов О.В. Электрический зонд в плазме.- М.: Атомиздат, 1969. – 293 с.
- 3 High Voltage Vacuum Insulation: Basic Concepts and Technological Practice / Ed. By Rod Latham.- Academic Press.- 1995.- 568 p.
- 4 В.М. Smirnov. Plasma Processes and Plasma Kinetics.– WILEY-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA, Weinheim, 2007.– 572 p.
- 5 Cross J.D., Sudarshan T. S. The effect of Cuprous Oxide Coatings on Surface Flashover of Dielectric Spacers in Vacuum // IEEE Trans. Elec. Insul.– 1974.– V. EI-9.– No. 4.– pp. 146 – 150.
- 6 Эмиссионная электроника / Л.Н. Добрецов и М.В. Гамаюнова.- М.: Наука.- 1966.- 564 с.
- 7 Месяц Г.А. Взрывная электронная эмиссия.- М.: Издательство физико-математической литературы.- 2011.- 280 с.
- 8 Наумов, А.Ф. Оценка объектов интеллектуальной собственности: учеб. пособие / А.Ф. Наумов ; Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ ; Поволжский институт им. П.А.Столыпина. - Саратов: Поволжский институт им. П.А.Столыпина, 2012. – 276 с.
- 9 Ресурс-П. [Электронный ресурс].- 2013.- Wikipedia.- Режим доступа <http://ru.wikipedia.org/wiki/Ресурс-П> свободный.- 2 с.- Яз. русский.
- 10 Изготовление и поставка космического аппарата «Ресурс-П» №3, транспортировка. Открытый аукцион, Заказ №0173100007012000079 [Электронный ресурс].- 2012.- Официальный сайт Российской Федерации в сети Интернет для размещения информации о размещении заказов на поставки товаров, выполнение работ, оказание услуг.- Режим доступа

[http://zakupki.gov.ru/pgz/public/action/orders/info/common\\_info/show?notificationId=3001170](http://zakupki.gov.ru/pgz/public/action/orders/info/common_info/show?notificationId=3001170) свободный.- Яз. русский.

11 Поставка комплекта оборудования для дооснащения лабораторной базы по разработке малых космических аппаратов. Открытый аукцион, Заказ №0342100017711000092 [Электронный ресурс].- 2011.- Официальный сайт Российской Федерации в сети Интернет для размещения информации о размещении заказов на поставки товаров, выполнение работ, оказание услуг.- Режим доступа

[http://zakupki.gov.ru/pgz/public/action/orders/info/common\\_info/show?notificationId=855288](http://zakupki.gov.ru/pgz/public/action/orders/info/common_info/show?notificationId=855288) свободный.- Яз. русский.

12 Поставка и ввод в эксплуатацию комплекта оборудования для отработки и исследования малого космического аппарата СГАУ АИСТ-2. Открытый аукцион, Заказ № 0342100017712000056 [Электронный ресурс].- 2012.- Официальный сайт Российской Федерации в сети Интернет для размещения информации о размещении заказов на поставки товаров, выполнение работ, оказание услуг.- Режим доступа [http://zakupki.gov.ru/pgz/public/action/orders/info/common\\_info/show?notificationId=3671364](http://zakupki.gov.ru/pgz/public/action/orders/info/common_info/show?notificationId=3671364) свободный.- Яз. русский.

13 Н.В. Garrett, А.С. Whittlesey. Guide to Mitigating Spacecraft Charging Effects.- NASA. JPL Space Science and Technology Series.- 2011.- 242 p.

14 Рожанский В.А. Р 62 Теория плазмы: Учебное пособие.— СПб.: Издательство «Лань».— 2012.— 320 с.

15 Afanas'ev V. P. Kostin A. A., Kuptsov V.A. On computation of electrostatic field strength at triple junctions // Proc. 21st International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEV), Yalta.- 2004.- pp. 675-677.

16 А. Batrakov. Guest Editorial. Special Issue on Vacuum Discharge Plasmas // IEEE Trans. Plasma. Sci.- 2013.- vol. 41.- No. 8.- pp. 1887-1888.

17 ЗФТ\_ОКР на разработку Устройства-АПК. Формы ПЗ\_ТЗ\_ТЭО [Электронный ресурс].- 2011.- Федеральная целевая программа «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы».- Режим доступа <http://fcpir.ru/Attachment.aspx?Id=471> свободный.- Яз. русский.

18 ЗФТ\_ОКР на разработку Устройства-АПК. Инструкции ПЗ\_ТЗ\_ТЭО [Электронный ресурс].- 2011.- Федеральная целевая программа «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы».- Режим доступа <http://fcpir.ru/Attachment.aspx?Id=472> свободный.- Яз. русский.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Проект ТЗ на ОКР

Приложение № 1

к государственному контракту

от « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_ г.

№ \_\_\_\_\_

### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

на выполнение опытно-конструкторских работ (ОКР) по теме:  
«Разработка комплекса оборудования для диагностики деградации  
электроизоляционных характеристик элементов РЭА в условиях  
термоциклирования в вакууме в диапазоне температур от минус 80°С до  
+180°С, ассистированного радиационным воздействием, приводящей к  
возникновению дуговых разрядов в бортовом оборудовании в условиях  
космического пространства»

Шифр « \_\_\_\_\_ »

#### **1 Основание для проведения ОКР**

Требования не устанавливаются.

#### **2 Исполнитель ОКР**

Требования не устанавливаются.

#### **3 Цель выполнения ОКР**

3.1 Разработка оборудования для диагностики деградации  
электроизоляционных характеристик элементов РЭА в условиях  
термоциклирования в вакууме в диапазоне температур от минус 80°С до  
+180°С, ассистированного радиационным воздействием, приводящей к

возникновению дуговых разрядов в бортовом оборудовании в условиях космического пространства.

3.2 Разработка методик формирования условий, имитирующих отдельно или в комплексе условия орбитального космического пространства, с точной диагностикой параметров окружающей среды и имитирующих воздействий.

3.3 Разработка методик, программных и аппаратных средств автоматизированной диагностики предпробойных процессов и раннего дугообразования в бортовом оборудовании.

#### **4 Назначение продукции**

4.1 Разрабатываемый комплекс оборудования (далее «комплекс») предназначен для наземной экспериментальной отработки (НЭО) радиоэлектронного оборудования (РЭА) и частей бортовой кабельной сети (БКС) космических аппаратов (КА) с целью диагностики деградации электроизоляционных характеристик изолирующих элементов в условиях термоциклирования в вакууме в диапазоне температур от минус 80°C до +180°C, ассистированного радиационным воздействием, идентичным радиационному воздействию орбитального космического пространства (КП), приводящей к возникновению дуговых разрядов в бортовом оборудовании.

#### **5 Технические требования**

##### **5.1 Состав продукции**

5.1.1 В состав разрабатываемого Комплекса должны входить:

- 1) универсальная вакуумная камера с системой создания и поддержания газовой среды контролируемого состава и давления для создания условий имитации КП и испытания модулей РЭА и БКС на устойчивость к дугообразованию;
- 2) система термостатирования исследуемого элемента в диапазоне температур от минус 80°C до +150°C;
- 3) источник плазмы первичного разряда;



- 4) источник плазмы окружающего пространства;
- 5) источники высокоэнергетических электронов и протонов;
- 6) комплекс диагностического оборудования для измерения параметров окружающей среды и электрофизических процессов в тестируемой РЭА;
- 7) осциллографическая техника с общим числом каналов не менее 12, из которых 3 канала используются для регистрации сигналов первичного разряда, 3 для регистрации сигналов вторичного разряда и зонда, по 2 канала для источников плазмы, электронов и протонов, имеющих полосу пропускания не ниже 100 МГц, разрядностью не ниже 8 бит, длиной записи не менее 250 тыс. точек на канал;
- 8) программная реализация численно-аналитической модели процессов возникновения дуговых разрядов в бортовом оборудовании в условиях космического пространства;
- 9) программная реализация объектно-ориентированной СУБД, основанной на элементах РЭА КА в качестве объектов и численно-аналитической модели процессов возникновения дуговых разрядов в бортовом оборудовании в условиях космического пространства в качестве метода;
- 10) управляющая программа для задания режимов испытания и отслеживания технического состояния Комплекса;
- 11) эксплуатационная документация, включающая методики имитации условий КП и методики диагностики предпробойного состояния и раннего дугообразования.

## **5.2 Требования к показателям назначения**

### **5.2.1 Выполняемые функции**

#### **5.2.1.1 Разрабатываемый Комплекс должен обеспечивать:**

- 1) имитацию условий эксплуатации КА:
  - а) требуемый диапазон давлений окружающей среды;
  - б) требуемый диапазон температур;
  - в) требуемые параметры плазменного окружения;
  - г) требуемые параметры потоков высокоэнергетических частиц;

2) имитацию первичного разряда:

а) электростатический разряд при высоком напряжении;

б) испарение проводника при низком напряжении;

3) измерения:

а) давления и состава окружающей атмосферы;

б) параметры окружающей среды;

в) параметры плазменного окружения;

г) дозиметрия;

д) токи и напряжения разряда в первичном промежутке и испытываемом модуле.

2.2.1.2 ПО в составе Комплекса должно обеспечивать возможность:

- управления Комплексом в автоматическом режиме;

- управления Комплексом в пошаговом режиме;

- ведения протокола режимов работы Комплекса синхронно с протоколом измерений;

- формирования электронного журнала работ на Комплексе.

5.2.2 Нормы и количественные показатели

5.2.2.1 Разрабатываемый комплекс должен обеспечивать испытание стандартного модуля РЭА КА либо его имитатора, идентичного по габаритным размерам и функциональным характеристикам.

5.2.2.2 Разрабатываемый комплекс должен обеспечивать скорости изменения температуры и давления, идентичные скоростям изменений, имеющих место при эксплуатации КА в реальных условиях.

5.2.2.3 Параметры плазменного окружения должны задаваться в соответствии с

ОСТ 134-1044-20.

5.2.2.4 Параметры потоков высокоэнергетических частиц должны задаваться в соответствии с ОСТ 134-1044-2007 и ОСТ 134-1034-2003.

5.2.2.5 Для инициирования первичного электростатического разряда должно использоваться высокое напряжения не выше 25 кВ.

- 5.2.2.6 Для питания первичного дугового разряда должно использоваться напряжение, равное напряжению БКС испытываемого КА.
- 5.2.3 Технические характеристики (параметры).
- 5.2.3.1 Давление окружающей среды должно изменяться от атмосферного до  $10^{-4}$  Па.
- 5.2.3.2 Температуры испытываемого элемента должна изменяться от минус  $80^{\circ}\text{C}$  до  $+180^{\circ}\text{C}$ .
- 5.2.3.3 Объём рабочей камеры должен быть не менее 100 л.
- 5.2.3.4 Скорость откачки высоковакуумного насоса должна быть не менее 700 л/с.
- 5.2.3.5 Максимальная тепловая мощность, отводимая от испытываемого элемента на стадии охлаждения при термоциклировании, должна быть не менее 500 Вт.
- 5.2.3.6 Средства откачки должны быть изготовлены в химически стойком исполнении.
- 5.2.4 Требования к порядку и способам взаимодействия с сопрягаемыми объектами
- 5.2.4.1 Управление составными частями Комплекса должно осуществляться с использованием программных и аппаратных средств автоматизации.
- 5.2.4.2 Технические средства разрабатываемого Комплекса должны содержать стандартные интерфейсы, обеспечивающие интеграцию составных частей через управляющий компьютер.
- 5.2.5 Требования к совместимости
- 5.2.5.1 Разрабатываемый Комплекс должен обеспечивать электромагнитную совместимость в соответствии с требованиями ГОСТ Р 50397-2011 (МЭК 60050-161:1990).
- 5.2.5.2 Рабочая вакуумная камера должны быть совместима со стандартным вакуумным оборудованием, офланцованном в соответствии с ГОСТ Р 52856-2007.
- 5.2.6 Требования по мобильности

Разрабатываемый Комплекс должен быть выполнен в стационарном исполнении.

### **5.3 Требования к электропитанию**

5.3.1 Электропитание разрабатываемого Комплекса должно осуществляться от 3-фазной электросети 50 Гц 220 В  $\pm 5\%$  в соответствии с ГОСТ Р 54149-2010.

5.3.2 Потребляемая мощность Комплекса в рабочем режиме должна составлять 5 кВА, не более.

### **5.4 Требования к надёжности**

Разрабатываемый Комплекс должен удовлетворять следующим требованиям:

- 1) вероятность безотказной работы 0,95, не менее;
- 2) время восстановления после отказа, вызванного сбоем электропитания технических средств (и/или иными внешними факторами) при условии соблюдения условий эксплуатации технических средств 4 часа, не более;
- 3) время восстановления после отказа, вызванного неисправностью технических средств, фатальным сбоем операционной системы управляющего компьютера 16 часов, не более.

#### **5.4.2 Требования по долговечности**

Разрабатываемый Комплекс должен удовлетворять следующим требованиям:

- 1) ресурс между капитальными ремонтами 2 года, не менее;
- 2) ресурс до списания 50000 час., не менее;
- 4) срок службы до списания 10 лет, не менее.

#### **5.4.3 Требования по сохраняемости**

Разрабатываемый Комплекс должен удовлетворять следующему требованию:

- гамма-процентный срок сохраняемости при  $\gamma = 95 \%$  10 лет (термины и определения по ГОСТ 27.002-89), не менее."

#### **5.4.4 Критерии отказов и предельного состояния изделия**

5.4.4.1 Отказом разрабатываемого Комплекса следует считать прекращение выполнения Комплексом функций, заданных требованиями п. 5.2.2 и 5.2.3 настоящего технического задания.

5.4.4.2 Предельным состоянием разрабатываемого Комплекса следует считать:

1) отказ одной или нескольких составных частей Комплекса, восстановление или замена которых на месте эксплуатации не предусмотрена эксплуатационной документацией и должна выполняться в ремонтных органах;

2) превышение установленного уровня текущих (суммарных) затрат на техническое обслуживание и ремонты, определяющее экономическую нецелесообразность дальнейшей эксплуатации.

## **5.5 Конструктивные требования**

5.5.1 Комплекс должен быть выполнен в соответствии с разделом 2 «Технические требования» ГОСТ 24686-81.

5.5.2 Рабочая вакуумная камера Комплекса должна быть расположена на рамочном основании, в нижней части которого (под вакуумной камерой) должны располагаться вакуумные насосы, вакуумные компоненты и система подготовки и напуска газа.

5.5.3 Рамочное основание должно быть открытым и обеспечивать свободный доступ к насосам с любой из сторон основания.

5.5.4 Рабочая вакуумная камера должна удовлетворять следующим требованиям:

- 1) форма и размеры камеры должна обеспечивать перемещение модулей размером до 200×300×40 мм, расположенных вертикально стороной размером 200 мм, в одну из 8-ми позиций на боковой поверхности камеры;
- 2) камера должна быть офланцована в соответствии с ГОСТ Р 52856-2007;
- 3) камера соединяется со средствами откачки трубопроводами в соответствии с ГОСТ Р 52715-2007;

4) камера должна быть укомплектована смотровыми вакуумными окнами, обеспечивающими наблюдение за объектом испытание в любой из рабочих позиций;

5) камера должна быть обеспечена резервными электрическими вводами в количестве не менее 10 в герметичном исполнении на напряжение до 300 В и ток до 10 А.

5.5.5 Электронные блоки, обслуживающие вакуумную систему и устройства имитации КП, содержащие приборы, должны монтироваться в стандартный телекоммуникационный шкаф типоразмера 19" 600 мм × 600 мм или 600 мм × 800 мм, имеющий устройства распределения питания и сбора аварийных сигналов.

5.5.6 Оптические и электрические разъемы должны быть расположены на передней панели блоков и приборов.

5.5.7 Оборудование не должно требовать доступа сзади при монтаже, подводке кабеля и обслуживании.

5.5.8 Конструкция кабельных вводов должна обеспечивать легкий и безопасный для персонала доступ к оптическим волокнам с целью подсоединения и испытания.

5.5.9 Внешние оптические и электрические соединители (разъемы) должны иметь маркировку, позволяющую определить те части разъемов, которые подлежат соединению между собой. Ответные части одного и того же разъема должны иметь одинаковую маркировку. Маркировка должна наноситься на корпусах ответных частей разъемов на видном месте.

5.5.10 Кабели соединительный должны обеспечивать удаление электронных и приборных блоков от рабочей вакуумной камеры на расстояние и друг от друга на расстояние до 5 м.

## **5.6 Требования по эргономике и технической эстетике**

По эргономике и технической эстетике разрабатываемый Комплекс должен соответствовать требованиям ГОСТ 20.39.108-85.

## **5.7 Требования к эксплуатации, удобству технического обслуживания и ремонта**

### 5.7.1 Требования к стойкости к внешним воздействующим факторам

Разрабатываемый Комплекс должен соответствовать группе климатического исполнения УХЛ4 по ГОСТ 15150-69.

### 5.7.2 Требования к эксплуатационным показателям

5.7.2.1 Разрабатываемый Комплекс должен обслуживаться персоналом в количестве и с квалификацией, не менее, не ниже:

- 1) руководитель научной группы (старший научный сотрудник), кандидат наук – 1;
- 2) младший научный сотрудник – 1;
- 3) инженер-программист – 1;
- 4) инженер – 1;
- 3) техник.

5.7.2.2 Разрабатываемый Комплекс должен функционировать в следующих режимах:

- 1) основной – полное функционирование Комплекса;
- 2) аварийный – автоматический безопасный останов функционирования.

5.7.2.3 Разрабатываемый Комплекс должен обеспечивать непрерывную круглосуточную работу с остановкой на обслуживание не менее чем через каждые 100 часов.

5.7.2.4 Должна быть обеспечена аварийная остановка разрабатываемого Комплекса при возникновении следующих ситуаций:

- 1) несанкционированное отключение блоков управления/питания Комплекса в целом либо его составных частей;
- 2) остановка подачи воды в охлаждающих контурах системы термостатирования исследуемого элемента в диапазоне температур от минус 80°C до +150°C;
- 3) несанкционированное повышение давление в рабочей вакуумной камере.

5.7.2.5 Периодическое техническое обслуживание разрабатываемого Комплекса должно проводиться не реже одного раза в год.

5.7.2.6 Периодическое техническое обслуживание должно включать в себя обслуживание всех составных частей Комплекса.

5.7.2.7 К обслуживанию комплекса должны допускаться лица, имеющие квалификационную группу по технике безопасности не ниже третьей, имеющие допуск к работе с электроустановками напряжением свыше 1000 В и прошедшие обучение на работу с Комплексом.

5.7.2.8 Гарантийный срок разрабатываемого Комплекса должен составлять 5 лет, не менее.

5.7.3 Требования по ремонтпригодности

5.7.3.1 Требования к ремонтпригодности Комплекса должно соответствовать ГОСТ 23660-79.

5.7.3.2 Обслуживание и ремонт Комплекса должны производиться без применения специальных инструментов.

## **5.8 Требования безопасности**

5.8.1 Технические средства разрабатываемого Комплекса по требованиям защиты человека от поражений электрическим током должны относиться к классу I и должны быть выполнены в соответствии с ГОСТ 12.2.007-0-75.

5.8.2 Разрабатываемый Комплекс при монтаже, наладке, обслуживании и ремонте должен соответствовать общим требованиям безопасности по ГОСТ 12.2.003-74 и ГОСТ 12.3.002-75.

5.8.3 Условия работы персонала разрабатываемой Системы должны соответствовать санитарным нормам по СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03."

5.8.4 Уровни шума и звуковой мощности в местах расположения персонала не должны превышать значений, установленных ГОСТ 12.1.003 и санитарными нормами.



5.8.4 Требования безопасности при монтаже, наладке, эксплуатации, обслуживании и ремонте разрабатываемого Комплекса должны быть приведены в эксплуатационной документации.

## **5.9 Требования стандартизации, унификации и каталогизации**

5.9.1 Комплекс должен быть разработан с учетом технической и экономически обоснованной унификации, стандартизации и взаимозаменяемости используемых деталей и узлов.

5.9.2 Вакуумные компоненты должны быть унифицированы в соответствии с ГОСТ Р 52856-2007.

5.9.3 Конструкции шкафов, рам, функциональных модулей должны быть унифицированы.

5.9.4 Управление Комплексом и обмен данными между Комплексом и управляющим компьютером должны осуществляться с использованием стандартизированных протоколов передачи данных. Использование удалённого управления Комплексом и сетевых протоколов передачи данных не допускается.

## **6 Требования по видам обеспечения**

### **6.1 Требования по метрологическому обеспечению**

6.1.1 Метрологическое обеспечение Комплекса должно включать в себя совокупность организационных мероприятий, технических средств, требований, положений, правил, норм и методик, необходимых для обеспечения единства измерений и требуемой точности измерений и вычислений.

6.1.2 Метрологическое обеспечение разрабатываемого Комплекса должно отвечать требованиям ГОСТ 8.009-84.

6.1.3 Методики выполнения измерений, применяемые для контроля параметров разрабатываемого Комплекса при испытаниях и эксплуатации, должны соответствовать требованиям ГОСТ Р 8.563-96 ГСИ.

6.1.4 Измерительное оборудование должно быть аттестовано по ГОСТ 8.326-89 ГСИ.

## **6.2 Требования по программному обеспечению**

6.2.1 Используемое ПО должно быть способно работать под управлением операционной системы MS Windows XP и выше на персональных компьютерах с индексом производительности Windows от 4 и выше.

6.2.2 Интерфейс пользователя должен обеспечивать визуализацию рабочего процесса.

6.2.3 Язык интерфейса пользователя – русский.

## **7 Требования к документации**

7.1 Виды, состав и комплектность технической документации установлены "Перечнем технической документации, разрабатываемой в рамках государственного контракта", приведенной в приложении к настоящему техническому заданию.

7.2 Техническая (конструкторская, технологическая, программная, эксплуатационная) документация должна соответствовать требованиям стандартов ЕСКД, ЕСТД, ЕСПД.

7.3 Перечень технической и другой отчетной документации, подлежащей оформлению и сдаче Исполнителем Заказчику на этапах выполнения работ, определяется требованиями настоящего технического задания и нормативными актами государственного заказчика.

7.4 Техническая и другая отчетная документация представляется Заказчику или уполномоченной им организации на бумажном носителе в двух экземплярах и в электронном виде на оптическом носителе в одном экземпляре.

## **8 Специальные требования**

### **8.1 Требования к испытаниям**

8.1.1 Для подтверждения и проверки выбранных конструктивно-схемных, конструктивно-технологических и технических решений, а также требований надежности и других, предъявляемых к опытному образцу разрабатываемого Комплекса, его составным частям (сборочным единицам) должны быть изготовлены и испытаны следующие макеты:

- 1) на втором этапе работы:
  - а) макет блока первичных разрядов;
  - б) макет источника внешней плазмы;
  - в) макет источник электронов;
  - г) макет источника протонов;
  - д) макет блока управления;
- 2) на пятом этапе работы:
  - а) макеты имитаторов модулей РЭА.

8.1.2 Испытания макетов должны быть проведены по утвержденным программам и методикам головного исполнителя ОКР.

8.1.3 Для подтверждения соответствия разрабатываемой продукции требованиям настоящего технического задания и нормативно-технической документации должны быть проведены следующие испытания опытного образца разрабатываемого Комплекса:

- 1) предварительные испытания с целью предварительной оценки соответствия опытного образца требованиям настоящего технического задания, а также для определения готовности опытного образца к приемочным испытаниям;
- 2) государственные приемочные испытания с целью оценки всех определенных настоящим техническим заданием характеристик Комплекса, проверки и подтверждения соответствия опытного образца требованиям настоящего технического задания в условиях, максимально приближенных к условиям реальной эксплуатации разрабатываемого Комплекса, а также для принятия решений о возможности его промышленного производства и реализации.

8.1.4 Для проведения испытаний должно быть изготовлено следующее количество опытных образцов разрабатываемого Комплекса:

- 1) для предварительных испытаний – 1 шт.;
- 2) для государственных приемочных испытаний – 1 шт.

8.1.5 Предварительные испытания опытного образца должны быть проведены по утвержденной программе и методикам головного исполнителя ОКР.

8.1.6 Государственные приемочные испытания опытного образца должны быть проведены по утвержденной программе и методикам головного исполнителя ОКР, согласованным с Заказчиком.

8.1.7 Место проведения испытаний должны быть определены в Программе и методиках соответствующих испытаний.

## **9 Техничко-экономические требования**

### **9.1 Основные технико-экономические требования**

9.1.1 Разрабатываемый Комплекс должен обеспечить испытание модулей РЭА и БКС на устойчивость к дугообразованию в условиях, максимально точно имитирующих условия эксплуатации КА.

9.1.2 Разрабатываемый Комплекс должен быть ориентирован на использование в НЭО КА.

9.1.2 Разрабатываемый комплекс должен обеспечивать разработку критериев устойчивости РЭА КА к вторичному дугообразованию в объёме, необходимом и достаточном для разработки отраслевых и государственных стандартов, в частности, в рамках ОСТ 134.

9.1.3 Стоимость выполнения ОКР в целом не должна превышать 45 000 000,00 руб.

9.1.4 Нормативная трудоёмкость технического обслуживания Комплекса в процессе эксплуатации не должна превышать 55 человеко–месяцев в год.

9.1.5 Среднегодовая стоимость эксплуатации Комплекса не должна превышать 3 000 000,00 руб.

### **9.2 Требования к достижению программных индикаторов и показателей**

В процессе выполнения ОКР должны быть достигнуты следующие значения программных индикаторов:

| Наименование | ед. | Год |
|--------------|-----|-----|
|--------------|-----|-----|

|  | изм.   | 2014 | 2015 | 2016 |
|--|--------|------|------|------|
| Индикаторы   |        |      |      |      |
| И2.N.2 Число завершенных проектов, перешедших в стадию коммерциализации  | единиц | 0    | 0    | 1    |
| И2.N.3 Число патентов (в том числе международных) на результаты интеллектуальной деятельности, полученные в рамках выполнения комплексных проектов   | единиц | 0    | 1    | 1    |
| И2.N.4 Численность молодых специалистов, привлеченных к проведению исследований в рамках комплексных проектов (докторов наук, кандидатов наук, докторантов, аспирантов, сотрудников без ученой степени, специалистов, студентов) | чел.   | 7    | 7    | 7    |
| И2.N.6 Число публикаций, содержащих результаты интеллектуальной деятельности, полученные в рамках выполнения комплексных проектов  | единиц | 1    | 2    | 2    |
| Показатели   |        |      |      |      |
| Количество новых рабочих мест, созданных в рамках  | единиц | 1    | 2    | 1    |

|   |  |  |  |  |
|---|--|--|--|--|
| реализации проектов, для высококвалифицированных работников |  |  |  |  |
|---|--|--|--|--|

## **10 Требования к патентной чистоте и патентоспособности**

10.1 На этапах 1 и 2 ОКР должны быть проведены патентные исследования в соответствии с ГОСТ Р 15.011-96.

10.2 Должны быть представлены сведения об охранных и иных документах, которые будут препятствовать применению результатов работ в Российской Федерации (и в других странах – по требованию заказчика), и условия их использования с представлением соответствующих обоснованных предложений и расчетов.

10.3 Патентная чистота на методы испытания РЭА и БКС КА должна быть обеспечена в отношении Российской Федерации и стран, куда возможна поставка изделий, а также передача технической, информационной и другой документации.

10.4 РИД, полученные в ходе выполнения ОКР, подлежат регистрации и охране в соответствии с действующим законодательством Российской Федерации.

## **11 Перечень, содержание, сроки выполнения и стоимость этапов**

### **11.1 Наименование этапов и выполняемые работы**

Этап 1. Техническое предложение:

1.1 Разработка и согласование с Заказчиком "Комплектности технической документации, разрабатываемой в рамках государственного контракта" (далее Комплектность ТД).

1.2 Проведение патентных исследований в соответствии с ГОСТ Р 15.011-96.

1.3 Разработка технического предложения, в том числе:

- проработка результатов предшествующих НИР;
- проработка результатов прогнозирования;

- предварительные расчеты;
- сравнительная оценка рассматриваемых вариантов;
- обоснование и выбор оптимального варианта технического решения.

1.4 Разработка технической документации в соответствии с согласованной Комплектностью ТД.

1.5 Оформление документации технического предложения в соответствии с ГОСТ 2.118-73, его рассмотрение и утверждение на научно-техническом совете.

1.6 Реализация мероприятий по достижению технико-экономических показателей п. 9.2 ТЗ.

1.7 Разработка отчетной документации в соответствии с требованиями Регламента.

Этап 2. Эскизный проект:

2.1 Разработка эскизного проекта, в том числе:

- исследование, обоснование и формулировка назначения, области применения и основных технических характеристик Комплекса;
- конструкторская проработка вариантов возможных решений, выбор конструкции;
- изготовление и испытания макетов в соответствии с п. 8.1.1 ТЗ;
- проведение ориентировочных расчетов по показателям работоспособности, надежности изделия и экономическим показателям;
- оценка разрабатываемого Комплекса по показателям технологичности, стандартизации и унификации, эргономики и технической эстетики;
- проверка соответствия вариантов требованиям техники безопасности и производственной санитарии.

2.2 Проведение патентных исследований в соответствии с ГОСТ Р 15.011-96.

2.3 Оформление документации эскизного проекта в соответствии с ГОСТ 2.119-73, его рассмотрение и утверждение на научно-техническом совете.

2.4 Реализация мероприятий по достижению технико-экономических показателей п. 9.2 ТЗ.

2.5 Разработка отчетной документации в соответствии с требованиями Регламента.

Этап 3. Технический проект:

3.1 Разработка технического проекта, в том числе:

— разработка конструктивных решений Комплекса и его составных частей;

— разработка и обоснование технических решений, обеспечивающих показатели надежности;

— Разработка ПО рабочего места НЭО;

— Проведение вычислительного моделирования эмиссионных и плазменных процессов в модулях РЭА;

— Разработка трёхмерной модели бортовой РЭА и БКС по ЭСР и дугообразованию

— Разработка методики интеллектуального анализа результатов испытаний бортовой РЭА;

— оценка соответствия Комплекса требованиям технического задания;

— оценка технологичности изготовления.

3.2 Разработка конструкторской, эксплуатационной документации в соответствии с согласованным Перечнем (комплектностью).

3.3 Оформление документации технического проекта в соответствии с ГОСТ 2.120-73, его рассмотрение и утверждение на научно-техническом совете.

3.4 Реализация мероприятий по достижению технико-экономических показателей п. 9.2 ТЗ.

3.5 Разработка отчетной документации в соответствии с требованиями Регламента.

Этап 4. Разработка рабочей документации (РД):

4.1 Разработка конструкторской документации (КД) на Комплекс.

4.2 Разработка проектов ТУ и эксплуатационной документации.



- 4.3 Разработка технологической документации для изготовления опытного образца Комплекса;
- 4.4 Экспертиза разработанной рабочей конструкторской документации.
- 4.5 Разработка программы и методик предварительных испытаний.
- 4.6 Реализация мероприятий по достижению технико-экономических показателей п. 9.2 ТЗ.
- 4.7 Разработка отчетной документации в соответствии с требованиями Регламента.

Этап 5. Изготовление опытного образца и проведение предварительных испытаний:

- 5.1 Подготовка опытного производства для изготовления опытного образца.
- 5.2 Изготовление специального оборудования для проведения предварительных испытаний.
- 5.3 Изготовление опытного образца Комплекса.
- 5.4 Проведение предварительных испытаний опытного образца Комплекса.
- 5.5 Корректировка РД Комплекса по результатам предварительных испытаний, присвоение КД литеры "О".
- 5.6 Доработка опытного образца Комплекса в целом по результатам предварительных испытаний.
- 5.7 Разработка программы и методик приемочных (государственных) испытаний.
- 5.8 Реализация мероприятий по достижению технико-экономических показателей п. 9.2 ТЗ.
- 5.9 Разработка отчетной документации в соответствии с требованиями Регламента.

Этап 6. Проведение приемочных (государственных) испытаний:

- 6.1 Подготовка РД и опытного образца Комплекса к приемочным (государственным) испытаниям.

6.2 Проведение приемочных (государственных) испытаний опытного образца Комплекса.

6.3 Проверка и оценка проектов ТУ и ЭД.

6.4 Корректировка КД и ЭД Комплекса по результатам приемочных (государственных) испытаний, присвоение КД литеры "О1".

6.5 Доработка опытного образца Комплекса по результатам приемочных (государственных) испытаний.

6.6 Реализация мероприятий по достижению технико-экономических показателей п. 9.2 ТЗ.

6.7 Разработка отчетной документации в соответствии с требованиями Регламента.

## **11.2 Сроки исполнения и финансирование по этапам**

Перечень документов, разрабатываемых на этапах выполнения ОКР, сроки исполнения и контрактная цена приведены в календарном плане (приложение к государственному контракту).

## **12 Порядок выполнения и приемки этапов ОКР**

12.1 Работа должна выполняться в соответствии с требованиями ГОСТ 34.601-90, РД 50-680-88 (с учетом требований ГОСТ 15.005-86).

12.2 Сдача и приемка выполненных работ (этапов работ) осуществляется в порядке, установленном актами Заказчика, и в соответствии с требованиями настоящего технического задания.

Перечень технической документации, разрабатываемой в рамках государственного контракта на проведение ОКР по теме «Разработка комплекса оборудования для диагностики деградации электроизоляционных характеристик элементов РЭА в условиях термоциклирования в вакууме в диапазоне температур от минус 80°С до +180°С, ассистированного радиационным воздействием, приводящей к возникновению дуговых разрядов в бортовом оборудовании в условиях космического пространства»

- 1 Документы, разрабатываемые на стадии выполнения «Техническое предложение» в соответствии с ГОСТ 2.118-73
  - 1.1 Чертеж общего вида на разрабатываемый Комплекс.
  - 1.2 Ведомость технического предложения.
  - 1.3 Пояснительная записка на техническое предложение с приложениями.
  - 1.4 Акт о разработке технического предложения.
  - 1.5 Выписка из решения НТС Исполнителя по техническому предложению.
  - 1.6 Протокол рассмотрения технического предложения на секции НТС Заказчика.
- 2 Документы, разрабатываемые на стадии выполнения «Эскизный проект» в соответствии с ГОСТ 2.119-73
  - 2.1 Чертёж общего вида на разрабатываемый Комплекс, включающий:
    - а) чертёж общего вида блока первичных разрядов;
    - б) чертёж общего вида источника внешней плазмы;
    - в) чертёж общего вида источник электронов;
    - г) чертёж общего вида источника протонов;
    - д) чертёж общего вида блока управления.
  - 2.2 Ведомость эскизного проекта.

- 2.3 Пояснительная записка на эскизный проект с приложениями.
- 2.4 Документы, предусмотренные протоколом рассмотрения технического предложения.
- 2.5 Акт о разработке эскизного проекта.
- 2.6 Выписка из решения НТС Исполнителя по эскизному проекту.
- 2.7 Протокол рассмотрения эскизного проекта на секции НТС Заказчика.
- 2.8 Акт о доработке эскизного проекта (при наличии замечаний).
- 3 Документы, разрабатываемые на стадии выполнения «Технический проект» в соответствии с ГОСТ 2.120-73
- 3.1 Чертеж общего вида на разрабатываемый Комплекс, включающий:
- указания о выбранных посадках деталей;
  - технические требования к изделию;
  - технические характеристики изделия, необходимые для последующей разработки чертежей.
- 3.2 Ведомость технического проекта.
- 3.3 Пояснительная записка на технический проект с приложениями.
- 3.4 Документы, предусмотренные протоколами рассмотрения технического предложения и эскизного проекта.
- 3.5 Акт о разработке технического проекта.
- 3.6 Выписка из решения НТС Исполнителя по техническому проекту.
- 3.7 Протокол рассмотрения технического проекта на секции НТС Заказчика.
- 3.8 Акт о доработке технического проекта (при наличии замечаний).
- 4 Документы, разрабатываемые на стадии выполнения «Разработка рабочей конструкторской документации» в соответствии с ГОСТ Р 15.201-2000
- 4.1 Рабочая документация (РД) на опытный образец Комплекса, включающая:
- 1) конструкторскую документацию (КД);
  - 2) проект технических условий (ТУ);
  - 3) эксплуатационную документацию (ЭД);

4) технологическую документацию (ТД) на изготовление опытного образца Комплекса.

4.2 Акт о разработке комплекта РД.

4.3 Ведомость покупных изделий.

4.4 Акт рассмотрения РД Заказчиком.

4.5 Ведомость разрешения применения покупных изделий в соответствии с ГОСТ 2.124-85.

4.6 Акт о доработке РД (при наличии замечаний).

4.7 Акт о передаче КД и ТД в опытное производство для рассмотрения и технологической подготовки производства.

4.8 Акт о доработке КД и ТД при наличии замечаний опытного производства.

4.9 Акт о согласовании доработанных КД и ТД с Заказчиком.

4.10 Акт о передаче доработанной КД и ТД опытному производству.

4.11 Программа и методики (ПМ) предварительных испытаний.

4.12 Акт о рассмотрении ПМ предварительных испытаний Заказчиком.

4.13 Акт о доработке ПМ (при наличии замечаний).

5 Документы, разрабатываемые на стадии выполнения «Изготовление опытного образца и проведение предварительных испытаний» в соответствии с ГОСТ Р 15.201-2000

5.1 Акт о готовности опытного производства.

5.2 Акт об изготовлении специального оборудования (стендовой базы) для проведения предварительных испытаний.

5.3 Акт об изготовлении опытного образца Комплекса.

5.4 Акт о вводе опытного образца Комплекса в эксплуатацию.

5.5 Акт о готовности к испытаниям.

5.6 Акт о готовности специального оборудования (стендовой базы) к испытаниям.

5.7 Формуляр (паспорт) на опытный образец Комплекса.

5.8 Технический отчет о результатах предварительных испытаний.

- 5.9 Акт о результатах предварительных испытаний.
- 5.10 Акт о доработке РД на опытный образец Комплекса.
- 5.11 Акт о присвоении КД литеры "О".
- 5.12 Акт о доработке опытного образца Комплекса в соответствии с результатами предварительных испытаний.
- 5.13 ПМ приёмочных (государственных) испытаний.
- 5.14 Акт о рассмотрении ПМ приёмочных (государственных) испытаний Заказчиком.
- 5.15 Акт о доработке ПМ приёмочных (государственных) испытаний (при наличии замечаний).
- 6 Документы, разрабатываемые на стадии выполнения «Проведение приёмочных (государственных) испытаний» в соответствии с ГОСТ Р 15.201-2000
  - 6.1 Акт о готовности к приёмочным (государственным) испытаниям.
  - 6.2 Технический отчёт о результатах приёмочных (государственных) испытаний.
  - 6.3 Акт о результатах приёмочных (государственных) испытаний.
  - 6.4 Акт о результатах оценки РД на опытный образец Комплекса.
  - 6.5 Акт о доработке РД на опытный образец Комплекса.
  - 6.6 Акт о присвоении КД литеры "О<sub>1</sub>".
  - 6.7 Акт о доработке опытного образца Комплекса по результатам приёмочных (государственных) испытаний.