

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. № 2013.05.24

УТВЕРЖДАЮ:

Директор ИСЭ СО РАН,  
ч. корр. РАН



*Н.А. Ратахин* /Ратахин Н.А./  
07 2013 г.

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»

«Выбор направления исследований. Теоретические и экспериментальные исследования поставленных перед НИР задач»

(промежуточный)

Шифр 2013-1.4-14-514-0010-013

Руководитель темы:

*А.В. Батраков* 01.07.2013 А.В. Батраков  
подпись, дата

Томск 2013

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

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

  
\_\_\_\_\_ 01.07.13  
подпись, дата

А.В. Батраков (введение,  
заключение,  
раздел 1.1)

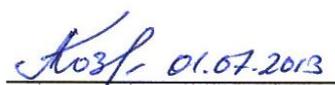
Ответственный  
исполнитель темы,  
Профессор,  
д-р техн. наук

  
\_\_\_\_\_ 01.07.13  
подпись, дата

В.А. Лавринович (разделы 1.2, 1.5,  
1.6)

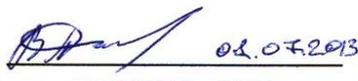
Исполнители темы:

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

  
\_\_\_\_\_ 01.07.2013  
подпись, дата

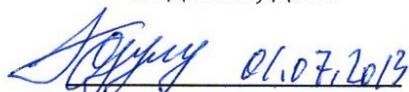
А.В. Козырев (разделы 1.7, 1.8, 1.11)

Доцент,  
канд. физ.-мат. наук

  
\_\_\_\_\_ 02.07.2013  
подпись, дата

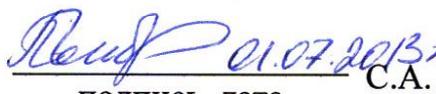
В.С. Ким (разделы 1.4, 1.5)

Ведущий научный  
сотрудник,  
д-р техн. наук

  
\_\_\_\_\_ 01.07.2013  
подпись, дата

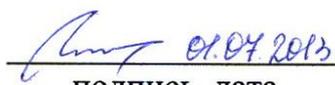
Г.Е. Озур (раздел 1.6)

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

  
\_\_\_\_\_ 01.07.2013  
подпись, дата

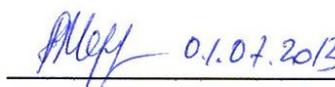
С.А. Попов (раздел 1.13)

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

  
\_\_\_\_\_ 01.07.2013  
подпись, дата

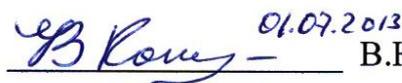
Е.В. Нефёдцев (раздел 1.11)

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

  
\_\_\_\_\_ 01.07.2013  
подпись, дата

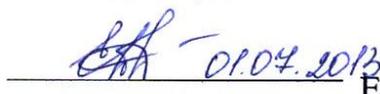
А.Б. Марков (раздел 1.9)

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

  
\_\_\_\_\_ 01.07.2013  
подпись, дата

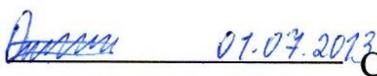
В.Ю. Кожевников (разделы 1.9,  
1.10, 1.12)

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

  
\_\_\_\_\_ 01.07.2013  
подпись, дата

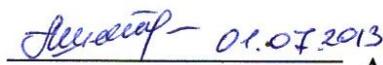
Е.Л. Дубровская (Приложение А)

Младший научный  
сотрудник

  
\_\_\_\_\_ 01.07.2013  
подпись, дата

С.А. Онищенко (раздел 1.6.2)

Младший научный  
сотрудник

  
\_\_\_\_\_ 01.07.2013  
подпись, дата

А.В. Шнайдер (раздел 1.13)

Аспирант  01.07.2013 В.И. Петров (раздел 1.6.3)  
подпись, дата

Аспирант 01.07.2013  Е.В. Яковлев (раздел 1.6.3)  
подпись, дата

Аспирант  01.07.2013 П.П. Кизириди (раздел 1.6.3)  
подпись, дата

Вед. конструктор  01.07.2013 А.Г. Падей (раздел 1.6.2)  
подпись, дата

Вед. инженер  01.07.2013 Карлик К.В. (раздел 1.6.2)  
подпись, дата

Вед. инженер  01.07.2013 А.В. Миков (раздел 1.6.2)  
подпись, дата

Техник, студент  01.07.2013 Г.С. Арестов (раздел 1.6.2)  
подпись, дата

Нормоконтролёр  С.В. Лыков  
подпись, дата

## Реферат

Отчет 150 с., 1 ч., 31 рис., 9 табл., 88 источников, 1 прил.

### КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ, ВАКУУМНАЯ ДУГА, ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ РАЗРЯД, 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 анализ современной научно-технической, нормативной, методической литературы по теме исследований; выбор направления исследований; проведение патентных исследований; анализ методов выявления латентных технологических дефектов бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов с длительным сроком активного существования, приводящих к возникновению дуговых разрядов в условиях космического пространства; разработка метода исследования процессов возникновения дуговых разрядов в бортовом оборудовании в условиях космического пространства; теоретическое исследование путей создания численно-аналитической модели процессов возникновения дуговых разрядов; разработка численно-аналитической модели процессов; разработка алгоритмов для программной реализации численно-аналитической модели; обоснование выбора приложения для программной реализации численно-аналитической модели; обосновании и выборе задач для численно-аналитического моделирования; разработка программной реализации модели и разработка программы и методик экспериментальных исследований численно-аналитической модели процессов возникновения дуговых разрядов в бортовом оборудовании в условиях космического пространства.

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 и осуществлена её программная реализация. Были разработаны методологические основы способа диагностики радиоэлектронной аппаратуры с целью выявления латентных дефектов, способных приводить к дугообразованию при эксплуатации космических аппаратов. Были проведены патентные исследования с целью выявления уровня техники в области исследования, и определено направление дальнейших патентных исследований и разработки результата интеллектуальной деятельности. Была разработана программа и методика исследования численно-аналитической модели.

## Содержание

Введение .....	10
1 Аналитический обзор современной научно-технической, нормативной, методической литературы, затрагивающей проблему обеспечения надежности работы бортового оборудования в условиях космического пространства .....	13
1.1 Обзор научно-технической, нормативной и методической литературы по проблеме дугообразования в условиях космического пространства .....	13
1.1.1 Обзор литературы по фундаментальным основам физики вакуумной дуги .....	13
1.1.2 Обзор литературы по описанию специфических условий орбитального КП, имеющих отношение к проблеме дугообразования .....	16
1.1.3 Обзор литературы по ЭСР и дугообразованию при эксплуатации КА в условиях орбитального КП .....	18
1.2. Анализ проблемы дугообразования в бортовом оборудовании при эксплуатации космических аппаратов .....	19
1.2.1 Физические факторы, воздействующие на РЭА в условиях КП .....	19
1.2.2 Накопление избыточных зарядов на ЭРИ в условиях КП .....	26
1.2.3 Механизмы инициирования первичной вакуумной дуги при низкой разности потенциалов .....	30
1.2.4 Механизмы инициирования вторичной вакуумной дуги .....	42
2 Выбор направления исследований в области разработки методов выявления латентных технологических дефектов бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов с длительным сроком активного существования, приводящих к возникновению дуговых разрядов в условиях космического пространства .....	44
3 Анализ существующих методов обнаружения опасных технологических дефектов в электронных платах .....	48
3.1 Общие требования к аппаратуре и методам контроля .....	48

3.2 Классификация методов контроля.....	50
4 Комплексный анализ современных методов выявления латентных технологических дефектов бортовой РЭА КА с длительным сроком активного существования, приводящих к возникновению дуговых разрядов в условиях космического пространства.....	52
4.1 Методы снижения рисков, связанных с нитевидными кристаллами.....	53
4.2 Методы снижения рисков, связанных с иницированием дуги электростатическим разрядом .....	57
4.3 Нормативные документы, регламентирующие меры по снижению рисков дугообразования в РЭА КА.....	62
5 Разработка комплексных методов выявления латентных технологических дефектов бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов с длительным сроком активного существования, в т.ч. метод исследования процессов возникновения дуговых разрядов в бортовом оборудовании в условиях космического пространства.....	65
5.1 Модельное представление элементов РЭА, подверженных риску дугообразования при эксплуатации в условиях КП.....	65
5.2 Конфигурация разрядной системы для определения вероятности иницирования вторичной дуги первичной дугой.....	67
5.3 Соединение физического эксперимента с программной реализацией метода .....	70
6 Теоретические исследования путей создания численно-аналитической модели процессов возникновения дуговых разрядов в бортовом оборудовании в условиях космического пространства.....	71
6.1 Описание эмиссионных процессов на поверхности твердого тела ....	72
6.2 Катодный слой тлеющего разряда с учетом автоэмиссии.....	77
6.3 Образование и функционирование катодного пятна .....	81

7 Разработка численно-аналитической модели процессов возникновения дуговых разрядов в бортовом оборудовании в условиях космического пространства.....	85
7.1 Формулировка математической модели.....	85
7.2 Граничные условия для математической модели .....	90
8 Разработка алгоритмов для программной реализации численно-аналитической модели процессов возникновения дуговых разрядов в бортовом оборудовании в условиях космического пространства.....	93
9 Обоснование выбора приложения для программной реализации численно-аналитической модели процессов возникновения дуговых разрядов в бортовом оборудовании в условиях космического пространства. ....	96
10 Обоснование и выбор задач для численно-аналитического моделирования процессов возникновения дуговых разрядов в бортовом оборудовании в условиях космического пространства.....	100
11 Разработка программной реализации разработанных алгоритмов, используемых для численно-аналитического моделирования процессов возникновения дуговых разрядов в бортовом оборудовании в условиях космического пространства. ....	103
12 Разработка Программы и методик экспериментальных исследований численно-аналитической модели процессов возникновения дуговых разрядов в бортовом оборудовании в условиях космического пространства. ....	110
Заключение .....	114
Список использованных источников .....	118
Приложение А. Отчёт о патентных исследованиях.....	127

## Обозначение и сокращения

БКС – бортовая кабельная сеть.

ДУ – двигательная(ые) установка(и).

ЗЧ – заряженная(ые) частица(ы).

ИИ – ионизирующее излучение.

КА – космический(е) аппарат(ы).

КЗ – короткое замыкание.

КМОП – комплементарный металл-оксидный полупроводник.

КП – космическое пространство.

НК – нитевидный кристалл.

РКТ – ракетно-космическая техника.

РПЗ – радиационный(е) пояс(ы) Земли.

РЭА – радиоэлектронная аппаратура.

СБ – солнечная(ые) батарея(и).

СПУ – система питания и управления.

УФ – ультрафиолет, ультрафиолетовый.

ЭКБ – электронная компонентная база.

ЭМС – электромагнитная совместимость.

ЭРИ – электрорадиотехнические изделия.

ЭСР – электростатический разряд.

ESA – Европейское космическое агенство.

NASA – Национальное аэрокосмическое агентство США.

## Введение

В условиях КП процессы, связанные с электрической изоляцией в вакууме, образуют сложную картину, отличную от условий лабораторного вакуума. Прежде всего, это связано с плазмой, окружающей КА и приводящей к накоплению статического электричества. В настоящее время основным источником плазмы является, как правило, сам КА, использующий ионные двигатели. Данная проблема является общей для КА в целом, но особенно затрагивает РЭА, наиболее чувствительную к высоким электрическим полям. Кроме статического электричества длительное пребывание на орбите накладывает условия, способные к накоплению дефектов и нарушению работоспособности РЭА. Одним из наиболее губительных проявлений отказов РЭА является инициирование дуговых разрядов. Процессы, приводящие к дугообразованию, являются многофакторными. Многие факторы поддаются учёту и контролю в лабораторных условиях, но, в силу многофакторности явления вакуумной дуги, часть из механизмов дугообразования могут быть неучтёнными, что, по сути, представляет собой наличие латентных дефектов, закладываемых ещё на стадии проектирования РЭА и КА в целом. Для выполнения условий эксперимента, максимально приближенных к реальным, разрабатываются стандартные процедуры лабораторных испытаний и анализа результатов, полученных при испытаниях. В качестве методов диагностики используются экспериментальные методы физики плазмы и электрофизики. Однако лабораторное тестирование неспособно выполнять прогностические функции, особенно с учётом требований длительной эксплуатации в условиях КА. Более перспективным является комплексное решение задачи обнаружения рисков дугообразования путём объединения различных элементарных процессов, прошедших экспериментальную проверку, в единый аналитический комплекс, осуществляющий целенаправленное физическое моделирование РЭА и СПУ с возможностью задания изменения характеристик во времени с целью выявления мест, наиболее подверженных дугообразованию, и оптимизации конструкции РЭА и СПУ с точки зрения

уменьшения рисков инициирования вакуумной дуги. Такая модель сможет претендовать на достоверность результатов после экспериментальных проверок, в том числе и сравнения с наблюдениями за КА в процессе эксплуатации. На поиск путей создания такой модели, на наполнение модели элементарными физическими процессами, являющимися наиболее значимыми для инициирования дугового разряда в специфических условиях РЭА КА направлен настоящий проект.

Целями этапа работы является анализ современной научно-технической, нормативной, методической литературы по теме исследований; выбор направления исследований; проведение патентных исследований; анализ методов выявления латентных технологических дефектов бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов с длительным сроком активного существования, приводящих к возникновению дуговых разрядов в условиях космического пространства; разработка метода исследования процессов возникновения дуговых разрядов в бортовом оборудовании в условиях космического пространства; теоретическое исследование путей создания численно-аналитической модели процессов возникновения дуговых разрядов; разработка численно-аналитической модели процессов; разработка алгоритмов для программной реализации численно-аналитической модели; обоснование выбора приложения для программной реализации численно-аналитической модели; обосновании и выборе задач для численно-аналитического моделирования; разработка программной реализации модели и разработка программы и методик экспериментальных исследований численно-аналитической модели процессов возникновения дуговых разрядов в бортовом оборудовании в условиях космического пространства.

На этапе работы выполнены патентные исследования, посвященные определению уровня техники в области разработки методов ранней диагностики дефектов радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов, приводящих к дугообразованию, и защита от дугообразования в условиях орбитального космического пространства. На основании патентных исследований были сделаны выводы:

- Значительный объём разработок по исследуемой проблеме сосредоточен на совершенствовании методов локализации и интерпретации причин дугообразования с целью быстрой защиты узла и системы в целом от разрушительных последствий дуги путём снятия напряжения и гашения дуги прекращением её питания.
- Имеются различные технические решения, позволяющие осуществлять мониторинг незавершённых пробоев, являющихся предвестниками и причинами самоподдерживающихся дуг.
- Тщательно разработанным направлением является комплексная диагностика аппаратов, управляемых электроникой, с использованием компьютерных средств сбора и обработки данных в реальном масштабе времени, позволяющая обеспечивать диагностические и прогностические функции, включая оценки оставшегося времени активного существования.
- Разработки, выполненные в направлении локализации зон воздействия первичных электростатических разрядов, являющихся неотъемлемым атрибутом функционирования радиоэлектронной аппаратуры открытой конфигурации в условиях орбитального космического пространства, с переходом первичных разрядов к самоподдерживающейся дуге ведутся не системно, и технические решения в данном направлении представлены скудно.
- Является технически обоснованной и потенциально востребованной разработчиками радиоэлектронного оборудования космических аппаратов деятельность по разработке методов локализации зон воздействия продуктов эрозии и излучения первичных электростатических разрядов с целью подавления дугообразования в условиях орбитального космического пространства.
- На втором этапе выполнения НИР следует осуществить разработку способа прогнозирования риска дугообразования в радиоэлектронной аппаратуре космических аппаратов и оформить и подать заявку на изобретение данного способа.

**1 Аналитический обзор современной научно-технической, нормативной, методической литературы, затрагивающей проблему обеспечения надежности работы бортового оборудования в условиях космического пространства.**

**1.1 Обзор научно-технической, нормативной и методической литературы по проблеме дугообразования в условиях космического пространства**

**1.1.1 Обзор литературы по фундаментальным основам физики вакуумной дуги**

Исследование вакуумной дуги имеет двухвековую историю и начинается с работ Василия Петрова (1802 г.), впервые зажегшего электрическую дугу не только на воздухе, но и в условиях разреженной атмосферы, в то время называемой вакуумом. На каждом этапе изучения данного явления представления о нём претерпевали качественные изменения, пока не была сформирована твердотельная эмиссионная электроника и физика плазмы, лежащие в основе электрического разряда.

Говоря о космическом пространстве, подразумевается, прежде всего, глубокий вакуум в качестве среды, и все явления, связанные с протеканием электрического тока через среду, целиком определяются эмиссией с поверхностей электродов. Если поверхность электродов атомарно чистая, а потоки заряженных частиц и излучения отсутствуют, то единственным механизмом эмиссии является автоэлектронная (полевая) эмиссия, являющаяся следствием туннелирования электронов через потенциальный барьер на границе конденсированное вещество-вакуум, возникающий в электрическом поле. Поскольку явление является квантовомеханическим по своей природе, оно было описано в 30-х годах прошлого века благодаря развитию квантовой механики. В законченном виде, актуальном и в

настоящее время, теория автоэлектронной эмиссии изложена Елинсоном и Васильевым [1]. В работе [1] приводится основное уравнение автоэлектронной эмиссии – уравнение Фаулера-Нордгейма, а также рассматриваются вопросы экспериментального изучения явления и его практического использования для статистического описания параметров эмиссионных центров на поверхности катода.

В случае существования потоков частиц и излучения, падающих на поверхность конденсированного вещества, эмиссионные процессы становятся более разнообразными, включая появление комбинированных видов эмиссии. Достаточно подробно всё многообразие эмиссионных процессов в условиях глубокого вакуума изложено в работе Добрецова и Гамаюновой [2], остающейся по настоящее время наиболее полной работой по твердотельной эмиссионной электронике. В работе изложены фундаментальные основы основных видов эмиссии: автоэлектронной эмиссий, термоэлектронной эмиссии, фотоэлектронной эмиссии и вторичной электронной эмиссии, а также сочетание и взаимное влияние различных видов эмиссии.

Эмиссионные явления на поверхности конденсированного вещества в вакууме являются, как правило, слаботочными (много меньше 1 А), однако при этом плотности тока в локальных местах с высокой эмиссионной способностью (микровыступ, усиливающий поле, инородное включение с низкой работой выхода и т.п.) могут достигать значений, при которых происходит локальный перегрев эмиттера и его испарение. По мере нагрева эмиссионная способность локального эмиттера растёт, что приводит к росту тока и, следовательно, более интенсивному нагреву. Локальный эмиттер, перешедший в стадию тепловой неустойчивости, взрывается, выбрасывая в пространство порцию плазмы, из которой происходит эмиссия электронов большой плотности тока. Данное явление было открыто в 60-х годах прошлого века и получило название взрывной электронной эмиссии. Мировой опыт пятидесятилетнего исследования данного явления и основы

теории взрывной электронной эмиссии обобщены Месяцем в работе [3]. В основе теории взрывной электронной эмиссии лежит концепция эктона, элементарного процесса микровзрыва, производящего достаточное количество энергии для собственного воспроизводства. Как было показано в [4], практически всё многообразие катодных процессов при сильноточных вакуумных и газовых разрядах, к которым относятся электрическая искра и электрическая дуга, успешно описывается в рамках модели эктона.

Специфика электрической дуги в вакууме состоит в том, что в межэлектродном промежутке отсутствует среда, способная быть ионизированной и обеспечивать прохождение тока через промежуток, как это происходит при разряде в газе. Такой средой является непосредственно плазма, генерируемая эктонами. Если нагрев анода не происходит, то такая дуга называется катодной дугой. Катодная дуга является наиболее общей формой вакуумной дуги, поскольку катодные механизмы плазмообразования остаются принципиально важными для самоподдерживающегося разряда и в случае активного анода. Физика катодной дуги в вакууме в полной мере с точки зрения современного уровня понимания явления представлена в работе Андерса [5]. В работе изложены модельные представления о механизмах функционирования катодной вакуумной дуги за счёт эмиссионных процессов, происходящих под плазмой. Детально описывается энергетический баланс в области привязки разряда на катоде. Рассмотрены феноменологические явления, сопровождающие катодную дугу, такие, как эрозия катода и эмиссия капель. Работа содержит справочный материал по параметрам катодной дуги, в частности, по пороговым токам, катодному падению потенциала, составу и температуре катодной плазмы и др., для широкого круга материалов, почти полностью охватывающего известные металлы.

Роль катода в инициировании вакуумной дуги велика, но исчерпывающая для полного описания дугообразования. Процесс дугообразования начинается с электрического пробоя вакуумного промежутка. В реальных

электровакуумных системах, включая функционирующие КА, существуют многочисленные границы раздела металл-вакуум, металл-диэлектрик, диэлектрик-вакуум и металл-диэлектрик-вакуум. Это делает эмиссионные явления более разнообразными, а природу вакуумного пробоя более запутанной. Многолетний опыт исследования вакуумного пробоя обобщён в работах Латама [6,7]. Прежде всего, следует отметить многообразие рассмотренных электрофизических систем, преимущественно высоковольтных. Особое внимание в работах Латама уделено вопросам роли тройных точек (граница раздела металл-диэлектрик-вакуум) и десорбции газа с поверхности электродов в инициировании пробоя. В работе [7] предлагается обобщённая модель пробоя, учитывающая не только катодные процессы, но и анодные процессы, а также полный комплекс эмиссионных явлений, включая фотоэлектронную и вторичную электронную эмиссию.

### **1.1.2 Обзор литературы по описанию специфических условий орбитального КП, имеющих отношение к проблеме дугообразования**

Прежде, чем анализировать специфику орбитального КП, следует отметить, что условия эксплуатации КА не всегда соответствуют условиям глубокого вакуума. Во-первых, РЭА находится в активном состоянии, начиная со старта, и по мере вывода на орбиту, КА проходит все стадии разряднения атмосферы. Во-вторых, газовыделение из КА в начальной фазе активного существования создаёт вокруг КА разреженную атмосферу. Всё это указывает на необходимость рассмотрения процессов инициирования газового разряда при анализе причин дугообразования в РЭА КА. По физике газового разряда опубликовано много литературы, но наиболее полным и признанным русскоязычным источником является работа Райзера [8]. В работе изложены все аспекты инициирования самостоятельного газового разряда (пробоя) газовых промежутков, включая промежутки низкого давления. Рассмотрена роль эмиссионных явлений на катоде на процесс

инициирования разряда, процесс перехода тлеющего разряда в дуговой, экспериментальные методы диагностики разряда.

Кроме широкого диапазона давлений окружающей среды от атмосферного до глубокого вакуума, условия орбитального КП отличаются от условий лабораторного вакуума наличием потоков ЗЧ и ИИ. Существуют нормативные источники информации, описывающие условия орбитального КП. В частности, в отраслевом стандарте ОСТ 134-1044-2007 [9] состав естественного радиационного фона табулирован в зависимости от высоты орбиты, наклона орбиты и состояния солнечной активности. Кроме того, потоки ЗЧ и ИИ также представлены в табулированном и графическом виде в ГОСТ 25645, предназначенном для использования в расчетах потока ЗЧ и ИИ, падающих на открытые (незатененные) поверхности элементов технических устройств в КП.

Данные российских нормативных источников по вопросам описания радиационного окружения Земли хорошо коррелируют с данными зарубежных источников. В частности, в европейском нормативном документе ECSS-E-ST-10-04C [10]. По сути, [10] объединяет информацию, представленную в [9] и ГОСТ 25645, и содержит как табулированную информацию по спектрам ЗЧ и ИИ, так и их графическое представление. Отличительной особенностью европейского стандарта ECSS-E-ST-10-04C [10] является значительно большее наполнение математическим аппаратом и информацией по физике космических лучей, что облегчает использование стандарта инженерными и научными работниками, не являющимися прямыми специалистами в радиационной физике. Кроме того, [10] содержит большой объем оригинальных научных данных по измерениям газового и радиационного состава околоземного пространства, полученных и опубликованных в 2000-х годах. Документ [10] содержит 31 нормативную ссылку и 147 библиографических ссылок, что делает его ценным для разработчиков справочником.

### **1.1.3 Обзор литературы по ЭСР и дугообразованию при эксплуатации КА в условиях орбитального КП**

Проблема дугообразования при эксплуатации КА связана, прежде всего, со спецификой физической среды, в которой находится РЭА. Одним из основных факторов, способных привести к нарушению электроизоляционных характеристик ЭРИ, является проникающая радиация. В этой связи особое внимание уделяется проблемам материалов, используемых в условиях КП. В работе Акишина [11] излагаются фундаментальные основы радиационно-стимулированных процессов, происходящих на поверхности и в объёме диэлектрических материалов, используемых в космической технике, а также анализ негативных последствий, в том числе приводящих к нарушению электрической изоляции.

Вопросам радиационного воздействия на материалы посвящены стандарты. В ОСТ 134-1034-2003 [12] данный вопрос обсуждается совместно с вопросами испытаний на радиационную стойкость, но прямой связи радиационных эффектов с ЭСР не устанавливается. В европейском стандарте ECSS-E-ST-10-12C [13] проблема накопления внутреннего заряда анализируется, в том числе на предмет связи с ЭСР. В справочном издании [14] и в работах Гарретта [15,16] анализируются физические основы процесса накопления внутреннего заряда и инициирования ЭСР во внутренних модулях КА, а также научные и инженерные подходы к защите от накопления внутреннего заряда.

Наиболее существенным фактором КП, приводящим к ЭСР и дугообразованию, является плазменное окружение. По сути, КА является плавающим зондом в плазме, и для описания потоков заряженных частиц является обоснованным использование теории плазмы, излагаемой в многочисленных монографиях и учебных пособиях. С учётом специфики КП данный вопрос рассмотрен в справочном издании [17]. Также известен европейский стандарт ECSS-E-ST-20-06C [18], посвящённый проблеме ЭСР и дугообразованию. Как и многие документы ESA, [18] содержит большое

количество справочной информации по проблеме ЭСР. В работах [14–16], равно как и в [18], изложены подходы к снижению рисков накопления избыточного заряда ЭСР при эксплуатации КА.

Проблема ЭСР и дугообразования тесно связана с ЭМС, поскольку ЭСР и дуга являются источниками электромагнитного шума высокой интенсивности [5]. В связи с этим принят европейский стандарт ECSS-E-ST-20-07C [19], регламентирующий методы испытания РЭА на стойкость к электромагнитному шуму ЭСР и дуговых разрядов.

## **1.2. Анализ проблемы дугообразования в бортовом оборудовании при эксплуатации космических аппаратов**

### **1.2.1 Физические факторы, воздействующие на РЭА в условиях КП**

Все факторы, воздействующие на конденсированное вещество в условиях орбитального КП, можно условно разделить на общефизические, реализуемые в как в лабораторных, так и в реальных условиях и связанные с нахождением объекта в вакууме в температурном диапазоне, изменяющимся от глубокого по земным условиям холода (ниже  $-50^{\circ}\text{C}$ ) до высоких температур (порядка  $100^{\circ}\text{C}$  и выше). Такие условия могут приводить к структурным изменениям в материалах и при длительной эксплуатации к испарению материала. Это относится не только к органическим диэлектрикам, но и к металлам, таким как кадмий и цинк, давление насыщенных паров которых настолько велико, что оцененный унос материала за счёт испарения [20] может достигать миллиметров в год при температуре поверхности свыше  $120^{\circ}\text{C}$ . Углерод образует ковалентные связи более сильные (энергии разрыва связи порядка 5 эВ [21]), чем в случае летучих металлов, и органические соединения на основе F и Si способны эксплуатироваться длительное время в условиях высоких температур и вакуума без существенного ухудшения эксплуатационных характеристик. К общефизическим факторам следует также отнести и поток световой энергии Солнца, характеризующийся большей интенсивностью, чем у поверхности

Земли, и большей долей излучения в УФ диапазоне, устанавливаемая в имитационных испытаниях по ГОСТ РВ 20.57.306-98 равной  $1400 \text{ Вт/м}^2$  во всем оптическом диапазоне и  $140 \text{ Вт/м}^2$  в УФ диапазоне ( $\lambda \leq 400 \text{ нм}$ ).

Основными физическими факторами орбитального КП, негативно влияющими на жизненный цикл РЭА КА, является радиационное воздействие ЗЧ высоких энергий и явления, связанные с плазменным окружением, как естественным орбитальным, так и производимым самим КА. Данные явления могут быть рассмотрены независимо друг от друга, поскольку потоки высокоэнергетических частиц оказывают влияние преимущественно на объёмные характеристики конденсированного вещества, прежде всего, на полупроводниковые структуры электронных компонентов. В то же время плазменное окружение проявляется в накоплении статического электричества на корпусе и конструктивных элементах, приводя к появлению высоких электрических потенциалов различной величины, т.е. к высокой разности потенциалов и ЭСР.

Радиационное воздействие. Степень радиационного воздействия ИИ околоземного КП на РЭА КА в значительной степени зависит от высоты орбиты и космической погоды. Основная доля радиации приходится на электроны, протоны и альфа-частицы [9], являющиеся компонентами солнечного ветра. При этом альфа-частицы не обладают значительной проникающей способностью и представляют меньшую опасность для электронных компонентов РЭА, чем электроны и протоны. Радиационная нагрузка на КА, находящиеся на низких орбитах, невелика и не требует использования специальной защиты. Зависимость интенсивности ИИ от высоты имеет два максимума, приходящиеся на РПЗ, первый, находящийся на удалении  $3 \div 6$  тыс. км от земной поверхности, и второй на расстоянии  $15 \div 20$  тыс. км. Наибольшую опасность представляет собой второй РПЗ, представленный практически исключительно электронами высоких энергий (рисунок 1.1 [22]) и требующий использования защиты величиной не менее  $1 \text{ г/см}^2$ . При торможении высокоэнергетических электронов происходит

генерация рентгеновского излучения, также вносящего существенный вклад в радиационную нагрузку на КА. Предельные радиационные нагрузки (значения поглощённой дозы), выдерживаемые электронными компонентами РЭА, зависят от типа изделия и их функциональных характеристик. Наиболее подверженными являются программируемые цифровые микросхемы. Например, отказы микропроцессоров, выполненных по технологии КМОП, происходят при дозах 100 Гр и выше, а полное стирание памяти при дозах свыше 700 Гр [23].

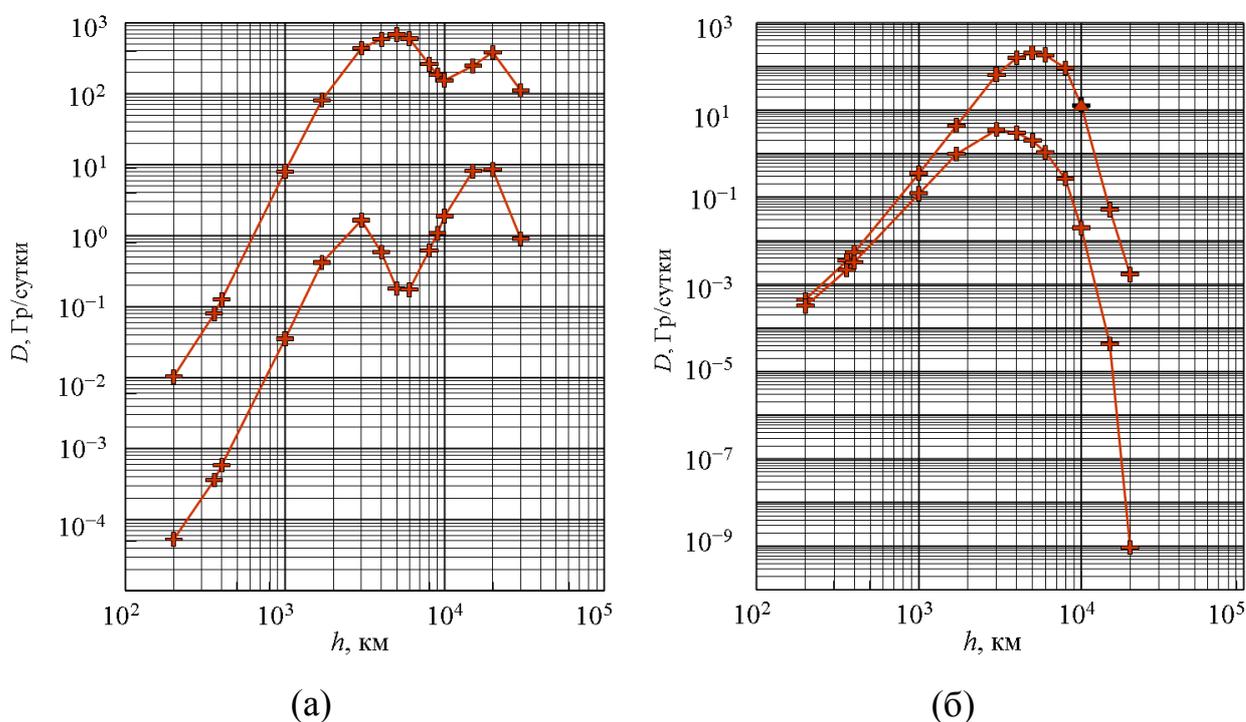


Рисунок 1.1 – Зависимости поглощенной дозы электронов (а) и протонов (б) от высоты при угле наклона орбиты  $30^\circ$  и при 2-х значениях защиты:  $0,1 \text{ г/см}^2$  (верхние зависимости) и  $1,0 \text{ г/см}^2$  (нижние зависимости) [22].

Наиболее критичными для процесса дугообразования в открытых (не отпаянных) модулях РЭА и СБ являются радиационно-стимулированные изменения электроизоляционных свойств диэлектриков, особенно полимерных. Характер изменений может быть связан как с укрупнением макромолекул как результат возникновения химических связей между линейными полимерными цепочками, так и с деструкцией макромолекул,

сопровождаемой возникновением молекул меньшей длины, появлением свободным радикалов и эмиссией летучих соединений [24]. Если первый процесс улучшает электрическую изоляция полимеров, и на этом основаны технологии радиационной сшивки, то второй приводит пробую как по объёму диэлектрика, так и через вакуумные промежутки в случае интенсивной эмиссии летучих веществ. К сшиваемым относятся полимеры, содержащие один или более атом водорода на каждый атом углерода цепи (полиэтилен, полипропилен, лавсан, поливинилхлорид, кремнийорганические соединения, полиэфирные и эпоксидные смолы, другие соединения, подпадающие под данную характеристику). Остальные полимеры, не содержащие в главной цепи С-Н связей (полиизобутилен, бутилкаучук, политетрафторэтилен, целлюлоза и ее производные, полиметилметакрилат и др.) под действием проникающей радиации будут преимущественно разрушаться. Проблемы, связанные с радиационным повреждением полимеров, проявляются остро при больших значениях поглощённой дозы, порядка  $10^4$  Гр и выше [24].

Следует особо отметить радиационное повреждение, связанное с накоплением электрического заряда внутри диэлектрика и, как следствие, появление электрических полей, превышающих электрическую прочность материала [11]. Данный процесс может быть некоторое время «запечатанным» внутри диэлектрика и приводить лишь к внутренним микрозарядам, распределяющим избыточный заряд на большой объём. В свою очередь, микрозаряды сопровождаются образованием плазмы, которая разрушает материал и снижает электрическую прочность изоляции. Начавшийся процесс эрозии диэлектрика является, по сути, латентным дефектом изоляции, неминуемо приводящим к пробую в процессе последующей эксплуатации. В случае низкой пластичности диэлектрика (керамика и стекло) и при этом низкой проводимости (способности удерживать объёмный заряд длительное время) возможно накопление столь большого избыточного объёмного заряда, что первый разряд является

фатальным не только с точки зрения электрической изоляции, но и с точки зрения целостности изолятора как ЭРИ.

При радиационной деструкции фольгированных материалов эмиссия летучих соединений может создавать под фольгой локальные участки повышенного давления, отслаивающие фольгу.

Наконец, радиационное воздействие может приводить к появлению полупроводниковой проводимости в диэлектриках, приводящей к появлению (росту) токов утечки через изолятор. Данный процесс является обратимым.

Плазменное окружение. Следствием плазменного окружения КА является неравномерная зарядка поверхностей и возникновение высоких разностей потенциала. Последнее может приводить к электростатическому пробую.

Параметры плазмы естественного происхождения неодинаковы для различных орбит (таблица 1.1) [14].

Плотности тока электронов на 1÷2 порядка величины превосходят плотности тока ионов, что характерно для любого плазменного окружения и связано с малой массой и большей подвижностью электронов. Как результат тело, в частности КА, погруженное в плазму, приобретает плавающий потенциал [25]  $\Phi$ :

$$\Phi \approx \frac{kT_e}{2e} \ln \left( \frac{T_e M_i}{T_i m_e} \right), \quad (1.1.1)$$

где  $e$  – элементарный заряд,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T_e$  и  $T_i$  – электронная и ионная температура, соответственно,  $m_e$  и  $M_i$  – масса, соответственно, электрона и иона. В этой связи наиболее благоприятный режим эксплуатации с точки зрения опасных для инициирования вакуумного пробоя электрических потенциалов соответствует низким орбитам, далёким по углу наклона от полярных орбит.

С другой стороны, на низких орбитах наблюдается высокая плотность окружающей плазмы, и, поскольку СБ погружены в плазму и являются электростатическими зондами, паразитная токовая нагрузка велика. КА на

геостационарных орбитах способны накапливать высокий отрицательный потенциал, причём, изоляторы способны его удерживать длительное время.

Таблица 1.1 – Типичные значения энергии ЗЧ и плотности тока на различных орбитах [14].

Орбита	Заряженные частицы	Энергия, эВ	Плотность тока, А/м <sup>2</sup>
Низкая орбита	Ионосферные электроны	0,1 ÷ 0,2	10 <sup>-4</sup> ÷ 0,1
	Ионосферные ионы	0,1 ÷ 0,2	10 <sup>-5</sup> ÷ 10 <sup>-3</sup>
Полярная орбита	Ионосферные электроны	0,1 ÷ 0,2	10 <sup>-5</sup> ÷ 0,1
	Ионосферные ионы	0,1 ÷ 0,2	10 <sup>-6</sup> ÷ 10 <sup>-3</sup>
	Внешние электроны (область полярного сияния)	10 <sup>2</sup> ÷ 10 <sup>4</sup>	10 <sup>-8</sup> ÷ 10 <sup>-3</sup>
Геостационарная орбита	Магнитосферные электроны	10 <sup>2</sup> ÷ 2,5·10 <sup>4</sup>	10 <sup>-6</sup>
	Магнитосферные ионы	10 <sup>2</sup> ÷ 2,5·10 <sup>4</sup>	10 <sup>-8</sup>
	Электроны радиационного пояса	10 <sup>5</sup> ÷ 10 <sup>7</sup>	10 <sup>-10</sup>
Солнечный ветер вблизи Земли	Электроны солнечного ветра	10	10 <sup>-7</sup> ÷ 10 <sup>-6</sup>
	Ионы солнечного ветра	10	10 <sup>-8</sup> ÷ 10 <sup>-6</sup>

Время зарядки изолятора определяется током (таблица 1.1) и ёмкостью  $C_d$ , которая может быть оценена по формуле (точно для плоского диэлектрического листа, лежащего на металлической поверхности под потенциалом земли, и имеющего толщину, значительно превышающую длину свободного пробега частицы в данном диэлектрике):

$$C_d = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_d S}{d}, \quad (1.1.2)$$

где  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная,  $\varepsilon_d$  – диэлектрическая проницаемость,  $S$  и  $d$  – площадь и толщина диэлектрика, соответственно. Для зарядки диэлектрика плотностью тока  $j$  до разности потенциалов  $U$  потребуется время  $t$ , вычисляемое как:

$$t = \frac{C_d U}{S j} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_d U}{d j}. \quad (1.1.3)$$

Для типичных условий геостационарной орбиты это время составит несколько часов, а для полярной орбиты – несколько минут.

При отсутствии разрядных явлений и корпус КА в целом, и отдельные изоляторы находятся под одинаковым отрицательным потенциалом, определяемым энергией падающих электронов. Однако в последующем возможно образование разности потенциалов между изолятором и корпусом из-за различной эмиссионной способности поверхностей. Известно [2], что эмиссионная способность диэлектриков, как правило, выше, чем металлов. Как результат, изоляторы быстрее отдают избыточный заряд за счёт эмиссионных процессов, чем корпус КА. В качестве примера [14] на рисунке 1.2 приведена динамика потенциалов при прохождении и после прохождения КА через поток частиц солнечного ветра.

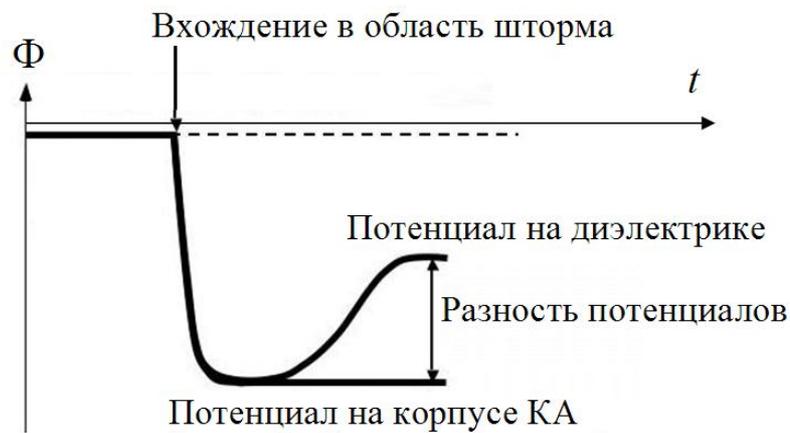


Рисунок 1.2 – Схематически показанная динамика изменения потенциалов поверхности диэлектрика и корпуса КА в целом после вхождения в область коронарного выброса с высокой концентрации частиц.

## 1.2.2 Накопление избыточных зарядов на ЭРИ в условиях КП

В обобщённом виде динамика потенциала на поверхности диэлектрика описывается уравнением:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{1}{C_d} (-j_{e1} + j_{i1} + j_{e2} - j_{i2} + j_{hv} + j_E + j_\sigma), \quad (1.1.4)$$

где  $j_{e1}$  – плотность тока первичных электронов,  $j_{i1}$  – плотность тока первичных ионов,  $j_{e2}$  – плотность тока вторичных электронов,  $j_{i2}$  – плотность тока вторичных ионов, в том числе рождённых при поверхностной ионизации десорбированных газов,  $j_{hv}$  – плотность тока фотоэлектронной эмиссии,  $j_E$  – плотность тока автоэлектронной эмиссии,  $j_\sigma$  – плотность тока утечки через диэлектрик, включая через поверхность диэлектрика. Значения ионных токов и тока автоэлектронной эмиссии обычно малы, и уравнение (1.1.4) может быть использовано в упрощённом виде:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{1}{C_d} (-j_{e1} + j_{e2} + j_{hv} + j_\sigma), \quad (1.1.5)$$

Ток утечки плотностью  $j_\sigma$  определяется проводимостью  $\sigma$ , зависящей от температуры и электрического поля. Температурная зависимость проводимости может быть аппроксимирована формулой [14]:

$$\sigma(T) = \sigma_\infty \exp\left(-\frac{W_a}{kT}\right), \quad (1.1.6)$$

где  $\sigma_\infty$  – асимптотическая проводимость диэлектрика при стремлении  $T$  к бесконечности,  $W_a$  – энергия активации. Следует заметить, что энергия активации не равна и существенно меньше ширины запрещённой зоны диэлектрика. Например, энергия активации проводимости полиэтилена составляет порядка 1 эВ, в то время как ширина запрещённой зоны превышает 8 эВ.

В электрическом поле  $E$  проводимость диэлектрика растёт, и зависимость может быть описана выражением [26]:

$$\sigma(E, T) = \sigma(T) \left( \frac{2 + \cosh(\beta_F E^{1/2} / 2kT)}{3} \right) \left( \frac{2kT}{eE\delta} \sinh\left(\frac{eE\delta}{2kT}\right) \right), \quad (1.1.7)$$

где  $\beta_E = (e^3 / \pi \varepsilon_d \varepsilon_0)^{1/2}$ ,  $\delta$  – длина токового канала.

Плотность тока фотоэлектронной эмиссии определяется законом Столетова [2]:

$$j_{hv} = \frac{e}{hv} Y \Psi, \quad (1.1.8)$$

где  $h$  – постоянная Планка,  $\nu$  – частота падающего излучения,  $Y$  – квантовый выход фотоэмиссионных электронов (характеристика материала),  $\Psi$  – плотность падающего светового потока. Плотность тока фотоэлектронной эмиссии в условиях земной орбиты представлена для ряда материалов в таблице 1.2 [15].

Таблица 1.2 – Плотность тока фотоэлектронной эмиссии в условиях орбиты Земли для ряда материалов [15].

Материал	Плотность тока, А/м <sup>2</sup>
Оксид алюминия	42
Оксид индия	30
Золото	29
Нержавеющая сталь	20
Графит	4

Плотность тока вторичной электрон–электронной эмиссии в  $\delta_{ee}$  (коэффициент вторичной эмиссии) раз отличается от плотности тока первичных электронов. Величина  $\delta_{ee}$  является характеристикой материала. Значения  $\delta_{ee}$  существенно зависят от угла падения  $\theta$  первичного электрона и в некоторой степени от энергии первичного электрона. Согласно [15]  $\delta_{ee}$  может быть вычислено с использованием формулы:

$$\delta_{ee}(w_1, \theta) = \delta_{e \max} \frac{w_1}{w_{\max}} \exp \left( 2 - 2 \left( \frac{w_1}{w_{\max}} \right)^{1/2} \right) \exp(2(1 - \cos \theta)), \quad (1.1.9)$$

где  $w_1$  – энергия первичного электрона,  $\delta_{e \max}$  – максимальное значение коэффициента вторичной электрон–электронной эмиссии,  $w_{\max}$  – энергия  $w_1$ ,

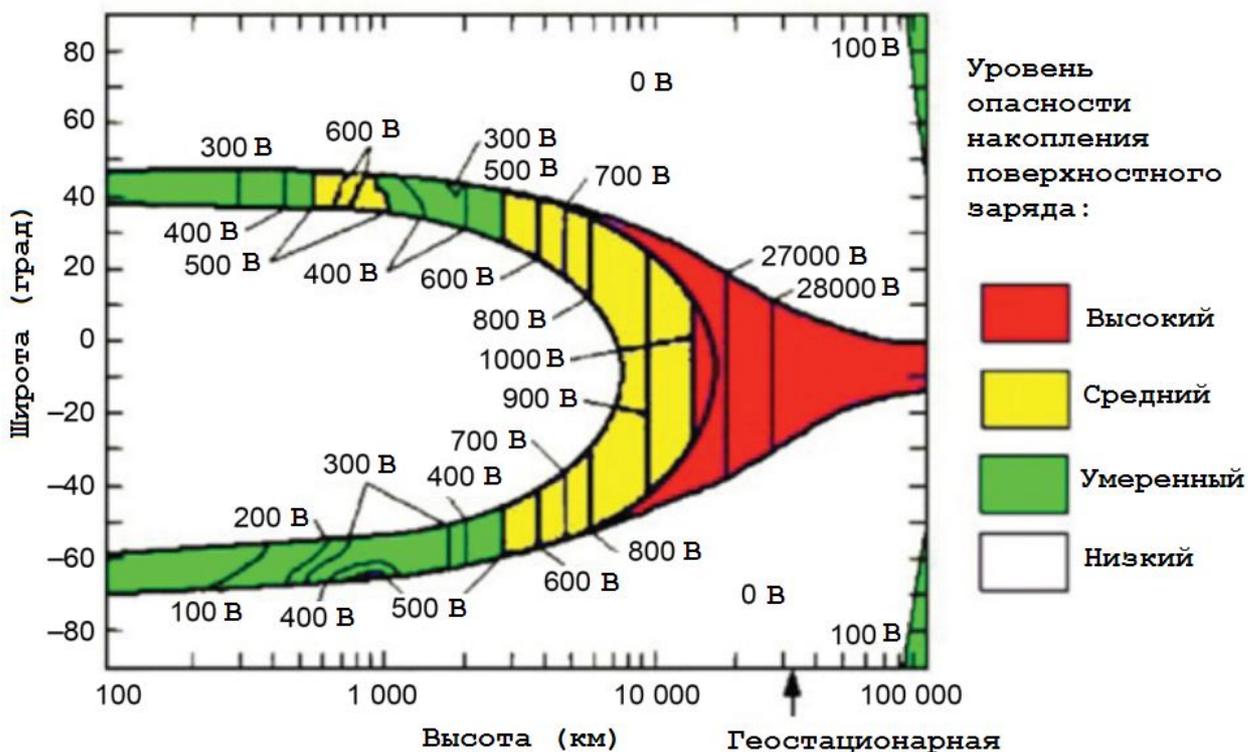
соответствующая  $\delta_{e \max}$ . Значения  $\delta_{e \max}$  и соответствующие значения  $w_{\max}$  представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Значения максимумов коэффициентов вторичной электрон–электронной эмиссии и значения энергии первичных электронов, соответствующих максимумам, для ряда материалов [15].

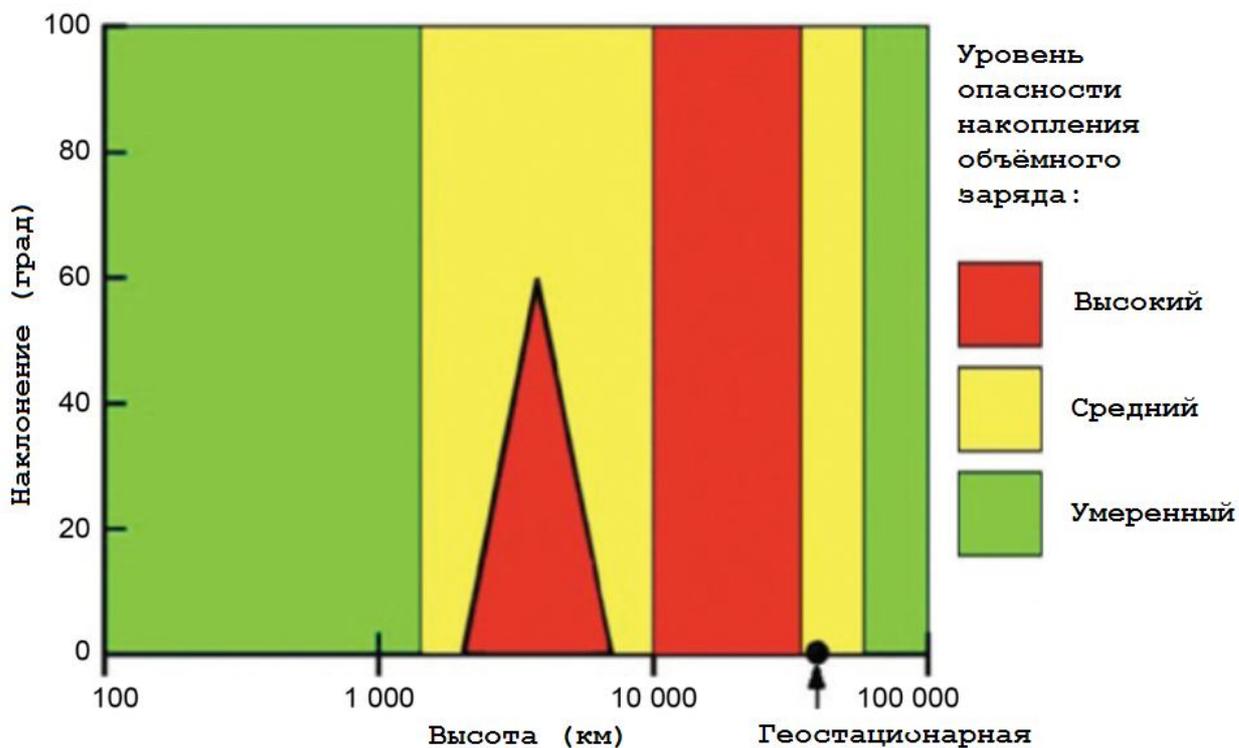
Материал	$\delta_{e \max}$	$w_{\max}$ , эВ
Алюминий	0,97	300
Оксид алюминия	1,5 ÷ 1,9	350 ÷ 1300
Магний	0,92	250
Оксид магния	4,0	400
Оксид кремния	2,4	400
Тетрафторэтилен	3,0	350
Полиимид	2,1	150

Неравномерность накопления заряда на различных узлах КА может приводить к электрическому пробое и инициированию первичного дугового разряда, если напряжённость электрического поля превысило электрическую прочность изолирующего промежутка, разделяющего узлы. Электрическая прочность определяется многими параметрами, в том числе собственно изолирующими и проводящими материалами, а также геометрией промежутков.

Орбитальное КП может быть условно разделено на области, различные с точки зрения опасности накопления статического заряда и создания напряжений, опасных инициированием ЭСР [16]. Области КП, опасные для накопления внешнего и внутреннего избыточного заряда, представлены на рисунке 1.3.



(а)



(б)

Рисунок 1.3 – Зоны риска орбитального КП с точки зрения ЭСР как следствия накопления избыточного поверхностного (а) и объёмного (б) заряда [16].

### **1.2.3 Механизмы инициирования первичной вакуумной дуги при низкой разности потенциалов**

Первичная дуга может быть инициирована одним из следующих процессов:

1. Пробой через объём диэлектрика. Такой пробой возникает в случае, если различные стороны листового изолирующего материала заряжены противоположно относительно друг друга, при этом имеется препятствие для развития разряда по поверхности. Энергия, питающая разряд, запасена в этом случае в ёмкости диэлектрика, выступающего в качестве конденсатора. Предельная электрическая прочность диэлектрических материалов имеет величину порядка  $10^8$  В/м и реализуется в лабораторных условиях. Однако в реальных условиях КП уже при напряжённости  $10^6$  В/м вероятность пробоя через объём диэлектрика велика, и именно этот уровень можно считать в качестве порогового значения, выше которого возможен пробой и образование дуги [14]. При правильном выборе материала изоляции (преобладание радиационной сшивки над радиационной деструкцией полимера) и толщины изоляции пробой может происходить лишь при наличии дефекта в изолирующем материале, что может быть обнаружено при лабораторных испытаниях, либо при ударе микрометеоритов.

2. Пробой по поверхности диэлектрика. Такой пробой возникает в результате развития электронной лавины за счёт вторичной электрон–электронной эмиссии. Разряд питается, как и в первом случае, за счёт энергии, запасённой в ёмкости диэлектрика. Для пробоя данного типа требуется инициирующий центр эмиссии, обеспечивающий поток первичных электронов, бомбардирующих поверхность диэлектрика, и наличие собственно диэлектрика с  $\delta_{ee} > 1$ . Второе условие выполняется для большинства диэлектрических материалов за редким исключением (например,  $\text{Sr}_2\text{O}_3$  и  $\text{CuO}$ , для которых  $\delta_{e \max} \leq 1$ ).

3. Пробой вакуумного промежутка. В условиях высокого вакуума и отсутствия плазмы такой пробой возникает как результат эмиссионных явлений на поверхности катода или удара макрочастицы (например, микрометеорита). В условиях газового промежутка возможна объёмная ионизация, и при определённых условиях возможен пробой по закону Пашена. Один из вариантов пробоя данного типа является пробой с отрицательно заряженного корпуса КА в открытое пространство. Такой разряд питается ёмкостью между КА и плазменным окружением.

Вопрос о том, что считать низкой разностью потенциалов, а что высокой, зависит исключительно от точки зрения. Переход бортовой сети КА от низкого напряжения (27 В) к высокому напряжению с точки зрения конструкции СПУ ДУ (100 В) отображён в таблице 1.4 [27], однако с точки зрения физики вакуумной дуги [5] оба эти напряжения являются низкими с точки зрения инициирования вакуумной дуги.

Таблица 1.4 – Основные параметры СПУ ДУ КА [27].

Характеристика	Значение	
	1990 г.	2009 г.
Напряжение питания, В	27 ÷ 28	100 ÷ 120
Максимальная мощность разряда, Вт	1350	4500
Максимальное напряжение разряда, В	300	2000
КПД СПУ	0,85 ÷ 0,90	0,94 ÷ 0,95
Срок активного существования, лет	7,5	15,0
Условия эксплуатации	Термоконтейнер	Открытое КП

Наиболее «лёгким» с точки зрения инициирования дуги открытого промежутка (вакуумного или газового) является режим, соответствующий минимуму кривой Пашена [8], т.е. инициирование пробоя промежутка в условиях разреженной атмосферы. Кривые Пашена подобны для всех газов. Пример кривых приведён на рисунке 1.4. Численные значения пробивных

напряжений  $U_{s \min}$  минимумов кривых Пашена и соответствующие значения произведений давления  $p$  на межэлектродное расстояние  $d$  представлено в таблице 1.5. Обращает на себя внимание тот факт, что для всех представленных газов, включая воздух, минимальное давление инициирования пробоя (соответственно, дугообразования) значительно выше 100 В.

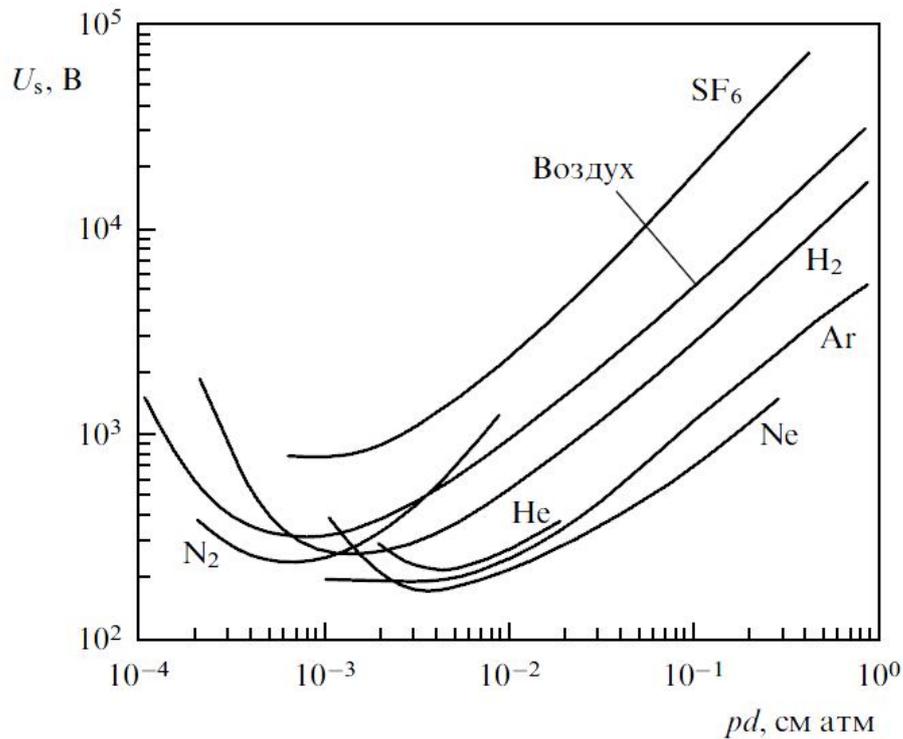


Рисунок 1.4 – Зависимости пробивного напряжения от отношения  $pd$  для ряда газов [4].

Очевидно, что реальные межэлектродные промежутки (от десятых долей до единиц мм), используемые в РЭА, в условиях высокого вакуума, как и в разреженной атмосфере, не имеют шансов быть пробитыми напряжением порядка 100 В. Это же относится и к электрической изоляции по поверхности диэлектрика (рисунок 1.5, [28]). Кривая зависимости  $U_s(pd)$  для пробоя по поверхности стеклотекстолита FR-4 в области минимума оказывается близкой к кривой Пашена. Это указывает на доминирующее значение процессов объёмной ионизации при данном пробое в области разреженной атмосферы. И только при низких давлениях ( $10^{-4}$  Торр и ниже) и

относительно высоких напряжениях ( $\sim 5$  кВ) проявляется механизм пробоя по поверхности диэлектрика, характерный для вакуумных условий и определяемый процессом ионизации десорбированного газа электронами лавин, образуемых за счёт вторичной электрон–электронной эмиссии.

Таблица 1.5 – Значения пробивных напряжений  $U_{s \min}$  и соответствующие значения произведений  $pd$  [14].

Газ	$U_{s \min}$ , В	$pd$ , мм·Торр
Воздух	330	5,67
H <sub>2</sub>	270	11,5
O <sub>2</sub>	450	7,0
N <sub>2</sub>	250	6,7
He	$\sim 160$	$\sim 40$
Ar	233	7,6
Ne	186	3,0
CO <sub>2</sub>	420	5,4

Рассмотренные данные однозначно указывают на необходимость привлечения дополнительных механизмов, связанных с локальным усилением эмиссионной способности поверхности, для объяснения пробоя при рассматриваемых параметрах разрядного промежутка и напряжений. Данные механизмы должны быть рассмотрены отдельно.

Основным механизмом интенсивной эмиссии электронов, способным к иницированию пробоя в вакуумных и плазмонаполненных промежутках, является автоэлектронная эмиссия [29]. Предельные (предпробойные) плотности тока автоэлектронной эмиссии ( $10^{11}$  А/м<sup>2</sup> и выше) приводят к быстрому локальному перегреву эмиссионного центра (как правило, микронных и субмикронных размеров) и их взрывообразному разрушению с фазовым переходом из конденсированного вещества в плазму. Данный переход сопровождается эмиссией тока электронов и плазмообразованием.

Процесс является самовоспроизводящимся. Данный тип эмиссии получил название взрывной электронной эмиссии, а элементарный цикл взрывоэмиссионного процесса – эктона [3]. Дуговой вакуумный разряд на холодном катоде является результатом чередующихся актов функционирования эктонов [3]. При токах ниже порогового регенерация эктонов нарушается [5], и разряд гаснет. Значения пороговых токов дуги зависят от материала, табулированы [30] и имеют значения от долей ампера (графит и легкоплавкие металлы) до единиц (вплоть до  $\sim 10$  А для вольфрама).

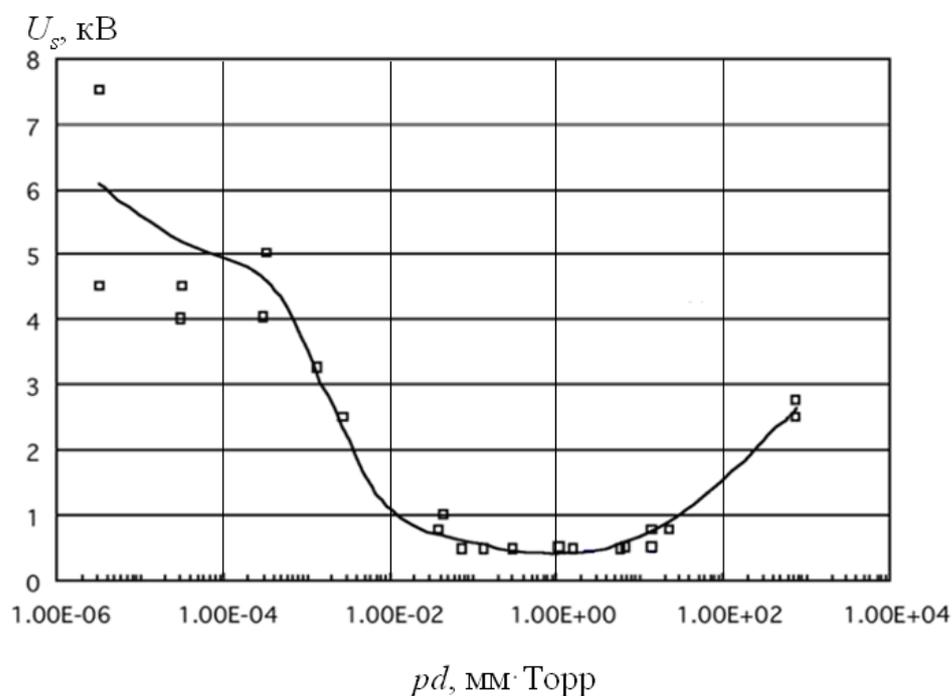


Рисунок 1.5 – Кривая зависимости  $U_s(pd)$  для пробоя промежутка длиной 1 мм по поверхности стеклотекстолита FR-4 [14].

Важным для анализа процесса инициирования дуги является вопрос о минимальном вкладе энергии, достаточном для формирования такого количества плазмы, эмиссионная способность которой способна обеспечивать пороговый ток дуги. В общем случае радиус  $R$  первичного плазменного сгустка много меньше межэлектродного промежутка  $d$ . Кроме того, можно предполагать, что в начальный момент  $nkT_e \gg \varepsilon_0 E^2 / 2$ ,  $n$  – концентрация плазмы в сгустке,  $E$  – напряжённость электрического поля, и

плазма распространяется изотропно в  $2\pi$  стерадиан. Уравнение Пуассона, описывающее протекание тока в вакуумном промежутке, для такой задачи решается аналитически, и решение имеет вид [31]:

$$i = 4\pi\varepsilon_0\eta\sqrt{e/m} (RU/d)^{3/2} = 4\pi\varepsilon_0\eta\sqrt{e/m} (RE)^{3/2}, \quad (1.1.10)$$

где  $m$  – масса электрона, параметр  $\eta \approx 0,47$ . Далее обозначим  $\eta_1 = 4\pi\varepsilon_0\eta$ .

Из (1.1.10) видно, что по мере роста электрического поля пороговое значение тока  $i_{th}$  достигается для меньшего радиуса первичного плазменного сгустка:

$$R = \frac{i_{th}^{2/3} m^{1/3}}{E\eta_1^{2/3} e^{1/3}}. \quad (1.1.11)$$

Полагаем что вся энергия первичного воздействия на поверхность катода  $w_0$  ушла на испарение и ионизацию вещества. Тогда, приравнивая  $w_0$  к  $0,5((4/3)\pi R^3 n_e/Z)(w_v+w_i)$ , где  $Z$  – средняя зарядность ионов в плазменном сгустке,  $n_e$  – концентрация электронов,  $w_v$  – энергия сублимации на атом материала катода,  $w_i$  – усреднённая по  $Z$  энергия ионизации, получаем:

$$n_e = \frac{3Zw_0}{2\pi R^3 (w_i + w_v)}. \quad (1.1.12)$$

С другой стороны, электронная эмиссионная способность плазмы вычисляется [29] как

$$j_e = en_e \left( \frac{kT_e}{2\pi m} \right)^{1/2}. \quad (1.1.13)$$

Умножив правую часть (1.1.13) на площадь полусферы радиуса  $R$  и приравняв к  $i_{th}$  с учётом (1.1.11) и (1.1.12), получаем выражение для  $w_0$ :

$$w_0 = \frac{\sqrt{2\pi} i_{th}^3 m (w_i + w_v)}{3EZ\eta_1^2 \left( \frac{i_{th}^3 m}{\eta_1^2 e} \right)^{2/3} e^2 \sqrt{\frac{kT_e}{m}}}. \quad (1.1.14)$$

Используя данные для меди [5] и значение порогового тока 1 А, выражение (1.1.14) позволяет построить зависимость  $w_0(E)$  (рисунок 1.6) для условий, близких к условиям изоляции, встречаемым в РЭА КА с СПУ напряжением 100 В. Видно, что уровень энергий, необходимых для инициирования первичной дуги, лежит в пределах от 40 нДж (для промежутка длиной 100 мкм) до 1 мкДж (для промежутка 3 мм). Следует отметить, что энергия, описываемая выражением (1.1.14), должна быть вложена в локальную область катода, размер которой много меньше характерного размера области разлёта плазмы в первые наносекунды процесса.

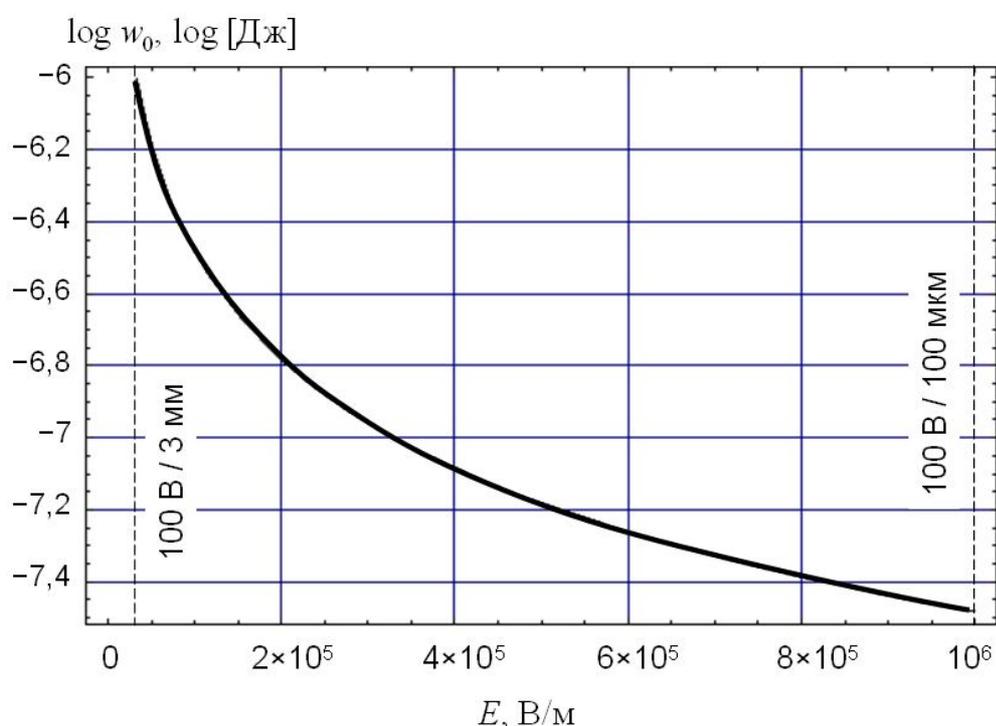


Рисунок 1.6 – Расчётная зависимость минимального энерговклада, необходимого для инициирования пробоя промежутка с медными электродами, от напряжённости электрического поля.

Автоэлектронная эмиссия наблюдается при локальных значениях напряженности электрического поля, лежащих в пределах от  $10^9$  В/м до  $10^{10}$  В/м [1]. Для того, чтобы достичь требуемой напряжённости поля, безразмерный формфактор (либо его формальный эквивалент) в уравнении Фаулера-Нордгейма [1] должен быть не менее 1000. Существует два модельных физических объекта, способных обеспечивать данное условие.

Наиболее «простым» и изученным теоретически и экспериментально является эмиссионный центр в виде микровыступа. Цилиндр радиуса  $r$  и высотой  $h$ , находящийся в контакте с электродом и ориентированный нормально к его поверхности, усиливает среднее поле на катоде ( $U/d$  в случае плоскопараллельного промежутка) в  $\beta$  раз, где  $\beta$  для рассматриваемого эмиттера при условии  $h \ll d$  может быть вычислено [6] как

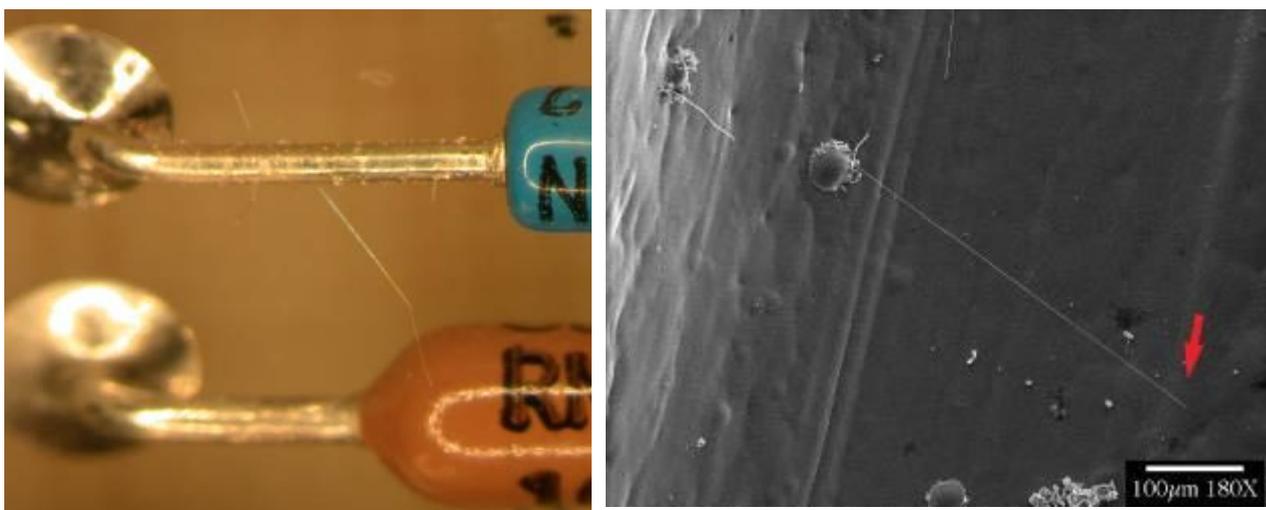
$$\beta = 2 + \frac{h}{r}. \quad (1.1.15)$$

Единственным объектом, способным обеспечить усиление напряжённости электрического поля на три порядка величины является нитевидный кристалл (whisker в англоязычной литературе). Размеры НК таковы (рисунок 1.7 [32]), что коэффициенты  $\beta$ , оцененные по формуле (1.1.15), могут достигать значений 1000 и выше. Диаметр НК лежит в пределах от сотых долей микрометра до единиц микрометров. Длина может достигать единиц миллиметров. Скорость роста НК обычно лежит в пределах  $0.01 \div 0,5$  нм/с [33,34], но при некоторых условиях (после выдержки при температуре до  $150^\circ\text{C}$  в кислородосодержащей атмосфере с последующим охлаждением [33]) скорость роста может достигать (в случае чистого олова) 50 нм/с. Но даже скорость в 1 нм/с является критичной для эксплуатации РЭА, поскольку при такой скорости промежуток длиной 1 мм окажется закороченным за время менее 300 часов. Инициирование дуги, как отмечается в [35], в процессе роста НК происходит не столько из-за КЗ промежутка, сколько из-за вакуумного (газового) пробоя, связанного с высокой эмиссионной способностью НК. Этот процесс может происходить при напряжениях ниже 250 В.

НК исследуются с середины 40-х годов прошлого столетия [36]. Известно, что наиболее подверженными росту НК являются металлы Sn, Zn и Cd. На поверхностном покрытии (либо полуде) из олова НК растут значительно быстрее, чем на поверхности массивных образцов олова. Это объясняется взаимной диффузией меди и олова на границе раздела [37], что приводит к возникновению внутренних напряжений, в результате релаксации которых запускается процесс роста НК (рисунок 1.8). Добавка свинца в олово более

5% снижает вероятность роста НК до уровня, приемлемого для использования, в то время как эквивалентная добавка висмута не решает в полной мере проблемы роста НК [38].

В свете представленного на рисунке 1.8 сценария зарождения и роста НК становится понятным тот факт, что термоциклирование, соответствующее условиям орбитального полёта КА, ускоряет процесс роста НК [39]. Действительно, во время каждого горячего периода происходит дополнительная диффузия меди и олова в бронзовый диффузионный слой и соответственно, усиление внутренних напряжений. Во время каждого холодного периода происходит сжатие кристаллической структуры с дополнительным усилением напряжений. По сути термоциклирование работает подобно клапанному прессу для выдавливания пластичного материала через фильеры.



(a)

(б)

Рисунок 1.7 – Нитевидные кристаллы (а) на ЭРИ, монтированных на печатной плате, микрофотография нитевидных кристаллов (б) [32].

Традиционно при рассмотрении сценариев вакуумного пробоя и инициирования первичной вакуумной дуги особое внимание уделяется тройным точкам [6], подразумевая при этом локальную особенность, в которой встречаются границы раздела металл–диэлектрик, металл–вакуум и диэлектрик–вакуум. Поскольку в диэлектрике, в отличие от вакуума, поле

ослаблено в  $\varepsilon$  раз, в тройной точке реализуется ситуация резкого скачка потенциала, что соответствует локальному усилению электрического поля. Кроме того, на границе раздела проводник может иметь острую кромку, что дополнительно усиливает электрическое поле в тройной точке.

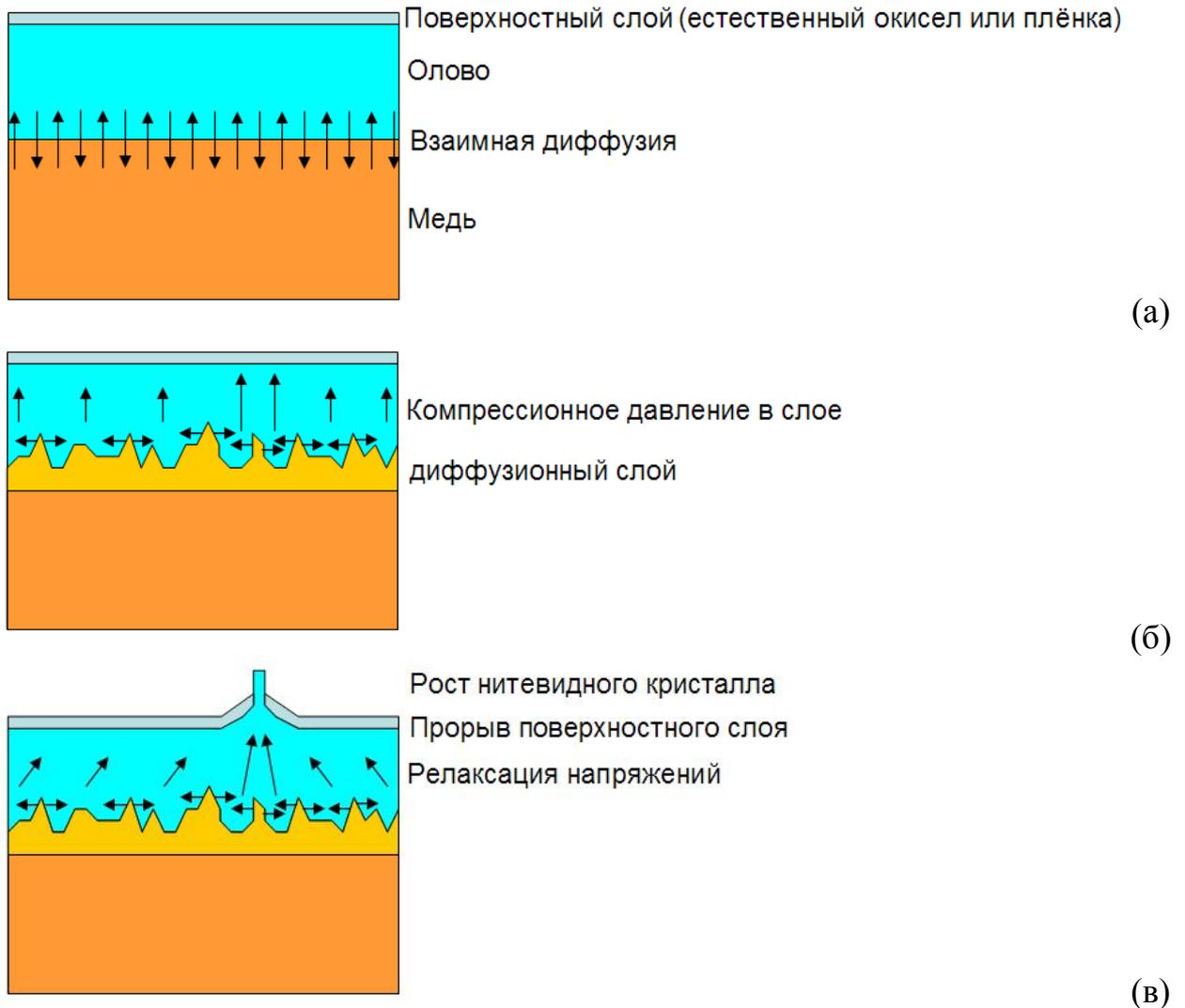


Рисунок 1.8 – Три стадии процесса формирования нитевидного кристалла на покрытии из олова, включающие начальную стадию взаимной диффузии (а), стадию формирования напряжённого слоя (б) и стадию релаксации напряжений за счёт роста кристалла (в) [40].

Особую опасность с точки зрения зарождения латентных дефектов, способных вывести из строя РЭА, представляют НК, растущие под защитными лаковыми покрытиями, наносимыми на печатные платы. Проблема состоит в том, что НК способны развивать локальные давления до 1 МПа [41], что может приводить к локальному разрушению лакового

покрытия и прорастанию НК сквозь покрытия. Однако если прочность плёнки достаточно высока, НК растут вдоль поверхности на границе раздела покрытие(полуда)–лак [32,33] (рисунок 1.9).

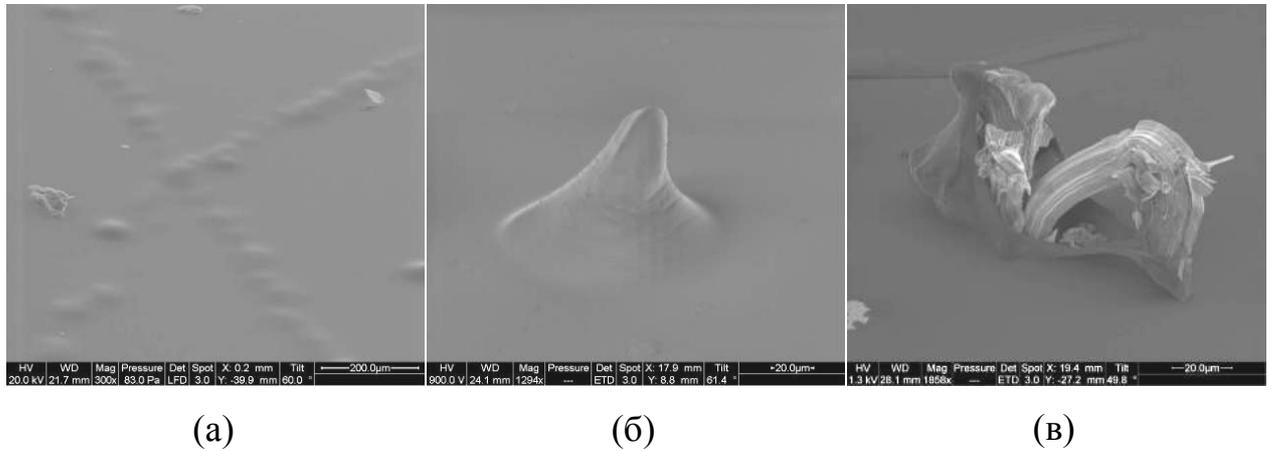


Рисунок 1.9 – Прорастание НК под лаковым покрытием толщиной 50 мкм (а), вспучивание лакового покрытия толщиной 12 мкм (б) и прорыв лакового покрытия толщиной 2.5 мкм (в) прорастающим НК.

Эмиссионная активность, эквивалентная локальному усилению электрического поля на три порядка величины, достигается также в эмиссионных центрах МД (металл–диэлектрик) типа [6]. Модельное представление эмиссии из таких центров [6,7] основывается на следующих положениях. В МД системе электрическое поле проникает в диэлектрик. Несмотря на то, что оно ослаблено там в  $\varepsilon$  раз, его оказывается достаточно для автоэлектронной эмиссии. Электроны туннелируют из металла в диэлектрик, находящийся в сильном электрическом поле, и ускоряются в нём. Инжектированные электроны рассеивают энергию на колебаниях и дефектах решётки, за счёт чего происходит их термолизация. Электроны в диэлектрике приобретают тепловую энергию  $3kT_e/2 = e\Delta U$ , где  $\Delta U = \Delta d U / (\varepsilon d)$ ;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость;  $\Delta d$  и  $d$  – толщина диэлектрической пленки на поверхности металла и длина промежутка соответственно;  $U$  – напряжение на промежутке. За счёт столкновений

направленная энергия электронов переходит в тепловую энергию (в качестве приближения полагаем, что полностью), и

$$T_e = \frac{2e \Delta d U}{3k \varepsilon d} = \frac{2e \Delta d}{3k \varepsilon} E. \quad (1.1.16)$$

Видно, что температура электронов растёт линейно с напряженностью поля. Поскольку электроны термолизованы, их распределение становится Максвелловским, и для них применим формула для термоэлектронной эмиссии (Ричардсона–Дэшмана) [2], в которую вместо работы выхода следует подставить электронное сродство, поскольку распределение термолизованных электронов по энергиям начинается от дна зоны проводимости. В этом случае получим выражение для плотности тока  $j$  при эмиссии электронов из диэлектрического включения на поверхности катода

$$j_e = A_0 \left[ \frac{2e\Delta d}{3k\varepsilon d} \right]^2 U^2 e^{-\frac{3\varepsilon d \chi}{2\Delta d U}} = A_0 \left[ \frac{2e\Delta d}{3k\varepsilon} \right]^2 E^2 e^{-\frac{3\varepsilon \chi}{2\Delta d E}}. \quad (1.1.17)$$

Выражение (1.1.17) подобно уравнению Фаулера-Нордгейма [1], но предэкспоненциальный множитель и экспоненциальный множитель при  $1/E$  с учётом типичных значений  $\Delta d$  и  $\varepsilon$ , наблюдаемых экспериментально, обеспечивает условия, эквивалентные (с точки зрения плотности тока эмиссии) требуемому локальному усилению поля.

Наличие эмиссионных центров, в частности, тройных точек способно существенно понизить пробивные напряжения вплоть до 100 В. Так, в экспериментах с сегментами СБ [42] было показано, что напряжение, соответствующее минимуму кривой Пашена, оказывается примерно в 3 раза ниже, чем в случае металлических электродов и составляет 100 В (рисунок 1.10). С учётом того, что зажигание самостоятельного разряда в газе низкого давления осуществляется в значительной степени за счёт объёмной ионизации, такое понижение напряжения пробоя свидетельствует о значительном усилении вклада катодных процессов в пробой.

### 1.2.4 Механизмы инициирования вторичной вакуумной дуги

Разность потенциалов 100 В на миллиметровых и субмиллиметровых промежутках является аномально низкой для инициирования первичной дуги, однако такое напряжение оказывается высоким для зажигания вторичной дуги, являющейся следствием какого-либо локального высокоэнергетического воздействия, превышающего порог инициирования дуги (1.1.14). Это связано с тем, что катодное падение потенциала, необходимое для поддержания дуги на минимальном энергетическом уровне, составляет порядка 20 В [3,30], что много ниже уровня рабочих напряжений диапазона 100 В. Основные механизмы, приводящие к инициированию вторичной дуги, достаточно подробно описаны в Главе 3 работы [3].

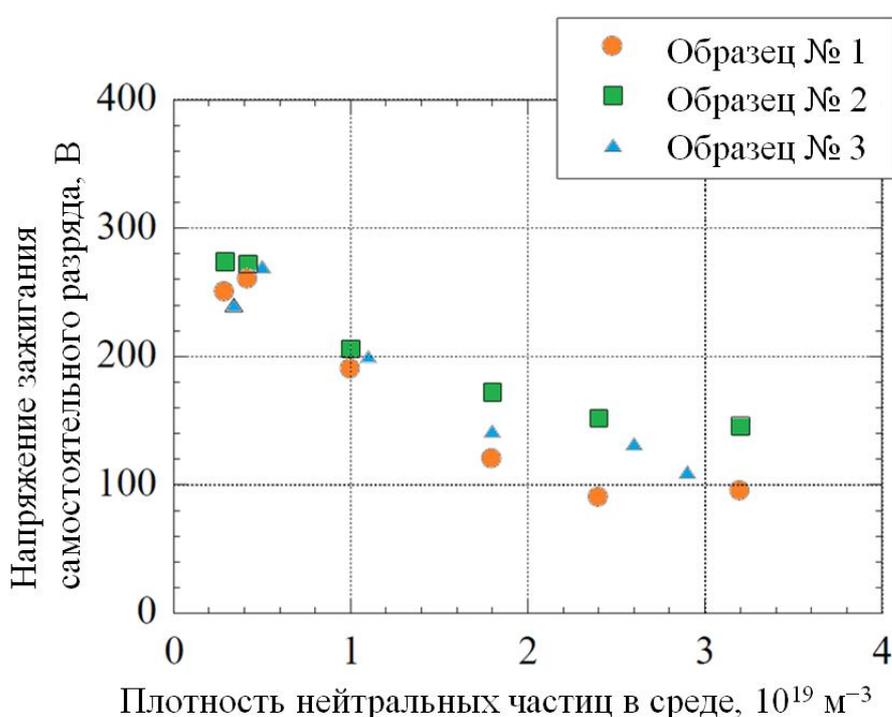


Рисунок 1.10 – Зависимость напряжения зажигания разряда при фиксированном промежутке между сегментами солнечных батарей от плотности нейтральных частиц в остаточной атмосфере [42].

Для инициирования взрывной эмиссии электронов, механизма, лежащего в основе самоподдерживающейся вакуумной дуги, за счёт внешнего воздействия (например, лазерного излучения) требуется поток мощности на

поверхность катода не ниже  $200 \text{ МВт/см}^2$  [43]. За счёт ионного тока из плазмы первичной дуги плотность тока ограничена критерием Бома и составляет [44]

$$j_B \approx en \sqrt{\frac{kT_e}{M_i}}. \quad (1.1.18)$$

Такое значение тока мало для инициирования вторичной дуги током ионов на расстояниях, превышающих сотни микрометров, за исключением случая протяжённых диэлектрических плёнок (покрытий), способных накапливать избыточный заряд в течение длительного времени. Более значимым процессом в инициировании вторичной дуги является собственная эмиссионная активность поверхности, находящейся под отрицательным относительно плазмы потенциалом. В отличие от первичной дуги, под плазмой образуется катодный слой, толщина которого  $L_{sh}$  вычисляется [44] как

$$L_{sh} \approx 0.8L_D \left( \frac{eU}{kT_e} \right)^{3/4}, \quad (1.1.19)$$

где длина Дебая  $L_D$ , соответственно,

$$L_D = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 kT_e}{n_e e^2}}. \quad (1.1.20)$$

При температуре электронной компоненты плазмы первичной дуги 3 эВ и концентрации на некотором удалении  $10^{12} \text{ см}^{-3}$  напряжённость электрического поля при напряжении 100 В составит величину около  $10^4 \text{ В/см}$ , что требует для пробоя наличия эмиссионного центра с  $\beta > 1000$ . Данная оценка указывает на доминирование зарядки диэлектрических плёнок (включая естественные окислы) над автоэлектронной эмиссией при инициировании вторичной вакуумной дуги. Точные расчёты подтверждают данное утверждение [45]. Согласно прямым экспериментам по имитации СБ в условиях орбитального КП [46] инициирование вторичной самоподдерживающейся дуги происходит с высокой вероятностью при разности потенциалов между шинами на уровне 100 В и ограничении тока на

уровне, превосходящем пороговый ток, даже в условиях очень редкой плазмы с концентрациями порядка  $10^6 \text{ см}^{-3}$ , что соответствует плазменному окружению КА на низких орбитах [47]. Этот результат однозначно указывает на накопление заряда на диэлектрике как на основной механизм дугообразования.

## **2 Выбор направления исследований в области разработки методов выявления латентных технологических дефектов бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов с длительным сроком активного существования, приводящих к возникновению дуговых разрядов в условиях космического пространства.**

На основании анализа литературных источников можно сделать вывод о том, что за инициирование первичной дуги несут ответственность преимущественно процессы, связанные с плазменным окружением КА, приводящим к накоплению статического заряда, ЭСР и последующим зажиганием дуги. Данный процесс не может быть подавлен, но должен быть учтён конструкцией узлов КА с целью минимизации вероятности инициирования вторичной вакуумной дуги в СПУ КА, включая СБ.

В качестве инициаторов как вторичной, так и первичной дуги, следует рассматривать тройные точки металл–диэлектрик(полупроводник)–вакуум. Тройные точки являются местами высоких градиентов потенциала, а также обладают повышенной эмиссионной активностью. Однако тройные точки не могут рассматриваться в качестве латентных дефектов, поскольку проблемы, с ними связанные, предсказуемы и могут быть учтены при проектировании СПУ КА.

Наименее предсказуемым фактором риска для дугообразования в РЭА КА, в особенности в СПУ, являются НК. На НК лежит ответственность за многочисленные отказы электроники, в том числе с трагическими последствиями. Наиболее ярким примером является отказ педали акселератора в автомобилях Toyota. Вопреки официальным заявлениям для

прессы, представляющим причину проблемы, якобы связанной с резиновым ковриком под педалью, истинная причина состояла в отказе датчика акселератора, более детально, в КЗ контактов акселератора нитевидным кристаллом [48], что соответствует нажатой до упора педали. В 2003 году была принята Европейским союзом и в 2006 году вступила в силу директива RoHS (англ. «Restriction of Hazardous Substances», русс. «Ограничение использования опасных веществ»), ограничивающая содержание вредных веществ. Согласно директиве во всех случаях, когда можно отказаться от вредных веществ (свинец в их числе), следует отказаться. Это стало причиной использования полуд, свободной от свинца, и как следствие, отказа электронике по причине НК.

Ситуация, проанализированная в [48] удивительна, поскольку информация об отказах электроники, связанных с НК, находится в общем доступе [49] и касается не только космики, но и практически всех отраслей экономики (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Неполный список отказов РЭА и ЭРИ по причине НК в 2000-х годах в США [49]. Отказы, связанные с КА, выделены цветом.

Год	Объект	Отрасль	Причина отказа	Локализация дефекта
2000	GALAXY VII (резервная СПУ)	Космическая (полная потеря)	Оловянные НК	Реле
2000	Ракетная программа "D"	Вооружённые силы	Оловянные НК	Terminals
2000	Модули управления мощностью	Промышленность	Оловянные НК	Соединители
2000	SOLIDARIDAD I (резервная СПУ)	Космическая (полная потеря)	Оловянные НК	Реле
2001	GALAXY IIIR (основная СПУ)	Космика	Оловянные НК	Реле

2001	Оборудование Hi-Rel	Компания «Hitachi Hi-Rel Power Electronics Pvt. Ltd.»	Оловянные НК	Металлизированные керамические корпуса микросхем
2001	АЭС	Энергетика	Оловянные НК	Реле
2001	Оборудование для лабораторного тестирования РЭ КА	Космическая	Цинковые НК	Силовые шины
2002	DirecTV 3 (основная СПУ)	Космическая	Оловянные НК	Реле
2002	ТЭС	Энергетика	Оловянные НК	Управляющие микросхемы
2002	Приёмник GPS	Аэронавтика	Оловянные НК	Корпус ВЧ элемента
2002	Военный авиационно-космический объект	Вооружённые силы	Оловянные НК	Гайки
2002	Военный самолёт	Вооружённые силы	Оловянные НК	Реле
2002	АЭС	Энергетика	Оловянные НК	Потенциометр
2003	Промышленная электроника	Телекоммуникации	Оловянные НК	Корпус ВЧ элемента
2003	Ракетная программа "Е"	Вооружённые силы	Оловянные НК	Соединители
2003	Ракетная программа "F"	Вооружённые силы	Оловянные НК	Реле
2003	Телекоммуникационное оборудование	Телекоммуникации	Оловянные НК	Скт выключатель

	ние			
2004	Военный объект	Вооружённые силы	Оловянные НК	Волновод
2005	Ключевая АЭС	Энергетика	Оловянные НК	Диод
2005	OPTUS B1	Космическая	Оловянные НК	Реле
2005	Телекоммуникационное оборудование	Телекоммуникации	Оловянные НК	Корпус ВЧ элемента
2006	GALAXY IIR (резервная СПУ)	Космическая	Оловянные НК	Реле

Ключевым фактором, определяющим риск инициирования вторичной дуги в СПУ КА, является плазма, в особенности плазма первичной дуги как наиболее концентрированная. Кроме того, первичная дуга является источником капель жидкого металла [30], часть которых окружена плотной плазмой [50] и определена как капельные пятна. Такие плазменно-капельные объекты способны существовать автономно в течение длительного времени (до 1 мс [51]). С учётом того, что скорость капель микронного размера, эмитированных катодным пятном, достигает  $10^4$  см/с, зона возможного инициирования вторичной дуги простирается на расстояние до 10 см от первичной дуги. Это расстояние может быть значительно больше, если реализуется каскадный процесс множественных актов горения вторичных дуг. Таким образом, открытая конфигурация РЭА без принятия специальных мер по локализации зоны воздействия плазмы первичных дуг на СПУ КА должна быть исследована и проанализирована в качестве главного латентного дефекта, способного приводить к инициированию вторичных самоподдерживающихся дуг.

Таким образом, является обоснованным с точки зрения приоритета №1 выбор направления исследований, связанного с локализацией возможных негативных последствий слаботочных первичных дуг. Для поиска путей

локализации плазмы первичных дуг при минимальном увеличении массы КА требуется проведение целенаправленных исследований по зависимости вероятности дугообразования от следующих параметров:

1. Ток разряда и длительность первичной дуги.
2. Геометрия и наличие диэлектрика в межэлектродном промежутке, имитирующем различные конфигурации шин СПУ.
3. Температура электродной системы в случае изолирующего промежутка по поверхности диэлектрика.
4. Давление окружающей атмосферы.

После проведения данных исследований требуется включение в экспериментальную схему экранирующих элементов и проведение повторных исследований для подтверждения эффекта и оптимизации экранирующих элементов.

### **3 Анализ существующих методов обнаружения опасных технологических дефектов в электронных платах**

#### **3.1 Общие требования к аппаратуре и методам контроля**

Развитие РКТ ставит перед разработчиками аппаратуры жесткие требования: улучшение габаритно-массовых характеристик, увеличение функциональных возможностей и повышение сроков активного существования [52]. ЭКБ, применяемая в бортовой аппаратуре КА, должна создаваться с учетом следующих факторов:

- разнообразие функциональных задач, выполняемых КА, приводит к необходимости использования широкой номенклатуры номиналов ЭКБ при их крайне малой количественной потребности;
- при производстве широкой функциональной номенклатуры ЭКБ требуется применение разнообразных технологий, многие из которых уникальны и отсутствуют в России;

– жесткие требования к сроку активного существования при полном отсутствии возможностей ремонта означают сверхжесткие требования к надежности и стойкости к дестабилизирующим факторам космического пространства.

Специфика ЭКБ космического применения состоит в том, что она развивается путем, отличным от общепромышленной электроники, ориентированной на массовый выпуск продукции с коротким жизненным циклом и быстрой сменой типов.

Существует проблема обеспечения производителей КА, которая может быть решена пропорциональным использованием отечественных и импортных комплектующих и созданием специализированных отраслевых производств. Более 60% базы, используемой в бортовой аппаратуре КА, приобретается у иностранных поставщиков, при этом для РФ действуют экспортные ограничения на приобретение компонентов качества Military и Space. Это приводит к неоправданному расширению номенклатуры.

Проблема элементной базы для аппаратуры РКТ в разнообразии применяемых типов сложных изделий (широкой функциональной номенклатуре) при крайне малой серийности, и исключительно высоким требованиям надежности и стойкости к дестабилизирующим факторам космического пространства для обеспечения длительных сроков функционирования.

Аппаратура космического приборостроения, имеет длительный жизненный цикл: для относительно серийных компонентов служебной аппаратуры (контрольно-измерительных систем, систем управления электропитанием, телеметрии и т.п.) срок производства прибора может превышать 20 лет. Налицо противоречие между требованиями к жизненному циклу аппаратуры и реальной сменяемостью поколений ЭКБ [52].

Одной из важнейших задач при создании РЭА КА является обеспечение длительного жизненного цикла, надежности, стойкости к

дестабилизирующим факторам и отказоустойчивости в условиях применения широкой номенклатуры ЭКБ.

Сложность конструкции и повышенные требования к надежности работы бортовой РЭА КА привели к необходимости использования многоэтапных методов контроля всех узлов и блоков на стадии разработки и сборки КА. При этом используются различные методы контроля и тестирующие устройства.

Обеспечение надежности электронных устройств и систем РЭА КА включает в себя контроль качества многослойных печатных плат, силовых блоков, соединительных и конструкционных элементов. Немаловажную роль в обеспечении надежности играет БКС, объединяющая узлы и блоки в единое целое. Своевременное выявление дефектов и неисправностей является необходимым условием обеспечения надежной работы КА.

### **3.2 Классификация методов контроля**

В настоящее время наиболее распространенными являются четыре метода обнаружения дефектов и неисправностей РЭА, которые можно разделить на две группы: электрические (внутрисхемное и функциональное тестирование) и неэлектрические (оптический и рентгеноскопический контроль качества паяных и межслойных соединений) [53–55].

Оптический и рентгеноскопический контроль. Оптический контроль качества РЭА осуществляется визуальным способом с использованием штативных луп и стереоскопических оптических систем [53]. Такой контроль позволяет обнаружить отсутствующие электрические и конструкционные компоненты, наличие деформаций выводов компонентов, неправильную маркировку, обрывы проводников и паразитные перемычки, не пропаянные соединения и другие дефекты. Основным недостатком метода оптического контроля является то, что он не позволяет проверить работоспособность элементов бортовой РЭА в сборе. Кроме того он не позволяет контролировать проводники, контактные площадки и выводы, расположенные под корпусами компонентов.

Функциональное тестирование. Функциональное тестирование применяется вслед за оптическим контролем. Однако такое тестирование позволяет проверить работоспособность РЭА в сборе только на ограниченном наборе входных сигналов и не позволяет локализовать дефекты и неисправности. Кроме того при подаче напряжения питания узлы РЭА, содержащие дефекты и неисправности, могут получить серьезные повреждения.

Внутрисхемное тестирование. Внутрисхемное тестирование наиболее универсальный метод контроля качества. Оно позволяет обнаружить отсутствующие или неправильно установленные компоненты, дефектные компоненты, паразитные перемычки (короткие замыкания) и обрывы проводников и т.д. Однако, если на плате есть непропаянные выводы компонентов, а тестирование производится путем подключения зонда непосредственно к выводу, дефект печатного монтажа не будет выявлен, поскольку зонд во время проверки прижмет вывод к контактной площадке.

Тестовое оборудование. Современное тестовое оборудование выполняет оптический контроль, затем внутрисхемное тестирование и периферийное сканирование, а на завершающем этапе выполняет функциональное тестирование. Развитое программное обеспечение осуществляет автоматическую генерацию тестов на основе данных САПР. Измерительная схема обеспечивает обнаружение замыканий и обрывов в узлах и блоках бортовой РЭА, выполняет емкостное тестирование пайки, измеряет величину сопротивления, индуктивности и емкости проводников и т.д. [56,57].

Таким образом, проблема обеспечения долгосрочной надежной работы бортовой РЭА КА решается путем многоэтапного тестирования узлов и блоков, начиная со стадии проектирования и заканчивая функциональным тестированием при сборке.

При определении надежности и ресурса работы традиционных элементов РЭА значительную роль в выявлении возможных дефектов играют статистические методы обработки данных о выходе из строя оборудования

[58–60]. Проблема обеспечения надежной работы бортовой РЭА КА остро стоит как в России, так и во всех странах, обладающих собственной космической программой [61]. Однако такие методы малоприменимы в космической отрасли из-за малой серийности, высокой стоимости оборудования, а также из-за быстрого обновления используемых в КА узлов и элементов. Все это приводит к невозможности получения необходимого объёма статистических данных.

Таким образом, наиболее актуальными методами выявления дефектов являются аппаратные методы контроля, о которых говорилось выше и моделирование процессов, приводящих к выходу оборудования из строя. Примером такого моделирования являются, например, работы по программному моделированию влияния статического электричества на эксплуатацию бортовой РЭА [62–64]. В частности, в этих работах проведен краткий анализ существующей защищенности КА от статического электричества и показана целесообразность и выгода применения экспериментально-теоретического метода оценки стойкости БРА и создания аппаратуры контроля электростатических полей на основе специализированных датчиков.

#### **4 Комплексный анализ современных методов выявления латентных технологических дефектов бортовой РЭА КА с длительным сроком активного существования, приводящих к возникновению дуговых разрядов в условиях космического пространства.**

Комплексный анализ методов выявления латентных технологических дефектов РЭА КА по своей структуре определяется спектром рисков, отсутствие защищённости от которых, либо недостаточная защищённость, является латентным дефектом, способным привести к дугообразованию в условиях орбитального КП. Каждый из рисков анализируется отдельно на предмет уровня техники и методов.

#### 4.1 Методы снижения рисков, связанных с нитевидными кристаллами

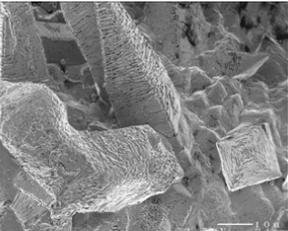
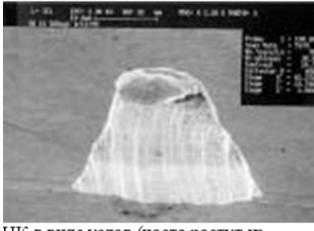
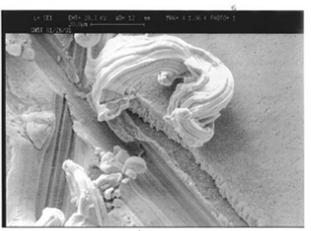
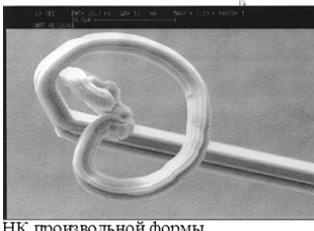
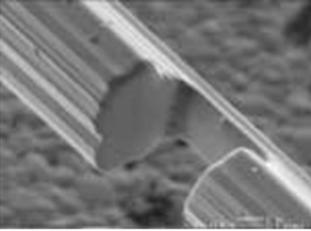
Основные риски НК проанализированы в разделах 1.1.3 и 1.2 и в краткой форме обобщены в таблице 4.1. Характеристики НК исследовались во многих работах и в достаточной мере обобщены в [65] и представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.1 – Риски, связанные с НК, и их проявления в РЭА.

Риск	Проявление в РЭА
1. Последствия постоянного КЗ	В случае низкого напряжения высокоомные цепи оказываются в состоянии КЗ с последующим падением напряжения, если ток, проходящий через НК в конкретной схеме, недостаточен для его плавления. Типичное значение тока разрушения НК составляет 30 мА [66].
2. Последствия прерывистого КЗ	Контакт НК подвержен вибрациям, что приводит к прерывистым КЗ, а в случае разреженной атмосферы к вибрациям добавляются градиенты давления. Прерывистый контакт НК может быть воспринят РЭА как срабатывание ключей, поскольку НК имеет сопротивление в десятки и сотни Ом.
3. Металлические пары и плазма в вакууме	КЗ нитевидным кристаллом в вакууме может приводить к более деструктивным последствиям, чем на воздухе. Испарение НК может привести к появлению проводимости вакуумного промежутка, и если цепь обеспечивает ток выше порогового (единицы Ампер), и напряжение выше катодного падения потенциала на дуге (порядка 20 В), произойдёт неизбежное зажигание самоподдерживающейся дуги. Ряд спутников США

	были потеряны по причине дугообразования, произошедшего вследствие КЗ нитевидным кристаллом [49].
4. Осаждение металлических плёнок, металлическая пыль.	НК могут отрываться от вибрации, образуя металлическую пыль. Проводящая пыль может вызывать КЗ. Кроме того, испарившиеся при протекании тока НК (и материал электродов в случае дуги) осаждаются на изолирующих поверхностях, что приводит к появлению проводимости.

Таблица 4.2 – Основные характеристики НК, обобщение работы [65].

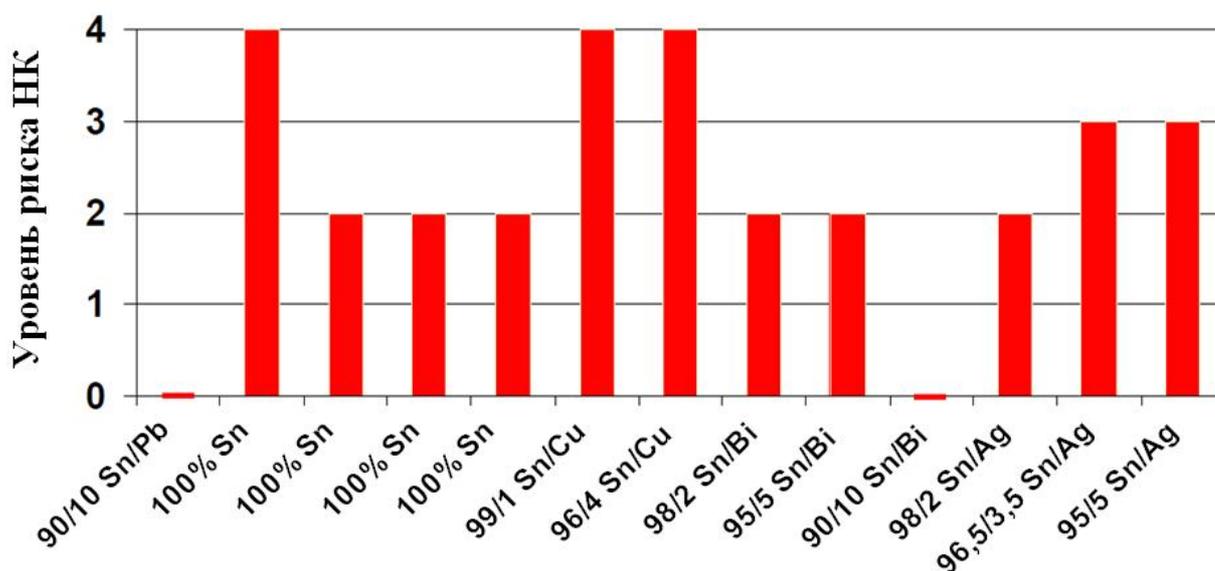
Характеристика	Описание
Формы НК	 <p>Классический НК игольчатого типа</p>  <p>Петли и страты</p>  <p>Пирамидальные НК</p>  <p>НК в виде узлов (часто растут из царапин)</p>  <p>НК в виде узлов (пример роста из царапины)</p>  <p>Игольчатый НК, растущий из узла</p>  <p>НК произвольной формы</p>  <p>Сечение НК, выполненное ионным пучком (НК внутри сплошной)</p>  <p>Узловатые НК, прорастающие под органической плёнкой</p>
Скорость роста	От 0.03 до 9 мм в год.
Предельная длина НК	Единицы миллиметров отмечаются в литературе в качестве типичных значений предельной длины НК, но встречаются

	сообщения о НК длиной до 1 см [67].
Диаметр НК	Типичный диаметр НК лежит в диапазоне 1÷4 мкм, максимальный диаметр достигает 10 мкм, минимальный диаметр 0,006 мкм. Диаметр НК может значительно превышать размер кристаллического зерна, но всегда меньше толщины покрытия [68].
Поверхность плотность числа НК	Наблюдается плотность до $10^4$ НК на $\text{см}^2$ на чистой поверхности олова. Плотность может быть выше в случае окисленной поверхности. На механических дефектах плотность НК также может быть выше.
Предельный ток	Типичные предельные токи, протекающие через НК, отмечаемые в литературе, составляют величину порядка 50 мА при типичном диаметре НК порядка 4 мкм. Это ситуация соответствует плотности тока $10^5$ А/ $\text{см}^2$ . В действительности предельной ток может быть выше, если он протекает короткое время [69] и достигать плотностей выше $10^7$ А/ $\text{см}^2$ при импульсах тока наносекундного диапазона длительностей.
Механическая прочность	Кристаллическая структура НК близка к структуре идеального кристалла, что обеспечивает высокую прочность НК в осевом направлении. В поперечном направлении прочность НК ниже, что и приводит к накоплению сегментов в блоках РЭА. С ростом длины прочность НК падает.

Существует ряд методов снижения риска НК, обзор методов опубликован в работе [70]. Основной метод состоит в выборе системы подложка-плёнка. Степень риска различных покрытий на подложке из бронзы Olin C194 (2.4% железо, 0.03% фосфор, 0.1% цинк, остальное медь) представлена диаграммой

на рисунке 4.1. Сплавы  $\text{Sn}_x\text{Pb}_{1-x}$  и  $\text{Sn}_x\text{Bi}_{1-x}$  отмечены низким риском НК при достаточном содержании добавки к олову.

С точки зрения материала подложки, наибольший риск роста НК в случае оловянного покрытия наблюдается на бронзах [71]. Использование чистой меди также сопровождается рисками роста НК, за исключением матового оловянного покрытия, на котором риск роста НК ниже. Подслой никеля толщиной 1÷2 мкм на медной основе не защищает поверхность оловянного покрытия от роста НК [71], в то время как на массивных образцах никеля и никелевых сплавов (например, на поверхности инвара [71]), покрытых оловом, риск роста НК низкий.



Шкала рисков НК:	
0 – отсутствие НК	3 – НК длиной до 25 мкм, высокая плотность НК
1 – НК длиной < 5 мкм	4 - НК длиной >25 мкм
2 – НК длиной до 25 мкм, низкая плотность НК	

Рисунок 4.1 – Уровень риска НК для экспозиции образцов поверхности бронзы Olin 194, покрытой слоем 3 мкм после трёх месяцев экспозиции при 52°C и 98% относительной влажности [70].

Поскольку рост НК происходит вследствие внутренних напряжений в покрытии, покрытие не должно быть тонким. Это подтверждается экспериментально фактом замедленного роста НК на толстых покрытиях [70] (рисунок 4.2). Напряжения в покрытии и на границе с основой могут быть

существенно снижены, соответственно, будут снижены риски роста НК, путём отжига изделия при температуре 150°C в течение 1 часа [70], однако не все ЭРИ способны выдерживать такие температуры. В связи с этим следует отметить, что покрытие, достигнутое погружением в расплав, существенно снижает риски роста НК [72].

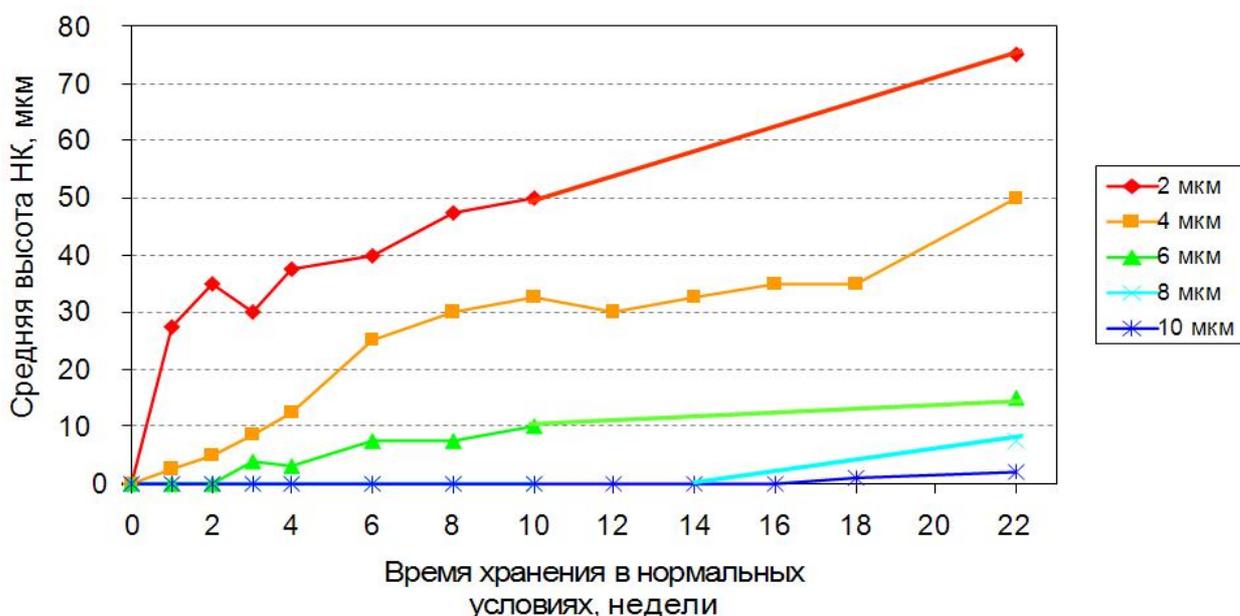


Рисунок 4.2 – Динамика роста НК для различных толщин оловянного покрытия на поверхности бронзы [70].

В настоящее время не существует единого регламента по принятию мер, направленных на снижение рисков роста НК, и при производстве могут быть использованы лишь рекомендации, опубликованные в [72].

#### 4.2 Методы снижения рисков, связанных с инициированием дуги электростатическим разрядом

Для снижения рисков, связанных с инициированием самоподдерживающейся дуги слаботочным электростатическим разрядом разрабатываются процедуры лабораторного тестирования аппаратуры (прежде всего, СБ) на устойчивость к ЭСР, имитируя при этом условия окружающей среды, соответствующие орбитальному КП. Данные

тестирования подразумевают комплексное воздействие, включающее как потоки ЗЧ, так и плазменное окружение [73]. Экстраполяция результатов лабораторного тестирования на реальные объекты в реальных условиях эксплуатации может быть успешно осуществлена с использованием компьютерного моделирования [74]. Достоинство компьютерного моделирования состоит не только в доступности исследований, но и в возможности анализа факторов, трудно поддающихся имитации в лабораторных и натурных экспериментах. Например, разделение долей ответственности в инициировании дуги заряженной и нейтральной компонент среды, окружающей КА, доступно лишь в случае моделирования [75]. Модель, дающая согласие с лабораторным экспериментом, предоставляет возможность проведения численного эксперимента для КА в целом [47], включая экстремальные условия (например, интенсивный поток коронарного выброса), имитация которых затруднена в лабораторном эксперименте.

На основе экспериментов по инициированию дуги, выполненных в работе [76], указывается, что основным механизмом дугообразования в системах питания КА на основе СБ является десорбция газов с диэлектрических поверхностей. Так, в условиях плазменного окружения, характерного для КА, порог дугообразования становился выше 200 В, если СБ тщательно обезгаживались.

В работах [77,78] отмечается, что из всех газов, адсорбированных на диэлектрических (полупроводниковых) поверхностях наибольшую опасность для инициирования дуги представляет собой вода. За счёт того, что молекула воды является полярной, на поверхности может адсорбироваться значительное количество воды. При этом десорбция воды за счёт нахождения поверхности в вакууме затруднена вследствие способности первого слоя адсорбированной воды образовывать с поверхностью СН либо SiH связи, в зависимости от материала. В [77,78] отмечается, что хорошо прогретые и

обезгаженные СБ способны работать без дугообразования при напряжении до 300 В в условиях естественного плазменного окружения КА.

Радикальное решение проблемы дугообразования предлагается японскими авторами [79] (рисунок 4.3), заключающееся в полном отказе от напряжений свыше 50 В, однако данное решение на настоящем этапе развития техники является утопией, поскольку переход к высоким напряжениям систем питания КА определяется потребностями всё возрастающими мощностями, требуемыми для функционирования КА.

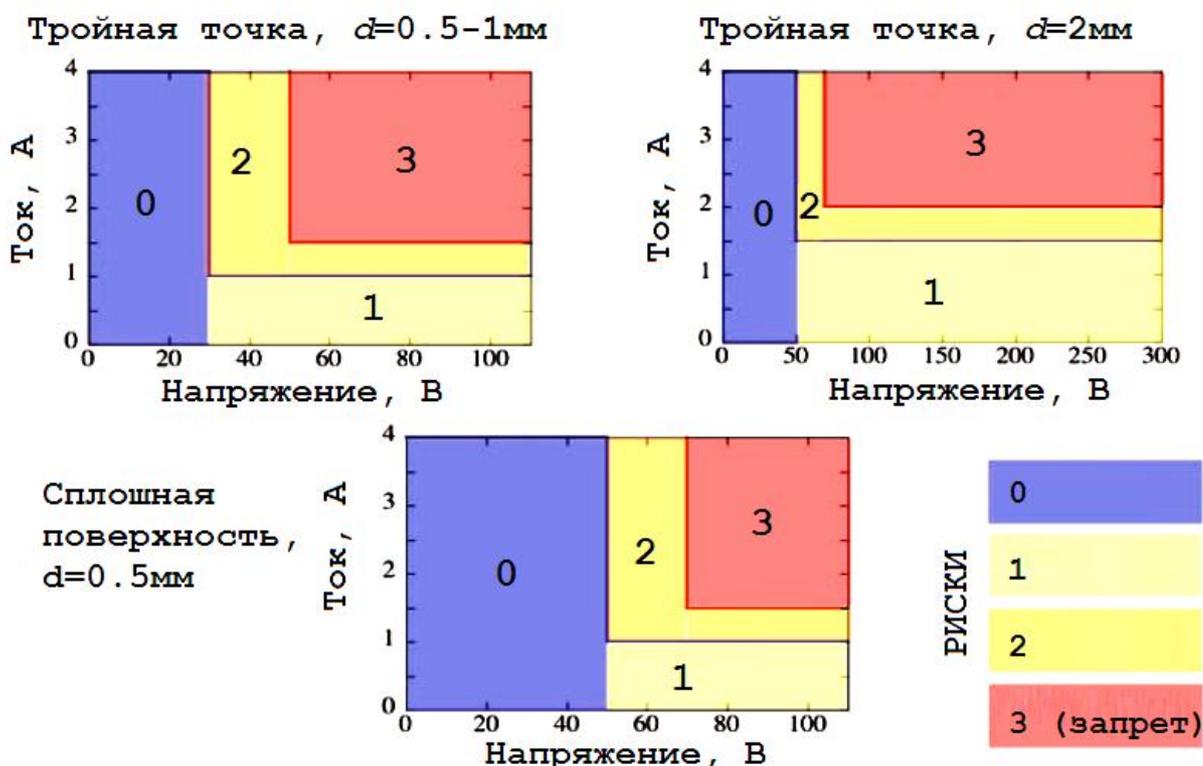


Рисунок 4.3 – Диаграммы областей рисков дугообразования в зависимости от напряжения и тока, способного отдавать питающей цепью [79].

Необходимость снижения рабочих напряжений до уровня 50 В для СБ открытой конфигурации отмечается также в работе [80], однако, как обоснованно утверждается в [80], система питания КА может быть успешно реализована и для напряжения 300 В, если СБ помещается в капсулу.

Решение проблемы дугообразования, как утверждается в [16], может быть только в том случае, когда проблема решается комплексно путём исключения

всех известных механизмов инициирования дуги. Основные шаги состоят в следующем:

(а) Все ЭРИ должны быть защищены экранами достаточной толщины с тем, чтобы исключить накопление внутреннего заряда в диэлектриках. Для современной РЭА, используемой на геостационарных орбитах, толщина защиты должна быть не менее 2,75 мм в алюминиевом эквиваленте, и защитой толщиной 5 мм в алюминиевом эквиваленте более предпочтительна для защиты РЭА в условиях высокой солнечной активности. Для радиационно-стойкого оборудования, спроектированного с учётом требований иммунитета к ЭСР, толщина полной защиты может быть снижена до 1,75 мм в алюминиевом эквиваленте. Все перечисленные значения толщины щита подразумевают общую толщину всех защитных экранов.

(б) Электронные элементы должны быть защищены клетками Фарадея. Это требование должно быть распространено на весь КА так, чтобы все компоненты были внутри электростатических щитов, и все щиты образовывали единую электрически соединённую цепь. Назначение защиты Фарадея состоит в экранировке элементов от продуктов эрозии и электромагнитного шума, производимых ЭСР внутри блоков РЭА. Защита должна уменьшать уровень электромагнитного шума ЭСР не менее чем 40 дБ. Защита Фарадея должна быть без технологических отверстий, но может быть выполнена из мелкой сетки. Для исключения негерметичности клеток элементы щита должны быть соединены с экранами кабельных линий.

(в) Металлизированный пластик недостаточно хорошо защищает от электромагнитного шума и абсолютно неэффективен против накопления внутреннего заряда. Гораздо большего эффекта можно достичь путём использования алюминиевой фольги. Хороший эффект достигается путём использования алюминиевых сотовых конструкций.

(г) Экраны кабельных линий могут быть изготовлены из металлического листа, ленты или фольги в виде герметичной (для электромагнитного шума) оболочки. Оборачивание кабельных линий металлизированной плёнкой или

фольгой не обеспечивают адекватную защиту и экранирование внутреннего содержимого (проводников, кабелей) заряжающей среды и не должна быть использована. Все внешние провода и кабели должны быть внутри экрана вплоть до входа в экранированные блоки РЭА. Оплётки на проводах должны быть припаяны к экрану блоков и заземлены на входах.

(д) Электрические терминаторы и разъемы и установленные снаружи компоненты должны быть электрически экранированы, и все экранированные корпуса разъемов должна быть связана с общей структурной «землей» КА.

(е) Экраны всех структурных элементы должны быть соединены между собой. Сопротивление контактов, соединяющих экраны, не должно превышать 2,5 мОм во избежание искрений при протекании импульсных токов большой амплитуды через контакт. По этой же причине недопустимо заземление через подшипники. Заземляющие проводники, шунтирующие подшипники, должны быть по возможности короткими. При многооборотном вращении используются контактные кольца, которые должны быть экранированы.

(ж) Изолирующие материалы должны иметь ограниченную проводимость и хороший контакт с «землей» для стекания объёмного и поверхностного заряда. Хорошие диэлектрики уместны для высоковольтной изоляции, но неуместны в РЭА КА. Использование массивных диэлектриков должно быть исключено или, по крайней мере, сокращено. Поскольку номинальные напряжения, используемые в РЭА, относительно малы, предпочтительным должно быть использование тонкослойной изоляции толщиной 100÷150 мкм, что обеспечит хорошее стекание объёмного заряда.

(з) Оболочка КА должна быть проводящей и соединённой с системой экранов.

### 4.3 Нормативные документы, регламентирующие меры по снижению рисков дугообразования в РЭА КА

Перечень нормативных документов и их описание приведено в таблице 4.3. Таблица содержит лишь те документы, которые находятся в открытом доступе.

Таблица 4.3 – Нормативные документы, регламентирующие меры по снижению рисков, связанных с ЭСР.

№ п/п	Реферативная информация	Страна	Описание
1	ГОСТ 19005-81 Средства обеспечения защиты изделий ракетной и ракетно-космической техники от статического электричества. Общие требования к металлизации и заземлению.	СССР	Стандарт регламентирует в качестве защитных мер от ЭСР на КА металлизацию частей КА и их заземление. Подробно излагается, что и каким образом должно металлизироваться и заземляться и каким образом должно контролироваться качество металлизации и заземления.
2	ГОСТ Р 51317.4.2-99 (МЭК 61000-4-2-95) Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электростатическим разрядам. Требования и методы испытаний.	РФ	Стандарт даёт классификацию электромагнитных воздействий, вызванных ЭСР, и регламентирует мероприятия по испытаниям технических средств на устойчивость к электромагнитному шуму, вызванному ЭСР. Специфические условия, присущие ЭСР в КП, не анализируются и не упоминаются.
3	ECSS-E-ST-20-07C Space	ЕС	Стандарт регламентирует

	engineering. Electromagnetic compatibility.		технические средства, включая схемные решения, для защиты от негативных последствий ЭСР в РЭА КА. Требования стандарта согласуются с требованиями, опубликованными в [16] и других справочных изданиях.
4	SMC Standard SMC-S-008 Space and Missile Systems Center Standard. Electromagnetic Compatibility Requirements for Space Equipment and Systems	США	Стандарт регламентирует требования к уровням защиты и методы и порядок испытания оборудования.
5	ECSS-E-ST-20C European Standard for Space Electrical and Electronic Equipments.	ЕС	Стандарт регламентирует технические средства по защите СПУ КА от сбоев в РЭА. Главная цель использования средств защиты, рассматриваемых в стандарте, недопущение остановки работоспособности СПУ и опасных для функционирования КА провалов в напряжениях питания.
6	ECSS-E-ST-20-06C Space engineering. Spacecraft charging.	ЕС	Стандарт содержит комплекс справочной информации по процессам, приводящим к накоплению заряда на поверхности и в объеме КА, технические требования по снижению рисков, связанных с последствиями ЭСР,

			включая самоподдерживающиеся дуги, а также регламенты испытаний РЭА и СБ на устойчивость к воздействию ЭСР.
7	ANSI/ESD S20.20-1999 (with revision ANSI/ESD S20.20-2007) For the Development of an Electrostatic Discharge Control Program for Protection of Electrical and Electronic Parts, Assemblies and Equipment (Excluding Electrically Initiated Explosive Devices)	США	Общетехнический стандарт США, регламентирующий технические и организационные требования для обеспечения условий беспрепятственного стекания статического электричества. Принят NASA в качестве основного стандарта по данной проблеме взамен отраслевого стандарта NASA-STD-8739.7.
8	NASA HDBK 4002A Mitigating In-Space Charging Effects	США	Документ, имеющий статус стандарта, содержащий справочную информацию по методам предотвращения ЭСР в КА.
9	ISO 11221:2011 Space systems - Space solar panels - Spacecraft charging induced electrostatic discharge test methods	Международная организация по стандартизации	Документ даёт подробную классификацию дуговых разрядов, основы физики вакуумной дуги и подробно изложенные методики тестовых испытаний.

**5 Разработка комплексных методов выявления латентных технологических дефектов бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов с длительным сроком активного существования, в т.ч. метод исследования процессов возникновения дуговых разрядов в бортовом оборудовании в условиях космического пространства.**

### **5.1 Модельное представление элементов РЭА, подверженных риску дугообразования при эксплуатации в условиях КП**

РЭА КА спроектирована таким образом, чтобы при максимальных рабочих напряжениях все структурные изолирующие промежутки выдерживали бы номинальные напряжения. Самоподдерживающаяся дуга возникает не сама по себе, а в результате первичного ЭСР или выхода из строя электронного компонента, установленного на плате и защищённого тонкой плавкой вставкой. Если плавкая вставка открытая, и при её разрушении загорается первичная дуга, то такая ситуация представляет угрозу для СПУ в виде потенциальной возможности инициирования вакуумной дуги постоянного тока. Отсутствие мер, препятствующих зажиганию первичной дуги после горения первичной дуги является латентным дефектом конструкции блоков РЭА КА.

Для выявления латентных дефектов блоков РЭА КА, способных приводить к дугообразованию, проводятся имитационные испытания, при которых реальный блок заменяется его моделью, содержащей все критические промежутки, имеющие место в реальных блоках. Критическими промежутками выбираются следующие конфигурации электродов:

- (а) дорожки печатных плат;
- (б) сегменты материальных шин;
- (г) контакты соединителей.

Представляющий интерес диапазон температур:  $-30...+60^{\circ}\text{C}$ , 20 циклов термоциклирования. Электродная система выдерживается 2 часа при каждой

температуре. Темп нагрева/охлаждения поддерживается в диапазоне  $1 \div 2^\circ\text{C}$  в минуту.

В случае печатных проводников, интересующая геометрия – параллельное и угловое расположение дорожек (рисунок 5.1.).

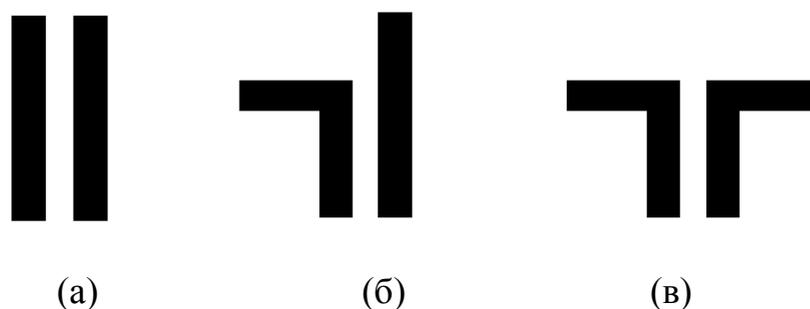


Рисунок 5.1 – Параллельное (а) и угловое (б, в) расположение дорожек печатных плат, используемое при тестировании.

Материалом проводников служит медная фольга толщиной 0,35 мм. Радиусы на печати  $0,2 \div 0,3$  мм. Промежутки: от 0,2 мм.

Возможная геометрия в материальных шинах представлена на рисунке 5.2. Материал шин – алюминий, медь. Толщина шин – от 1 до 6 мм. Промежутки – от 2 мм. Применяемые покрытия: никель, олово-висмут О-Ви(99,8)6 (99,8% олова), олово-свинец О-С(61)9, золочение.

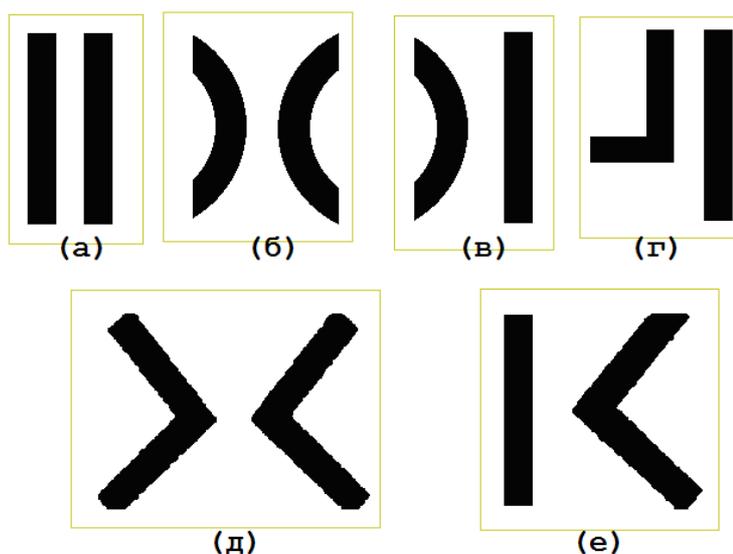


Рисунок 5.2 – Различные конфигурации материальных шин, используемых в реальных СПУ КА. Вид в сечении проводников.

Для проведения испытаний по возникновению дугового разряда между контактами соединителей допустимо имитировать контакты штырями или проволокой круглого сечения, или впаять штатный соединитель СНП 339 (в таком случае возможно целесообразным сделать макет с имитацией части рамки). Необходимо проводить испытания в двух случаях – без изоляционного покрытия (дефектное покрытие), покрытие лаком (для материальных шин).

## 5.2 Конфигурация разрядной системы для определения вероятности инициирования вторичной дуги первичной дугой

Для адекватного тестирования путём моделирования блоков РЭА требуется модельное представление источника плазмы первичной дуги, адекватное реальному источнику плазмы. С этой целью можно проанализировать реальные осциллограммы, полученные при лабораторных испытаниях блоков РЭА, на которых зарегистрированы различные сценарии разрушения плавкой вставки. Типичная ситуация успешного разрушения защитного проводника представлена осциллограммой на рисунке 5.3. Данная осциллограмма свидетельствует об отсутствии вакуумной дуги, последовавшей за разрывом цепи протекания аварийного тока, что доказывается быстрым обрывом, не характерным для плазмы в промежутке.

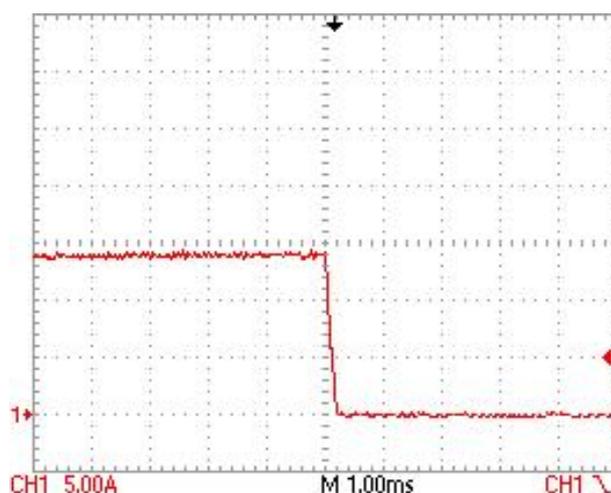


Рисунок 5.3 – Типичная осциллограмма успешного выключения аварийного тока плавким проводником. Диаметр проводника 0,18 мм, длина (10±1) мм.

Ток срабатывания 13,7 А.

В ряде случаев (особенно, если в цепи есть индуктивность, и за обрывом тока следует скачок напряжения) аварийный ток выключается плавким проводником не сразу, а после протекания тока, характерного для тока вакуумной дуги (рисунок 5.4,а–в). Ток вакуумной дуги (первичной дуги в данном случае) может протекать до тех пор, пока не израсходуется энергия, запасённая в разрядном контуре. Ток среза на всех осциллограммах лежит в пределах  $2\div 3$  А.

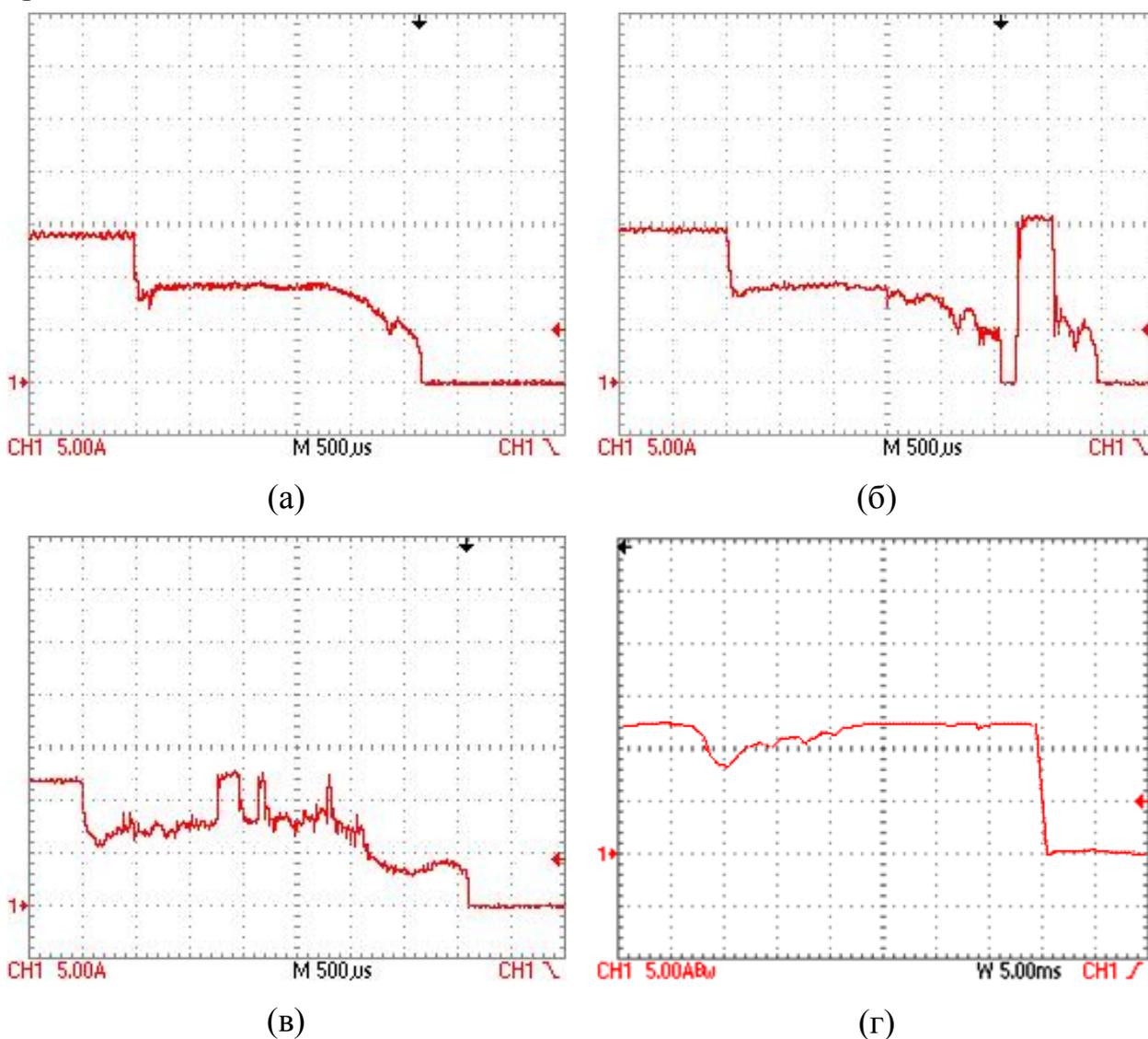


Рисунок 5.4 – Примеры немонотонного прерывания тока, однозначно (а–в) и неоднозначно (г) свидетельствующие о горении дуги перед полным выключением тока. (а) – Диаметр 0,18 мм, длина  $(10\pm 1)$  мм. Ток срабатывания 13,7 А. (б) – Диаметр 0,18 мм, длина  $(10\pm 1)$  мм. Ток срабатывания 14,2 А. (в) – Диаметр 0,15 мм, длина  $(10\pm 1)$  мм. Ток срабатывания 11,2 А. (г) – Диаметр 0,12 мм, длина  $(10\pm 1)$  мм (7 мм). Ток срабатывания 11,7 А.

На осциллограмме рисунке 5.4,г нет явных признаков дугового разряда (падение тока, сопровождаемое шумами, ток среза), но есть разрыв в токе с последующим восстановлением проводимости в полной мере. В момент разрыва можно ожидать образование плазмы (искрение), и подобные события также можно рассматривать в качестве первичного разряда.

Для имитации первичной дуги, обеспечивающей подобную осциллограмму, в настоящей работе предлагается использование жидкометаллического катода игольчатого типа. Для таких катодов характерны относительно низкие пороговые напряжения инициирования дуги [81] без предварительного приведения электродов в контакт, а также высокая стабильность срабатывания катода. Эти качества позволят проводить измерения при частоте следования импульсов тока первичной дуги вплоть до нескольких десятков герц.

Схема эксперимента приведена на рисунке 5.5. Схема работает следующим образом. В экспериментальную камеру помещается два промежутка, первый из которых образован электродами К1 (жидкометаллический катод) и А1 (сетчатый анод с большим размером ячеек, не препятствующим распространению плазмы). Промежуток К1-А1 является источником первичной дуги. Через диод D2 от генератора подаётся импульс высокого напряжения отрицательной полярности амплитудой порядка 10 кВ, превышающей пороговое напряжение роста конуса Тейлора на К1 [81] и длительностью порядка 10 мкс. Благодаря диодам D1 и D2 импульс заряжает контур C2-R5, который остаётся заряженным до тех пор, пока рост конуса Тейлора не закончится иницированием первичной дуги [81]. После снижения напряжения на C2 ниже 500 В по абсолютной величине открывается диод D1, и начинается разрядка контура C1-R6. Параметрами контуров C2-R5 и C1-R6 следует добиться осциллограммы тока первичной дуги, подобной представленным на рисунке 5.4,а-в. На расстоянии L от А1 располагается тестируемый промежуток К2-А2, питание которого осуществляется от контура C3-R8. Промежуток К2-А2 имитирует

материальные шины, представленные в сечении на рисунке 5.2. Расстояние  $L$  является одним из ключевых параметров данной системы. Внутри  $K2$  расположен зонд, режим измерения которого определяется сопротивлением  $R1$  и подаваемыми на зонд напряжениями (не показаны на рисунке).

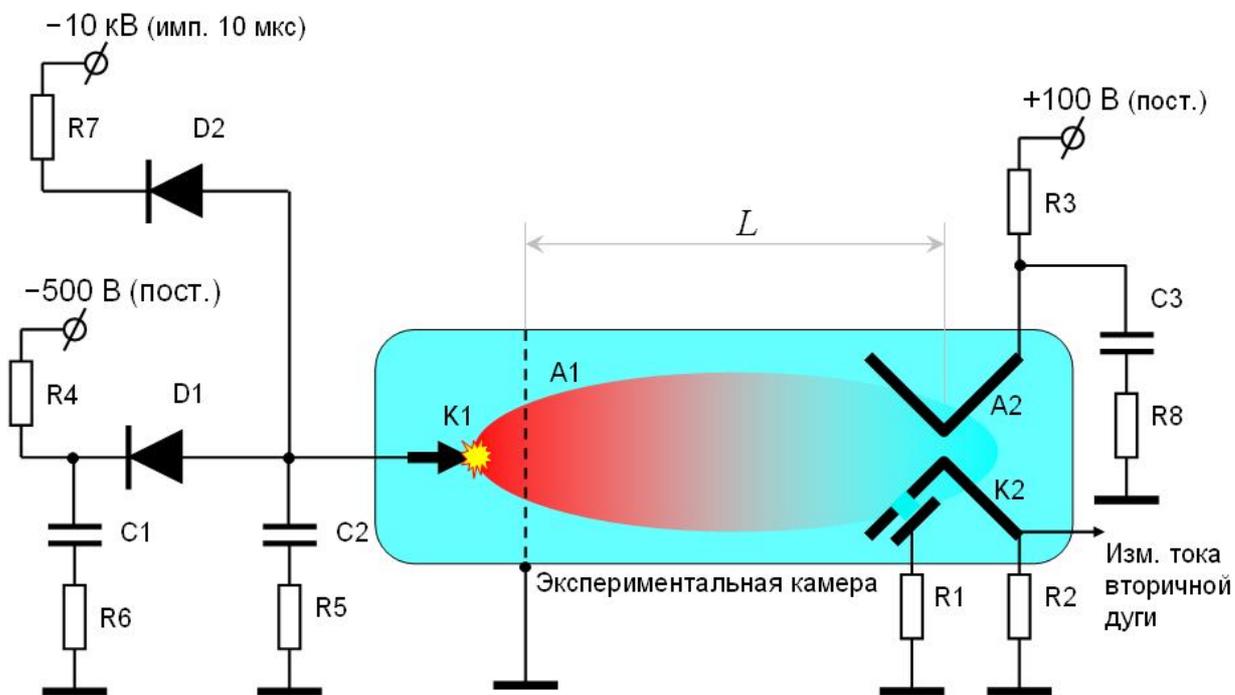


Рисунок 5.5 – Электрическая схема тестирования промежутка на стойкость к инициированию вторичной дуги, предлагаемая в настоящей работе.

### 5.3 Соединение физического эксперимента с программной реализацией метода

Эксперимент начинается на максимальных расстояниях, доступных для экспериментальной камеры (порядка 30 см). При неизменном режиме импульсно-периодического горения первичной дуги расстояние  $L$  постепенно уменьшается до тех пор, пока не начнёт происходить инициирование вторичной дуги, что регистрируется свечением плазмы в промежутке  $K2-A2$  и осциллограммами тока через низкоомный шунт  $R2$ .

По достижении условий порогового дугообразования в промежутке  $K2-A2$  с использованием зонда, расположенного за отверстием в  $K2$ , осуществляется

измерение параметров плазмы зондовым методом, подробно описанном в [82].

Эксперименты проводятся для различных условий окружающей атмосферы и различных конфигураций электродов. Для каждого набора состояний измеряется вероятность инициирования вторичной дуги. Набор данных для каждой экспериментальной ситуации образует запись в формируемой базе данных.

При анализе блоков РЭА с использованием программной реализации метода база данных для вероятностей инициирования вторичной дуги используется в качестве системы критериев для выявления зон высокого риска с точки зрения дугообразования. При появлении такого результата проектировщик принимает меры, либо путём перестановки плат внутри блоков РЭА, либо введением сетчатых экранов. Параметры сетки экранов вычисляются с использованием программной реализации метода обнаружения латентных мест дугообразования. При этом ячейка сетки выбирается максимально возможной (с целью минимизации массы экрана) для обеспечения экранировки, адекватной ожидаемой концентрации плазмы первичной дуги. При анализе конфигурации блока в качестве источника первичной дуги рассматривается каждая из рамок плат, а в качестве возможных мест инициирования вторичной дуги – материальные шины и проводники питания на платах.

## **6 Теоретические исследования путей создания численно-аналитической модели процессов возникновения дуговых разрядов в бортовом оборудовании в условиях космического пространства**

В этом разделе излагаются основные физические представления о том, какие условия способствуют возникновению дуговых разрядов в электротехническом оборудовании: характеристики поверхности электродов, неустойчивости газового разряда, приводящие к смене механизмов эмиссии

на катоде, вторичные процессы, приводящие к переходу слаботочного (тлеющего) разряда в дуговую форму.

### 6.1 Описание эмиссионных процессов на поверхности твердого тела

Эксперименты, проведенные в вакууме, показали, что слабые токи, предшествующие вакуумному пробою, распределены не равномерно по поверхности катода, а в виде отдельных точечных источников [83]. Эти предпробойные токи обычно интерпретируются как автоэмиссионные. Такая резко выраженная неоднородность распределения автоэмиссионных токов создает определенные трудности для построения модели процессов в катодном слое, адекватно отражающей действительность.

Обычно плотность тока автоэмиссии с микронеоднородностей на поверхности катода описывают упрощенным уравнением Фаулера-Нордгейма

$$j_a = A (\mu E_c)^2 \exp[-B/(\mu E_c)], \quad (1.7.1)$$

где  $A = 1.55 \cdot 10^{-6}/\phi$ ,  $B = 6.85 \cdot 10^7 \phi^{3/2}$ ,  $\phi$  – работа выхода в эВ,  $E_c$  – средняя напряженность электрического поля у поверхности катода в В/см,  $\mu$  – безразмерный коэффициент усиления поля на микронеоднородностях,  $j_a$  – плотность тока в А/см<sup>2</sup>.

Существует два подхода к учету автоэмиссии. Первый связан с расчетом порогового значения напряженности поля, превышение которого приводит либо к вакуумному пробою, либо к микровзрыву неоднородности во время горения газового разряда [84]. В этом случае в формуле (1.7.1) значение  $\mu$  соответствует максимальному усилению на единичной неоднородности. Обычно, говоря о такой неоднородности, имеют ввиду микровыступ с максимальным отношением его высоты к радиусу кривизны кончика  $h/r$ .

Второй подход связан с включением тока автоэмиссии в одномерную модель катодного слоя [85]. В этом случае  $\mu$  характеризует среднее значение усиления поля на поверхности катода, причем способ расчета этого среднего

не определяется. Если в первом подходе применимость формулы (1.7.1) не вызывает сомнения, то во втором это не так. Поэтому модель катодного слоя, предложенная в работе [85], позволяет получить чисто качественные результаты, а на количественное соответствие надеяться не приходится.

Реальная поверхность имеет как геометрические выступы, так и участки с пониженной работой выхода. И тот и другой факторы, вызывающие увеличение плотности автоэмиссионного тока, можно охарактеризовать величиной  $\mu$ , входящей в выражение (1.7.1). Поэтому при расчете величины плотности тока мы не будем в дальнейшем конкретизировать, чем именно вызвано “усиление” поля. Это стандартный подход к описанию эмиссионных свойств поверхности [86]. Значение  $\mu$  для шероховатой поверхности меняется от точки к точке случайным образом, и было бы удобно ввести плотность распределения вероятности  $f(\mu)$ , которая выражает относительную вероятность того, что произвольно выбранный малый элемент поверхности имеет коэффициент усиления, лежащий в пределах от  $\mu$  до  $\mu + d\mu$ . Такой вероятностный подход к описанию усредненных свойств поверхности катода известен в теориях дуг [86].

Функция  $f(\mu)$  неизвестна, но из общих соображений ясно, что чем больше  $\mu$ , тем менее вероятны такие неоднородности. Трудно априорно говорить о каком-либо другом определенном свойстве функции  $f(\mu)$ . Это можно было бы сделать, если задаться какой-либо моделью рельефа поверхности.

Если рельеф поверхности является спекл-структурой, то для определения  $f(\mu)$  можно воспользоваться законом больших чисел. Применительно к нашему случаю он гласит: если рельеф поверхности в данной точке является результатом сложения  $N \gg 1$  случайных малых величин, имеющих произвольный закон распределения высот с дисперсией  $s_0$ , то высоты  $h$  отдельных выступов результирующего рельефа подчиняются нормальному закону распределения:

$$f(h) = C \exp(-h^2/Ns_0) . \quad (1.7.2)$$

Форма отдельного выступа спекл-рельефа должна быть близка к вытянутому эллипсоиду вращения с большой полуосью  $h$  и малой  $b$ . Коэффициент усиления поля на вершине такого эллипсоида при достаточно больших отношениях  $h/b$  приблизительно равен:

$$\mu (h/b)^2 \ln(h/b) . \quad (1.7.3)$$

Если пренебречь слабой логарифмической зависимостью в (1.7.3), то из двух последних выражений видно, что при больших отношениях  $h/b$  или больших  $\mu$ , функция распределения  $f(\mu)$  является экспоненциальной:

$$f(\mu) \exp(-\mu/\beta) , \quad (1.7.4)$$

где введен коэффициент  $\beta = (s_0/b)^2 N \ln(h/b)$ , характеризующий степень шероховатости поверхности. Таким образом, мы опять получили экспоненциальное распределение вероятности.

Хотя для реальной поверхности  $f(\mu)$  нам не известна, ниже мы будем считать ее экспоненциальной во всем интервале значений коэффициента усиления поля  $\mu$ :

$$f(\mu) = \beta^{-1} \exp(-\mu/\beta) . \quad (1.7.5)$$

Эта простая зависимость позволит нам получить результаты в аналитической форме, не сильно греша против истины. Коэффициент  $\beta$  в формуле (1.7.5) имеет значение среднего коэффициента усиления поля. Оценим его реальную величину, исходя из анализа экспериментальных данных.

Типичные плотности дефектов  $D$  на поверхности с коэффициентом усиления  $\mu \geq 100$  составляют  $D \cong 10 \text{ см}^{-2}$ , а типичные площади эмиссии  $S \cong 10^{-12} \text{ см}^2$  [83,86,87]. С учетом этих данных можно оценить среднее значение  $\beta$ . Вероятность того, что участок поверхности имеет коэффициент усиления больше или равный  $\mu$ , запишется как  $\exp(-\mu/\beta) \sim DS$ . Отсюда при

$\mu = 100 \div 200$  имеем  $\beta = 4 \div 8$ . Естественно, это средние оценки, и в зависимости от способа обработки поверхности значение  $\beta$  может меняться в более широких пределах.

Определим теперь среднюю по поверхности плотность тока автоэмиссии:

$$\langle j_a \rangle = \int_0^{\infty} j_a(\mu) f(\mu) d\mu = (AE_0/\beta) \int_0^{\infty} \mu^2 \exp[-(B/\mu E_c) - (\mu/\beta)] d\mu . \quad (1.7.6)$$

Мы здесь использовали выражение (1.7.1) для локальной плотности тока автоэлектронной эмиссии  $j_a$ . Выражение, стоящее в показателе экспоненты, имеет максимум при значении

$$\mu_0 = \beta (B/\beta E_c)^{1/2} , \quad (1.7.7)$$

причем абсолютная величина этого максимума в области интересующих нас полей  $E_c$  много больше единицы:

$$2(B/\beta E_c)^{1/2} \gg 1 . \quad (1.7.8)$$

Этот факт позволяет с хорошей точностью вычислить интеграл (1.7.6) методом перевала:

$$\langle j_a \rangle = \pi^{1/2} AB^2 C (\beta/\mu_0)^{3/2} \exp(-2\mu_0/\beta) , \quad (1.7.9)$$

где множитель  $C$  слабо зависит от  $\beta/\mu_0$  и в интересующем нас диапазоне может считаться постоянным  $C \cong 1.3$ . По смыслу метода перевала ясно, что основной вклад в ток автоэмиссии дают участки поверхности, имеющие коэффициент усиления, близкий к значению  $\mu_0$ . Поскольку  $\mu_0/\beta \gg 1$ , то эти участки соответствуют хвосту функции распределения (1.7.5), а зависимость функции  $f(\mu)$  при  $\mu \ll \mu_0$  может быть произвольной. Поэтому формула (1.7.9) остается правильной даже в том случае, если только хвост функции распределения можно аппроксимировать экспонентой. В этом случае

параметр  $\beta$  будет характеризовать изменение  $f(\mu)$  при больших значениях  $\mu$ , а не истинный средний коэффициент усиления.

Кроме средней по поверхности плотности тока  $\langle j_a \rangle$  можно рассчитать также и локальную плотность тока  $j_0$  на микронеоднородностях, дающих основной вклад в  $\langle j_a \rangle$ :

$$j_0 = j_a(\mu_0 E_c) = AB\beta E_c \exp[-(B/\beta E_c)^{1/2}]. \quad (1.7.10)$$

На рисунке 6.1 показаны зависимости  $\langle j_a \rangle, j_0$  от произведения  $\beta E_c$  и для сравнения вычислена плотность тока автоэмиссии по формуле Фаулера-Нордгейма (1.7.1) при  $\mu = \beta$ . Расчет проведен для металла с работой выхода  $\phi = 4.5$  эВ.

Введение функции  $f(\mu)$  дает возможность различать среднюю плотность тока и локальную плотность тока с отдельных микроострий. Если последняя превысит  $10^8$  А/см<sup>2</sup>, то за время менее  $10^{-6}$  с с необходимостью произойдет переход автоэлектронной эмиссии во взрывную [87]. Конечно возможно, что при наличии неоднородности с большим  $\mu \geq \mu_0$ , микровзрыв произойдет и при  $j_0 \leq 10^8$  А/см<sup>2</sup>, но это событие будет носить характер статистической флуктуации, а не закономерности. Поэтому  $j_0$  надо тоже рассматривать как среднее значение плотности тока на микроостриях, не исключая возможные случайные отклонения от этой величины для отдельных участков поверхности.

Подобная интерпретация допускает в принципе длительное существование средних по поверхности плотностей тока автоэмиссии по крайней мере до  $10^4$  А/см<sup>2</sup> без обязательных микровзрывов. Из рисунка 6.1 видно, что такие средние плотности автоэмиссионного тока реализуются при напряженностях поля, приблизительно на порядок более низких, чем это следовало бы из формулы Фаулера-Нордгейма.

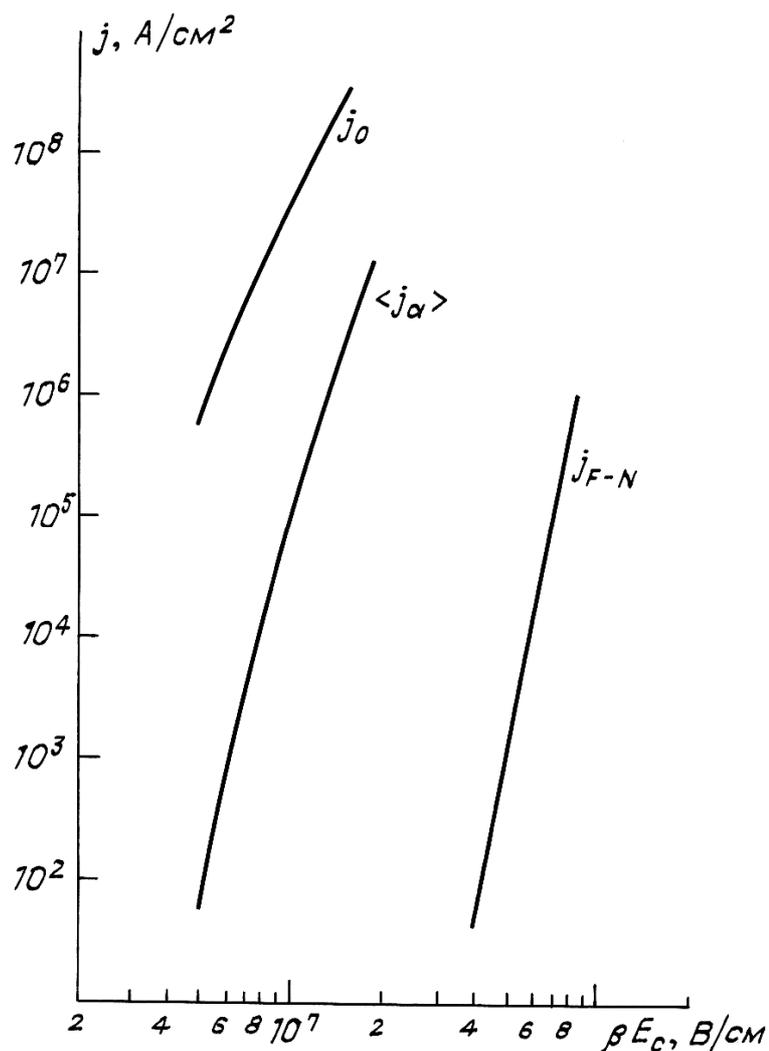


Рисунок 6.1 – Зависимость средней по поверхности плотности тока автоэмиссии  $\langle j_\alpha \rangle$  и средней плотности тока на отдельном микровыступе  $j_0$  от средней напряженности поля у катода  $E_c$ . Зависимость Фаулера-Нордгейма  $j_{F-N}$  дана для сравнения.

## 6.2 Катодный слой тлеющего разряда с учетом автоэмиссии

Рассмотрим теперь условия, которые позволяют использовать выражение (1.7.9) при расчете катодного слоя [88].

Во-первых, считаем размер неоднородностей на катоде много меньшим не только толщины катодного слоя  $l_c$ , но и длины свободного пробега электронов и ионов. В этом случае острия находятся как бы в вакууме. Поскольку длина пробега электронов много больше размера области

усиленного вблизи острия поля, то скорость ионизации будет определяться средним полем в катодном слое.

Во-вторых, чтобы воспользоваться понятием среднего тока  $\langle j_a \rangle$ , расстояние между отдельными центрами эмиссии  $\Delta l_{em}$  должно быть много меньшим толщины катодного слоя. Если принять для площади одного эмиссионного центра величину  $S \cong 10^{-12} \text{ см}^2$ , то количество эмиссионных центров на единице площади будет равно

$$D \sim \exp(-\mu_0/\beta)/S,$$

а среднее расстояние между ними  $\Delta l_{em} \sim 1/\sqrt{D}$ . Поэтому второе необходимое условие применимости (1.7.9):

$$\Delta l_{em} = S^{1/2} \exp(\mu_0/2\beta) \ll l_c. \quad (1.7.11)$$

С учетом сделанных предположений можно считать, что электронный ток на катоде возникает не только за счет  $\gamma$ -процессов, но и за счет автоэмиссии:

$$j_e(0) = \langle j_a \rangle + \gamma j_i(0). \quad (1.7.12)$$

Для сопоставления с классическими граничными условиями введем пока формально коэффициент  $\Gamma$  — отношение электронного тока к ионному на катоде:

$$j_e(0) = \Gamma j_i(0). \quad (1.7.13)$$

Из (1.7.11) и (1.7.13) с учетом постоянства плотности тока получим

$$\langle j_a \rangle / j = (\Gamma - \gamma) / (1 + \Gamma). \quad (1.7.14)$$

В работе [88] были рассчитаны вольтамперные характеристики катодного слоя тлеющего разряда с учетом тока автоэлектронной эмиссии на шероховатой поверхности. На рисунке 6.2 показаны эти ВАХ.

Из рисунка 6.2 ясно видно, что учет автоэмиссионных токов приводит к заметному изменению характеристик катодного слоя. В частности, вольт-

амперная характеристика  $U_c(j)$  становится падающей, то есть катодный слой оказывается неустойчивым относительно флуктуаций плотности тока.

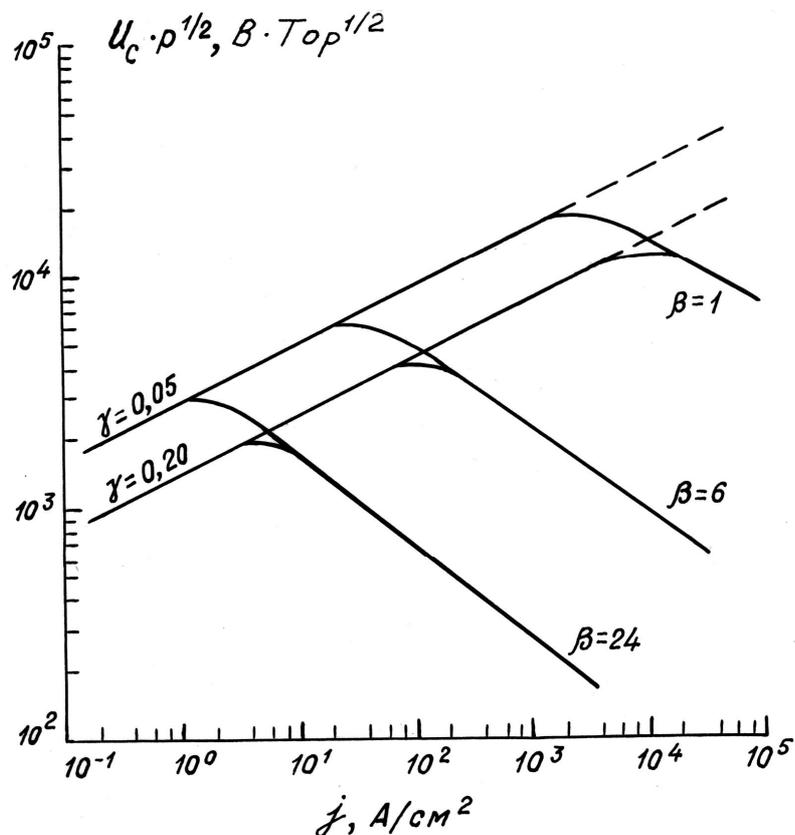


Рисунок 6.2 – Рассчитанные вольтамперные характеристики катодного слоя тлеющего разряда с учетом автоэмиссионных процессов на шероховатой катодной поверхности [88].

Возникновение такого рода неустойчивости легко пояснить с помощью рисунка 6.3. Если на фоне первоначально однородной плотности тока  $j_0$ , соответствующей падающему участку вольт-амперной характеристики, возникает случайная малая флуктуация  $j(x)$ , то в месте увеличения плотности тока (область I) происходит уменьшение катодного падения потенциала  $U_c(j)$ . Это приводит к неоднородному распределению потенциала в прикатодной плазме  $U(x)$ . Возникающая поперечная составляющая напряженности электрического поля направлена так, что абсолютное значение плотности тока на границе плазмы и катодного слоя увеличивается в области

пониженного значения потенциала (область I), то есть начальная флуктуация плотности тока увеличивается. Точно так же, случайное понижение локальной плотности тока за счет искажения потенциала приводит к дальнейшему уменьшению  $j$ . Происходит нарастающее во времени перераспределение тока по поверхности катода до тех пор, пока не начнут действовать нелинейные факторы, определяющие дальнейшее развитие системы.

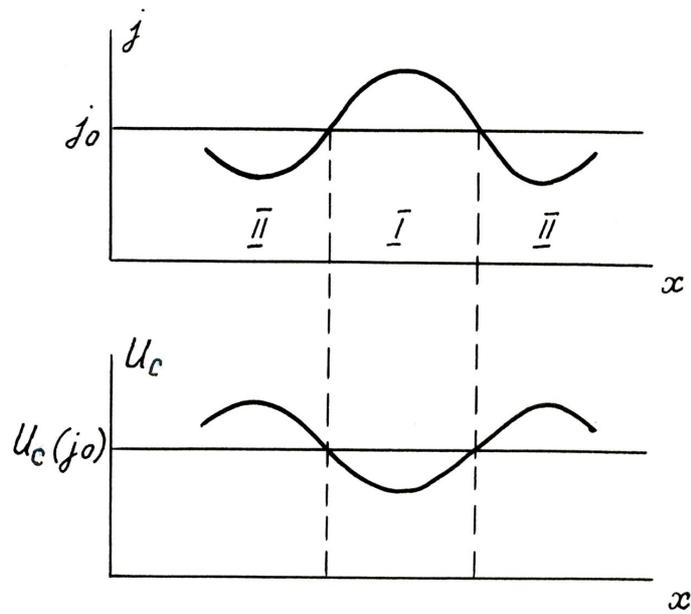


Рисунок 6.3 – Механизм нарушения однородного распределения плотности тока в катодном слое, имеющем отрицательный наклон вольтамперной характеристики.

В результате развития неустойчивости плотность тока на отдельных участках катода начинает увеличиваться. Несмотря на уменьшение при этом катодного падения потенциала, напряженность поля на катоде  $E_c$  продолжает нарастать с ростом  $j$ , хотя и медленнее, чем в отсутствии автоэмиссии. Именно это и является предпосылкой дальнейшего увеличения тока автоэмиссии и последующего перехода автоэлектронной эмиссии во взрывную.

Из графиков на рисунке 6.2 наглядно видно влияние на описываемый процесс состояния поверхности катода. Оно в предложенной модели характеризуется коэффициентом вторичной эмиссии  $\gamma$  и усредненным коэффициентом усиления электрического поля  $\beta$ . Например, для кривой  $\beta = 6$ ,  $\gamma = 0.2$ ,  $p = 100$  Тор имеем критическую плотность тока, при которой  $(\partial U / \partial j)$  меняет знак,  $j_{cr} \cong 100 \text{ А/см}^2$ , катодное падение  $U_c \cong 400 \text{ В}$ , напряженность поля на катоде  $E_c \cong 10^6 \text{ В/см}$ ,  $l_c \cong 10^{-3} \text{ см}$ . Данный случай соответствует поверхности, на которой наибольший вклад в ток автоэмиссии дают острия либо другие неоднородности с локальным коэффициентом усиления поля  $\mu_0 \cong 60$  (см. (1.7.7)). Этому значению  $\mu$  соответствует среднее расстояние между эмиссионными центрами  $\Delta l_{em} \sim 1.5 \cdot 10^{-4} \text{ см}$ , так что условие (1.7.11) выполняется.

Изменение состояния поверхности катода, то есть изменение параметра  $\beta$  в пределах, которые вполне могут иметь место при различных способах обработки поверхности, дают изменения критической плотности тока образования пятна в пределах примерно трех порядков. Плотность тока  $j_{cr}$  соответствует эффективному коэффициенту эмиссии  $\Gamma \cong 1.3\gamma$ , что хорошо согласуется с результатами работы [85], где также исследовалось влияние автоэмиссии на устойчивость катодного слоя.

### 6.3 Образование и функционирование катодного пятна

Исходя из приведенных выше расчетов, можно представить следующую качественную картину образования дугового катодного пятна.

Имеем вначале однородное распределение плотности тока по плоскому катоду, и пусть ток медленно растет во времени. На некоторых единичных микронеоднородностях, имеющих максимальные коэффициенты усиления поля, за счет протекания очень сильных автоэмиссионных токов инициируются взрывоэмиссионные центры, и возникают катодные пятна. Но при микровзрыве происходит разрушение этих неоднородностей, продукты

взрыва разлетаются, и пятна гаснут. Рельеф поверхности выравнивается, на ней “выгорают” дефекты с аномально высокими коэффициентами усиления поля.

Необходимо отметить, что изменение рельефа поверхности в газовом разряде происходит под действием многих факторов: катодного распыления, осаждения частиц металла из пара, расплавления и кристаллизации вещества на отдельных участках и т.п. Все эти факторы обычно действуют одновременно и трудно контролируемы, поэтому нестационарные процессы мы можем рассматривать лишь качественно.

По мере увеличения средней плотности тока она может превысить на каком-либо сравнительно большом участке катода критическое значение  $j_{cr}$ , когда вольтамперная характеристика катодного слоя становится падающей. Иницируется развитие неустойчивости, приводящей к быстрому нарастанию плотности тока и уменьшению катодного падения напряжения на этом участке. На участок с пониженным относительно остального пространства потенциалом будет стягиваться ток из столба разряда.

Оценим величину этого тока из следующих соображений (рисунок 6.4). Будем считать проводимость плазмы столба  $\sigma$  постоянной вне области катодного слоя.

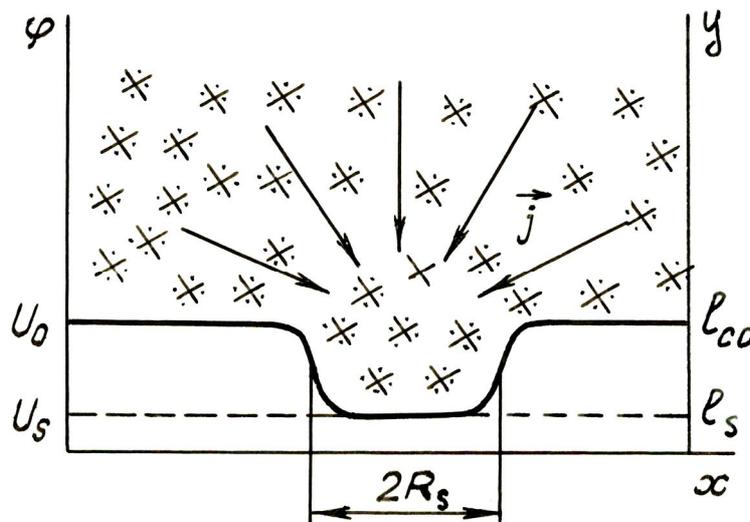


Рисунок 6.4 – Перераспределение потенциала в прикатодном слое после возникновения катодного пятна.

Катодное падение потенциала в круге радиуса  $R_s$  равно  $U_s$ , а вне этого круга —  $U_0$ . Считаем также, что линии тока сходятся к центру образующегося катодного пятна сферически симметрично. Тогда ток, стягиваемый на пятно, равен

$$I = \sigma E(r) 2\pi r^2, \quad (1.7.15)$$

где  $r$  — расстояние от центра пятна. Поскольку величина  $I$  не зависит от  $r$ , то (1.7.15) определяет функцию  $E(r)$  — возмущение напряженности электрического поля в плазме. В невозмущенной области напряженность поля считается постоянной величиной  $E_0$ .

Падение потенциала на плазме вблизи образующегося пятна будет порядка разности  $U_0 - U_s$ , так как при  $r \gg R_s$  потенциал плазмы измениться не должен. Поэтому получаем:

$$U_0 - U_s = \int_{R_s}^{\infty} E(r) dr = (I/2\pi\sigma) \int_{R_s}^{\infty} r^{-2} dr = I/(2\pi\sigma R_s).$$

Отсюда найдем величину стягиваемого на пятно тока:

$$I = 2\pi\sigma R_s(U_0 - U_s) \quad (1.7.16)$$

и оценку сверху для средней плотности тока в пятне  $j_s$ :

$$j_s = I/(\pi R_s) \leq 2\sigma U_0/R_s. \quad (1.7.17)$$

Очевидно, что радиус катодного пятна  $R_s$  не может быть меньше толщины невозмущенного катодного слоя  $l_{c0}$ . Поэтому и плотность тока в пятне  $j_s$  в соответствии с оценкой (1.7.17) будет ограничена

$$j_s \leq 2\sigma U_0/R_s \leq 2\sigma U_0/l_{c0} \sim j_0(E_{c0}/E_0), \quad (1.7.18)$$

где  $E_{c0} \cong (2U_0/l_{c0})$  — средняя напряженность электрического поля на катоде в невозмущенном слое, а  $j_0 = \sigma E_0$  — плотность тока в невозмущенном столбе разряда.

Поскольку напряженность поля в столбе примерно на два порядка меньше, чем в катодном слое, то плотность тока в катодном пятне в начальный момент приблизительно во столько же раз больше, чем в столбе. Способность плазмы столба пропускать лишь ограниченный ток, определяемый выражением (1.7.16), стабилизирует нарастание плотности тока в пятне на определенном уровне, хотя вольт-амперная характеристика слоя при этой плотности тока еще имеет отрицательный наклон. Если и после стягивания тока на пятно плотность тока автоэмиссии на локальных неоднородностях, определяемая выражением (1.7.10), не превысит критического значения  $10^8 \text{ А/см}^2$ , то возможна квазистационарная стадия катодного пятна без взрывных процессов и существенной эрозии катода.

Оценим теперь разогрев локальных участков катода автоэмиссионным током. Размер микрон неоднородностей, а значит и области усиленного поля много меньше длины свободного пробега ионов, поэтому фокусировкой ионов и разогревом таких малых участков за счет ионной бомбардировки можно пренебречь. Плотность тока с отдельного микроострия найдем из (1.7.10) и данных рис. 2.4. При  $\langle j \rangle \cong 300 \text{ А/см}^2$   $j_0 \cong 2 \cdot 10^6 \text{ А/см}^2$ . Теория автоэлектронной эмиссии указывает, что каждый эмитируемый электрон повышает энергию катода в среднем на  $2kT^*$ , где  $T^*$  — так называемая температура инверсии, определяемая равенством:

$$kT^* \sim (eh\mu_0 E_c) / [4(2m\phi)^{1/2}].$$

Для нашего случая  $\langle \varepsilon \rangle = 2kT^* \cong 0.35 \text{ эВ}$ . Характерный размер микроострия  $R \ll l_c \cong 6 \cdot 10^{-4} \text{ см}$ . Подставляя эти данные в формулу получаем  $\Delta T \leq 100 \text{ К}$ . Как видно, такой механизм разогрева микроострия не дает существенного эффекта.

После возникновения пятна начинают конкурировать процессы, ведущие с одной стороны к погасанию пятна, а с другой — к увеличению плотности тока в нем. К первым можно отнести вытеснение газа из области повышенного энерговыделения, поскольку это увеличивает  $U_c$ ; расплавление

и сглаживание шероховатостей на катоде, уменьшающее усиление поля и т.п. Ко вторым - рост неоднородностей за счет пондеромоторных сил, кристаллизации и т.п. процессов, приводящих к увеличению усиления поля; испарение легкоионизируемых атомов материала катода, приводящее к усилению ионизационных процессов в катодном слое; и наконец, увеличение проводимости плазмы столба перед катодным пятном, которое может иметь место при повышении на  $\Delta E U_c/R_s$  напряженности поля в этом месте.

Все эти процессы имеют разные характерные времена и поэтому верх берет то одна, то другая тенденция, что приводит к периодическим зажиганиям и погасаниям пятна. Особенно это относится к области параметров разряда, близких к критическим, при переходе от однородного слоя к дуговому. Такие пульсации часто наблюдаются в экспериментах [3,5].

Из проведенного анализа ясно, что средняя плотность тока в столбе  $j$  определяет не только процесс зажигания преддугового и дугового катодного пятна, но и характер последующего горения разряда. Так, если  $j$  достаточно высока, и следовательно на пятно с самого начала его существования стягивается большой ток, то оно горит устойчиво. Дальше происходит постепенное нарастание проводимости прикатодной плазмы, что в экспериментах наблюдается как диффузное свечение перед пятном.

## **7 Разработка численно-аналитической модели процессов возникновения дуговых разрядов в бортовом оборудовании в условиях космического пространства.**

### **7.1 Формулировка математической модели**

Как уже упоминалось ранее, в качестве основной физической модели, которая используется для анализа предложенных конфигураций материальных шин и элементов печатного монтажа, была выбрана так называемая дрейфово-диффузионная модель. Она описывает перенос

заряженных частиц в слабоионизованной многокомпонентной плазме разряда без решения полной системы уравнений Больцмана и Пуассона для функции распределения и электрического потенциала. Модель с дрейфово-диффузионным приближением позволяет получать мгновенные распределения концентраций заряженных частиц и электрического поля, которые являются результатом решения соответствующих уравнений переноса и уравнения Пуассона.

Исходя из экспериментальных данных, делается априорное предположение о форме функции распределения электронов по энергиям. Она имеет вид, отличный от максвелловского

$$f(\varepsilon) = 2\varphi \frac{\Gamma(5/4)^{\frac{3}{2}}}{\Gamma(3/4)^{\frac{5}{2}}} \exp\left(-\left(\frac{\varepsilon\Gamma(5/4)}{\varphi\Gamma(3/4)}\right)^2\right), \quad (1.8.1)$$

также известный как распределение Дрювестейна.

Благодаря выбору функции распределения, для описания динамики электронов в разряде можно перейти от системы уравнений Больцмана для электронной функции распределения к системе двух уравнений непрерывности для концентрации  $n_e$  и плотности энергии электронов  $n_\varepsilon$

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{\Gamma}_e &= R_e \\ \frac{\partial n_\varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{\Gamma}_\varepsilon + \vec{E} \cdot \vec{\Gamma}_e &= R_\varepsilon \end{aligned}, \quad (1.8.2)$$

где потоки концентрации и плотности энергии электронов соответственно записаны в дрейфово-диффузионном приближении

$$\begin{aligned} \vec{\Gamma}_e &= -\mu_e n_e \vec{E} - D_e \nabla n_e \\ \vec{\Gamma}_\varepsilon &= -\mu_\varepsilon n_\varepsilon \vec{E} - D_\varepsilon \nabla n_\varepsilon \end{aligned}. \quad (1.8.3)$$

Соответствующие постоянные подвижности и диффузии определяются из следующих выражений за исключением подвижности электронов  $\mu_e$ , которая задаётся на основании экспериментальных данных

$$D_e = \mu_e T_e, \quad \mu_\varepsilon = \frac{5}{3} \mu_e, \quad D_\varepsilon = \mu_\varepsilon T_e, \quad T_e = \frac{2}{3} \bar{\varepsilon}, \quad (1.8.4)$$

где  $\bar{\varepsilon} = n_\varepsilon / n_e$  - распределение средней энергии в данный момент времени, вычисляемое согласованно с решением уравнений.

Система уравнений непрерывности для электронов (1.8.2) в правой части содержит члены, описывающие источники частиц. В уравнении непрерывности электронов слагаемое  $R_e$  описывает рождение частиц в результате процессов ударной ионизации. В нашем случае использовано представление источника в виде интегрального члена от экспериментальной зависимости сечения ионизации  $\sigma_i$

$$R_e = N n_e \sqrt{\frac{2q}{m_e}} \int_0^\infty \varepsilon \sigma_i(\varepsilon) f(\varepsilon) d\varepsilon, \quad (1.8.5)$$

где  $N$  – концентрация нейтральных молекул, определяемая из уравнения состояния газа.

Член источника в уравнении непрерывности плотности энергии включает в себя два слагаемых: первое описывает потери энергии в результате упругих соударений, а второе описывает потери в процессах ударной ионизации

$$R_\varepsilon = N n_e \Delta \varepsilon_i \sqrt{\frac{2q}{m_e}} \int_0^\infty \varepsilon \sigma_i(\varepsilon) f(\varepsilon) d\varepsilon + N n_e \Delta \varepsilon_e \sqrt{\frac{2q}{m_e}} \int_0^\infty \varepsilon \sigma_e(\varepsilon) f(\varepsilon) d\varepsilon, \quad (1.8.6)$$

где  $\Delta \varepsilon$  - потеря энергии в результате реакции.

Ионная составляющая плазмы в данной модели описывается уравнением непрерывности с источником (1.8.5). В более общем случае, когда плазма состоит из нескольких видов ионов, для каждого иона модель дополняется соответствующим уравнением непрерывности

$$\rho \frac{\partial \omega_k}{\partial t} = \nabla \left( \rho \omega_k \vec{V}_k \right) + R_k, \quad (1.8.7)$$

где  $\omega_k$  – массовая доля ионной компоненты с номером  $k$ ,  $\rho$  - общая плотность ионов,  $R_k$  – источник ионов,  $V_k$  – многокомпонентная скорость диффузии.

Для согласованного учёта влияния электрического поля математическая модель дополняется уравнением Пуассона для электростатического потенциала  $V$ .

$$\Delta V = -\frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (1.8.8)$$

где  $\rho$  - объёмный заряд, определяемый для многокомпонентной плазмы выражением

$$\rho = q \left( \sum_{k=1}^N Z_k n_k - n_e \right), \quad (1.8.9)$$

где  $n_k$  – концентрация ионов с зарядом ядра  $Z_k$ .

Полученная система уравнений является замкнутой и самосогласованной системой дифференциальных уравнений с частными производными относительно зависимых переменных  $n_e$ ,  $n_s$ ,  $n_k$  и  $V$ . Данная математическая модель существенно проще модели, требующей совместного решения уравнений Больцмана и Пуассона. Однако и она, в зависимости от выбранного газа разряда система может состоять из большого числа уравнений, численное решение которых крайне затруднительно. Рассматривая в качестве рабочего газа аргон, можно свести количество уравнений модели к четырём. При необходимости более точного описания разряда возможно учесть процессы возбуждения нейтральных атомов электронным ударом, тогда потребуется добавить к четырём имеющимся уравнениям пятое, а во втором уравнении (1.8.2) учесть потери энергии электронов на возбуждение. Допустимо также использовать приближение, в

котором средняя энергия электронов фиксируется – и тогда отпадает необходимость в решении уравнения непрерывности для плотности энергии в (1.8.2).

Для аргона во всех дальнейших вычислениях использовались сечения упругих процессов рассеяния (в  $\text{м}^2$  от эВ), представленные на рисунке 7.1 и рисунке 7.2.

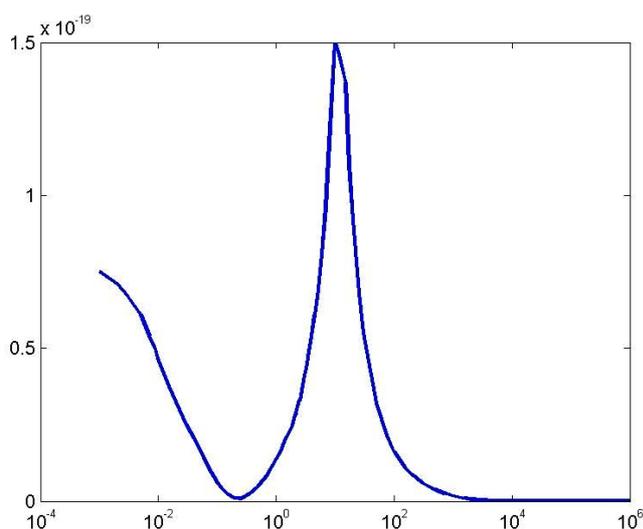


Рисунок 7.1 – Зависимость сечения упругих столкновений электронов с нейтральными атомами аргона от энергии электронов и сечение ионизации нейтральных атомов электронным ударом (в  $\text{м}^2$  от эВ).

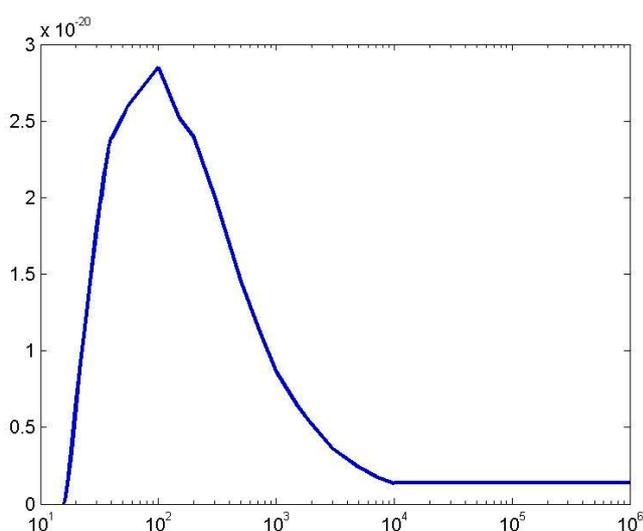


Рисунок 7.2 – Зависимость сечения ионизации атомов аргона от энергии электрона (в  $\text{м}^2$  от эВ).

Система уравнений модели дополнялась соответствующими уравнениями для электрической цепи, содержащей идеальный источник напряжения, разрядный промежуток, описываемый вышеуказанными уравнениями, и балластное сопротивление.

## 7.2 Граничные условия для математической модели

Выбор граничных условий в рассматриваемых двумерных моделях немаловажен ввиду того, что сходимость численных расчётов напрямую зависит от того, насколько правильно заданы граничные значения распределения полей концентрации и напряжённости. С точки зрения корректности физического обоснования выбора тех или иных условий наиболее целесообразным является формулировка в терминах граничных значений потоков (1.8.2). Граничные условия можно формально разделить на три группы: условия для потоков электронов и ионов на электродах, аналогичные условия на стенках разрядной камеры и граничные условия для электрического поля (потенциала).

Условия первой группы являются необходимыми для самоподдержания разряда, который может возникать в ряде физических ситуаций. Здесь основную роль играют процессы вторичной эмиссии электронов с катода, которые характеризуются параметром вторичной эмиссии  $\gamma$ . В рамках сформулированной выше модели, вторичная эмиссия на поверхности катода описывается следующими уравнениями

$$\begin{aligned} \vec{n} \Gamma_e &= \gamma \Gamma_i \vec{n} \\ \vec{n} \Gamma_e &= \gamma \bar{\varepsilon} \Gamma_i \vec{n} \end{aligned} \quad (1.8.10)$$

где  $\bar{\varepsilon}$  - средняя энергия эмитированного электрона.

На поверхности анода потоки электронов в точности равны соответствующим локальным дрейфовым значениям

$$\begin{aligned} \vec{n} \vec{\Gamma}_e &= -\mu_e n_e \vec{E} n \\ \vec{n} \vec{\Gamma}_e &= -\mu_e n_e \vec{E} n \end{aligned} \quad (1.8.11)$$

Для ионов на поверхностях электродов формулируется условие рекомбинации, которое заключается в обнулении концентраций ионов с последующим пересчётом количества нейтральных атомов.

Ещё одним важнейшим граничным условием на поверхности катода, которое будет включено в ряд рассматриваемых здесь моделей разряда является автоэмиссия. С практической точки зрения, введение в описание модели автоэмиссионного тока позволяет учитывать наличие микроскопических неоднородностей на катоде. Данные неоднородности, ввиду их малых линейных размеров, фактически невозможно смоделировать в виде особенностей геометрии разрядной камеры, однако их можно описывать при помощи эффективного безразмерного параметра  $\beta$ , задающего шероховатость катода. Полное выражение для нормальной компоненты тока автоэмиссии с катода даётся теоретическим выражением (1.7.9), которое применительной к математической модели запишем в виде эмпирического выражения для плотности потока автоэлектронов в ( $1/(\text{см}^2 \text{ с})$ ):

$$\vec{n} \vec{\Gamma}_{e,a} = 2,1 \cdot 10^{30} \left( \frac{\beta E}{6,5 \cdot 10^8} \right)^{3/4} \exp \left( -\sqrt{\frac{2,6 \cdot 10^9}{\beta E}} \right), \quad (1.8.12)$$

где  $E$  – локальное значение модуля электрического поля.

На геометрических поверхностях, отличных от электродов также, в зависимости от моделируемой физической ситуации вводятся граничные условия рекомбинации ионов и вторичной эмиссии электронов. Здесь следует особо отметить, что коэффициенты вторичной эмиссии на поверхностях диэлектрических элементов печатного монтажа (например, текстолита) существенно превышают аналогичные значения для катода. Вторичная эмиссия в таком случае вводится в качестве своеобразного

приближения, позволяющего моделировать поверхностные процессы без точного указания химических реакций, протекающих в реальных условиях.

Граничными условиями третьей группы являются условия Дирихле и Неймана для уравнения Пуассона. На эквипотенциальных поверхностях катода и анода задаются стационарные электрические потенциалы (условия Дирихле), определяемые из соответствующих уравнений Кирхгоффа

$$\begin{aligned} V_K &= 0 \\ V_A &= V_0 + IR_0 \end{aligned} \quad (1.8.13)$$

где  $V_0$  – постоянное напряжение идеализированного источника напряжения,  $R_0$  – значение балластного сопротивления в цепи,  $I$  – ток разряда, определяемый как среднее интегральное значение от суммы токов проводимости, диффузии и электрического смещения по всему разрядному промежутку.

Стенки разрядной камеры, а также поверхности диэлектрических элементов печатного монтажа, рассматриваемые в данной постановке задачи, являются границами, на которых аккумулируется поверхностный заряд ионов и электронов  $\rho_s$ . Его величина определяется решением граничного обыкновенного дифференциального уравнения

$$\frac{d\rho_s}{dt} = n\vec{\Gamma}_e + n\vec{\Gamma}_i \quad (1.8.14)$$

и учитывается в составе полного объёмного заряда частиц, входящих в правую часть уравнения (1.8.8), для чего найденное значение  $\rho_s$  выступает в качестве согласованного параметра условия Неймана для уравнения Пуассона

$$-n\vec{D} = \rho_s, \quad (1.8.15)$$

где  $D$  – вектор электрического смещения.

## **8 Разработка алгоритмов для программной реализации численно-аналитической модели процессов возникновения дуговых разрядов в бортовом оборудовании в условиях космического пространства.**

Технически, суть метода заключается в сведении системы дифференциальных уравнений в частных производных, в том числе и содержащих интегральные слагаемые, к системе линейных алгебраических уравнений с её последующим решением высокопроизводительными методами вычислительной линейной алгебры. Для этого область, в которой ищется решение дифференциальных уравнений, разбивается на конечное количество подобластей (элементов). В каждом из элементов произвольно выбирается вид аппроксимирующей функции. В простейшем случае - это полином первой степени. Вне своего элемента аппроксимирующая функция точно равна нулю. Значения функций на границах элементов (узлах) являются решением задачи и заранее неизвестны. Коэффициенты аппроксимирующих функций обычно ищутся из условия равенства значения соседних функций на границах между элементами (в узлах). Затем эти коэффициенты выражаются через значения функций в узлах элементов. Составляется система линейных алгебраических уравнений. Количество уравнений равно количеству неизвестных значений в узлах, на которых ищется решение исходной системы, прямо пропорционально количеству элементов и ограничивается только возможностями вычислительной техники. Так как каждый из элементов связан с ограниченным количеством соседних, система линейных алгебраических уравнений имеет разрежённый вид, что существенно упрощает её решение. Нестационарный метод конечных элементов представляет собой последовательное повторение выше описанной процедуры для всех значений временной переменной в рамках рассматриваемого интервала.

Точность численного решения того или иного уравнения определяется пространственным и временным разрешением метода. Пространственное разрешение напрямую зависит от используемого количества конечных

элементов и формы разбиения счётного пространства. Данные факторы оказывают решающее влияние на точность представляемых результатов. Например, для адекватного описания приэлектродных областей тлеющего разряда, характерный размер конечного элемента должен быть существенно меньше протяжённости соответствующей физической области. Среда COMSOL Multiphysics даёт широкий выбор вариантов разбиения рабочего объёма на конечные элементы, что принципиально позволяет добиваться требуемого пространственного разрешения. Временное разрешение метода определяется значением максимального отклонения решения на последующем временном шаге от решения на предыдущем. В случаях, когда относительная или абсолютная ошибка слишком велика, решатель возвращается к предыдущему шагу и уменьшает временной шаг настолько, чтобы отклонение соответствовало бы требуемому значению. Неконтролируемое отклонение для минимально возможных временных шагов свидетельствует о расходимости решений уравнений.

Моделирование газовых разрядов осуществляется при помощи расширения среды COMSOL Multiphysics – Plasma. Данный модуль системы представляет собой программный пакет для решения системы уравнений (1.8.2) – (1.8.10) с упрощённым представлением входных параметров, начальных и граничных условий модели. Несмотря на то, что базовые возможности COMSOL позволяют, вообще говоря, решать практически произвольные системы интегро-дифференциальных уравнений в частных производных, в модуле Plasma реализованы дополнительные возможности для внутренней стабилизации и регуляризации получаемых решений с учётом специфики проблем вычислительной физики плазмы.

В общих чертах этапы моделирование разряда в модуле Plasma можно представить в виде следующей блок-схемы (рисунок 8.1), иллюстрирующей последовательность действий при работе с пакетом:

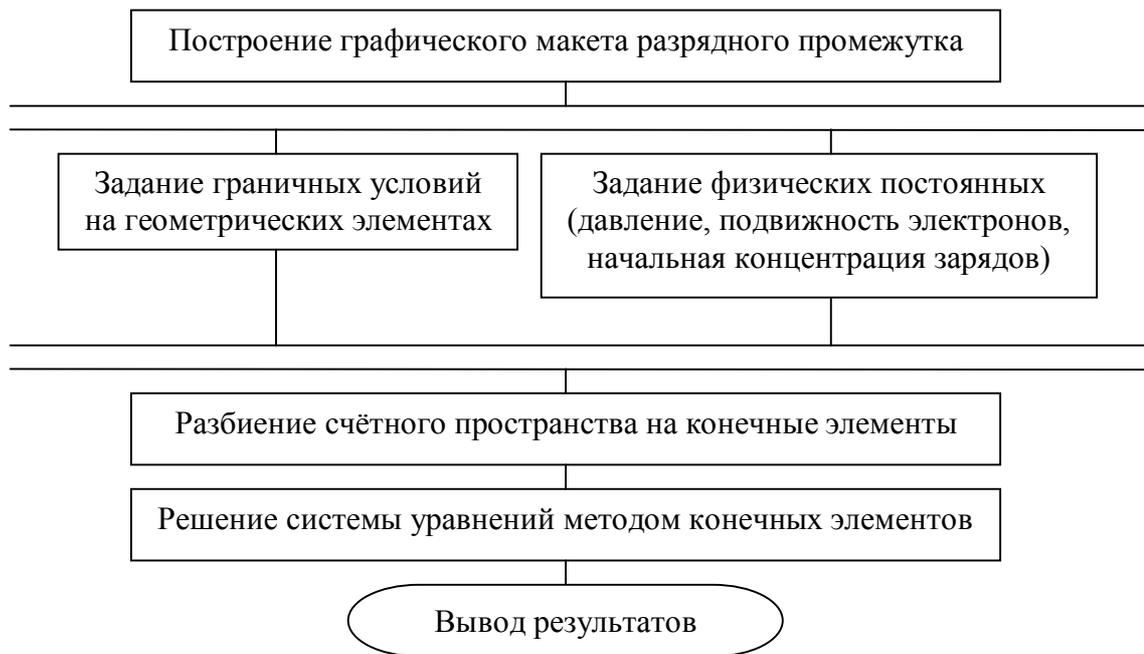


Рисунок 8.1 – Блок-схема последовательности действий при моделировании.

Более подробно алгоритм решения системы уравнений можно представить следующей схемой (рисунок 8.2), которая отражает последовательность действий нестационарного решателя на каждом шаге итераций.

Компоненты модуля Plasma соответствуют трём составляющим математической модели: уравнениям, описывающим динамику электронов, уравнению Пуассона и уравнениям, описывающим «тяжелые» компоненты разряда. Корректность включения того или иного компонента, например, определённого типа реакций (возбуждения, прилипания и пр.) контролируется автоматически до начала стадии решения. Непротиворечивость задания граничных условий также проверяется на данном этапе.

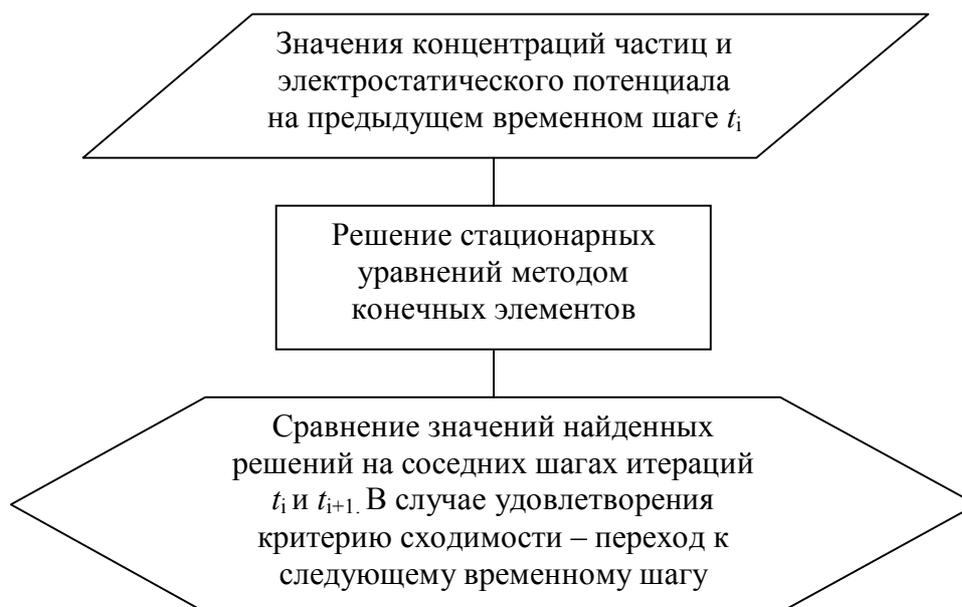


Рисунок 8.2 – Блок-схема работы программы на каждом шаге итерации.

Основное машинное время занимает процесс пошагового решения, в процессе которого пользователь среды может либо проверять сходимость, отражаемую графиком зависимости относительной ошибки метода от величины внутреннего временного шага, либо, также в режиме реального времени, наблюдать вывод одного из решений системы уравнений на каждом удачном шаге решателя. После окончания расчётов становится возможным получить распределение всех искомых функций для заданных моментов времени. Среда COMSOL Multiphysics представляет широкие возможности для постпроцессинга и графического отображения данных, полученных в ходе численного решения.

## **9 Обоснование выбора приложения для программной реализации численно-аналитической модели процессов возникновения дуговых разрядов в бортовом оборудовании в условиях космического пространства.**

В качестве инструмента численного решения системы дифференциальных уравнений в частных производных для данной модели использовалась программная среда COMSOL Multiphysics, обеспечивающая все этапы

моделирования, включая определение геометрических параметров, описание уравнений и надлежащую визуализацию результатов. COMSOL Multiphysics позволяет моделировать многие физические процессы, которые могут быть представлены в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных. С позиций вычислительной физики и теории численных методов, ядро COMSOL представляет собой набор алгоритмов, реализующих нестационарный метод конечных элементов.

Помимо среды COMSOL Multiphysics, реализующей алгоритмы конечно-элементных вычислений, существует целый ряд пакетов также предназначенных для численных расчётов в рамках данного метода. Подобные среды, как правило, содержат в своём составе геометрический модуль или модуль преобразования имеющейся CAD модели в текущий формат пакета, модуль построения конечно-элементного разбиения счётного пространства и высокопроизводительный решатель получившейся системы алгебраических уравнений. Примерами аналогов COMSOL Multiphysics являются коммерческие пакеты ANSYS, HFSS, ADINA, Abaqus FEA, а также целый ряд некоммерческих свободно-распространяемых пакетов, таких как Elmer, Impact, MaxFEM и т.д. Расчёты во всех выше перечисленных пакетах осуществляется аналогично COMSOL. Вычисления осуществляются в соответствии с пользовательской программой (скриптом), который описывает математическую модель, набор начальных и граничных условий, и геометрию рассматриваемой системы. Встроенный решатель анализирует сходимость, математическую полноту и согласованность модели, а затем производит численные расчёты в указанных временных рамках. Из имеющегося разнообразия программных продуктов выбор в пользу среды COMSOL Multiphysics был сделан по совокупности причины, на описании которых следует остановиться более подробно.

Известно, что метод конечных элементов обладает большой универсальностью, которая позволяет решать практически любые системы дифференциальных и интегро-дифференциальных уравнений в частных

производных в неоднородной геометрии со сложными граничными условиями. Однако этот факт не гарантирует, что решение может быть получено только при соблюдении внутренней непротиворечивости математической модели. Одни и те же дифференциальные уравнения при вариации параметров могут описывать различные процессы, численное моделирование которых требует специфических методов в рамках общего подхода. Например, уравнение Навье-Стокса, может описывать как ламинарное, так и турбулентное течение жидкости. Подходы к численному решению уравнения Навье-Стокса для обоих случаев существенно различаются на уровне применяемых алгоритмов. Расчётные подпрограммы, дополняющие метод конечных элементов для конкретного физического приложения объединены разработчиками среды COMSOL Multiphysics в модули, облегчающие моделирование с точки зрения конечного пользователя продукта. Функции модуля, например используемого в данной работе Plasma Module, не только адаптируют общий метод решения, но и позволяют сформулировать граничные условия в терминах описываемого процесса. Особое внимание уделяется выбору внутренних технических условий, кардинально улучшающих сходимость общего метода: специфическому сгущению конечно-элементной сетки, коррекции членов источников, регуляризации значений поля вблизи точечных неоднородностей и пр.

Ряд коммерческих продуктов, например ANSYS, также имеют модульную систему, интегрируемую в общую среду разработки и моделирования мультифизических проблем. В данном случае определяющую роль играет отсутствие в ANSYS и ему подобных пакетах модуля, реализующего физическую модель слабоионизованной плазмы в электромагнитном поле. Следует признать, что COMSOL Multiphysics на сегодняшний день является единственным программным комплексом, содержащим подобный модуль. Функционал модуля, работающего в рамках дрейфово-диффузионного приближения, не ограничен ничем кроме аппаратных требований, которые значительно возрастают при усложнении рабочей модели. Возможности

визуализации результатов расчёта на каждом шаге итераций позволяют наблюдать как за соблюдением формальных критериев сходимости решений, так и делать промежуточные выводы об адекватности конкретной модели рассматриваемой ситуации.

В-целом, можно отметить, что в подавляющем большинстве пакетов, реализующих конечно-элементный метод, изначально преобладает концепция инженерно-ориентированных расчётов. Суть её заключается в том, что математическая модель (уравнения, граничные и начальные условия) процессов скрываются от пользователя. Управление расчётами сводится к изменению физических параметров в интерактивном режиме. В данном отношении среда COMSOL Multiphysics больше пригодна для решения научно-исследовательских задач, так как содержит точные математические формулировки, отражаемые для каждого модуля в отдельности. Системы с открытым кодом, такие как Elmer и OpenFEM, также не выдерживают конкуренции из-за отсутствия в их составе примитивных возможностей построения геометрии модели и средств визуализации конечных результатов.

Среди недостатков COMSOL Multiphysics следует отметить высокую рыночную стоимость пакета, относительно низкую производительность модуля вычислений Plasma по сравнению с другими модулями, не используемыми в данной работе, повышенные требования к объёму оперативной памяти, установленной в системе и закрытость исходного кода интерпретатора. Перечисленные недостатки, тем не менее, компенсируются расширенной функциональностью создаваемых физических моделей и возможностями визуализации результатов.

## **10 Обоснование и выбор задач для численно-аналитического моделирования процессов возникновения дуговых разрядов в бортовом оборудовании в условиях космического пространства.**

Дуговой разряд обычно является заключительной стадией развития электрического пробоя между двумя проводниками, между которыми за счет источников питания бортовой аппаратуры поддерживается некоторая разность потенциалов. Поэтому «узкими местами» конструкции, в которых могут происходить пробои газонаполненного промежутка, являются близко расположенные металлические проводники электрической аппаратуры. Это могут быть как изолированные от подложки свободно подвешенные металлические шины, так и проводники печатного монтажа, закрепленные на диэлектрическом корпусе. В связи с этим предполагается моделировать обе эти ситуации.

Наиболее трудным этапом численного моделирования является разработка программы, позволяющей просчитать нестационарную задачу развития электрического разряда, начиная от непроводящего состояния газовой среды и заканчивая необратимыми изменениями в конструкции аппаратуры. В рамках одной задачи сделать это пока не представляется возможным, поэтому на данном этапе было решено ограничиться лишь «газоразрядным» процессом, не учитывающим последующие изменения состояния электродов (деформацию формы, отслоение, плавление, испарение и т.п.) и заполняющей промежуток среды (десорбция газа с поверхностей электродов и диэлектриков, изменение химического состава газа в промежутке и т.п.). На последующих этапах работы, конечно же, желательно промоделировать и эти эффекты.

Таким образом, предполагается ограничиться следующей постановкой задачи для численно-аналитического моделирования: задание исходных параметров задачи по пробую коротких газонаполненных промежутков, задание пространственной геометрии газоразрядной системы в месте наибольшего сближения токонесущих элементов, получение

пространственно-временной эволюции плазмы в промежутке от первоначально непроводящего до квазистационарного электрически проводящего состояния.

Исходные параметры задачи:

1) Давление газовой среды. Этот параметр предполагается изменять в самых широких пределах, так как в условиях работы аппаратуры в космическом пространстве давление может меняться от близкого к атмосферному (при повышенном газовыделении или испарении материалов при нагреве аппарата) до высокого вакуума. Но известно, что вакуум – это понятие относительное, зависящее от размеров конструкции и решаемых задач. Для нашего случая вакуумом будем считать такое давление газовой среды, при котором длина свободного пробега атомных частиц (электронов и ионов) становится большей, чем длина межэлектродного зазора. Для промежутков миллиметровой длины такие давления имеют порядок 1 Па и ниже. Поэтому задание давление газа ниже 1 Па может не иметь эффекта в иницировании дуги.

2) Сорт модельного газа. В реальных условиях космического пространства этот параметр может меняться в самом широком диапазоне: от чистого водорода солнечного ветра, до сложного состава газового шлейфа самого космического аппарата. Обычно для моделирования выбирают наиболее изученный сорт газа, чтобы можно было получить параметры всех «элементарных процессов» – сечения упругих и неупругих столкновений, система энергетических состояний атомов и ионов. Мы выбрали в качестве модельного газа аргон, потому что для него имеется полный набор исходных зависимостей – сечение упругого столкновения и сечение ионизации электронным ударом.

3) Геометрия разрядного промежутка. Здесь для моделирования был выбран класс двумерных задач, которые позволяют моделировать неоднородную геометрию электрических полей и в то же время сильно ускоряют численные расчеты. В этом отношении одномерная геометрия

чрезмерно проста для моделирования реальных систем, а трехмерная геометрия не позволяет реализовать сколько-нибудь подробное численное моделирование газового разряда без привлечения дорогих и малодоступных суперкомпьютеров.

4) Форма электродов. Газоразрядные промежутки состоят из двух или нескольких протяжённых параллельных металлических проводников, один из которых заземлён, а на другом поддерживается постоянный электрический потенциал в диапазоне 100-1000 Вольт. Величина минимального промежутка между проводниками устанавливается равной нескольким миллиметрам. Толщина шин (проводников) для моделирования не имеет значения.

Указанный класс двумерных задач включает в себя большое число различных рабочих конфигураций материальных шин различного взаимного расположения. Некоторые из них показаны на рисунках 5.1 и 5.2.

5) Выходные данные. В качестве конечного результата моделирования предлагается сформировать массивы двумерных пространственных распределений электрического потенциала, концентрации ионов и электронов в межэлектродном промежутке, описывающих временную эволюцию развития пробоя. Из этих данных можно извлечь и более компактную информацию: зависимости тока разряда и напряжения его горения от времени, время перехода разряда в дуговую стадию.

Главным результатом численно-аналитического моделирования должны стать области исходных параметров, при которых возможен или невозможен переход пробоя газонаполненного промежутка в дуговую форму разряда.

В соответствии с этими задачами предполагается сделать три программных модуля: модуль входных данных, модуль задания геометрии системы и модуль выходных данных.

## **11 Разработка программной реализации разработанных алгоритмов, используемых для численно-аналитического моделирования процессов возникновения дуговых разрядов в бортовом оборудовании в условиях космического пространства.**

Для определённости среди возможных конфигураций была выбрана конфигурация (д) на рисунке 5.2. Исходя из того, что электроды эквипотенциальны и непроницаемы для частиц, расчётное пространство можно ограничить внутренними поверхностями катода и анода соответственно. На рисунке 11.1 представлен геометрический эквивалент расчётной области для конфигурации (д). Здесь катод в поперечном сечении шины обозначен перпендикулярными отрезками прямых 1, анод – отрезками 2 и стенки разрядной камеры 3 получены путём соединения кромок катода и анода. Ближайшее расстояние между электродами вводится в качестве одного из основных параметров задачи –  $d$ .

Рассмотрим граничные условия для системы дифференциальных уравнений модели, которые применяются при моделировании газового разряда между проводниками материальных шин. Катод (1) и анод (2) являются поверхностями с заданными постоянными электрических потенциалами, равными нулю и  $V_0$  соответственно. Ещё одним важным параметром задачи, определённым в условии (1.8.13), является значение балластного сопротивления  $R_0 = 1$  Ом. Полный ток разряда вычисляется модулем Plasma автоматически путём интегрирования по поверхности электродов полной плотности тока на каждом временном шаге. Интегрирование осуществляется численным методом Ньютона-Котеса, порядок которого варьируется на неоднородной сетке в зависимости от задаваемой точности расчётов. Электростатические условия на стенках разрядной камеры (граница поля 3 на рисунке 11.1) сформулированы согласно (1.8.14)–(1.8.15).

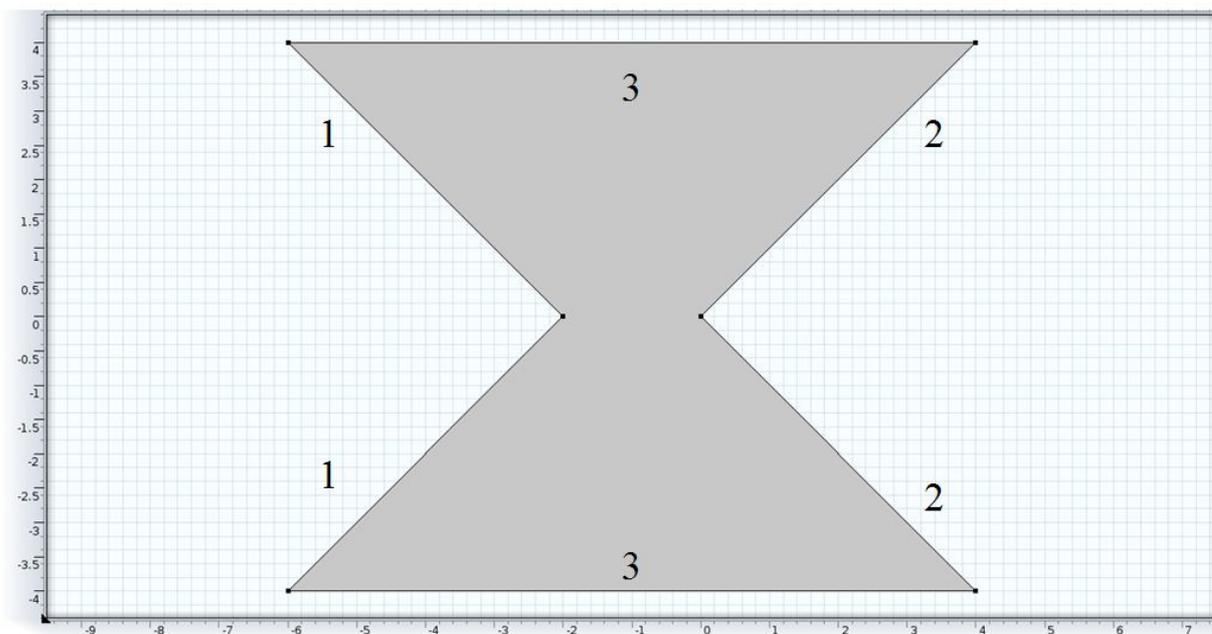


Рисунок 11.1 – Расчётная область для конфигурации, показанной на рисунке 5.2,д.

Для потоков ионов и электронов на поверхности катода применяются условия вторичной эмиссии (1.8.10), где константа вторичной эмиссии является задаваемым параметром  $\gamma$ . Условия для анода также налагаются в полном соответствии с выражениями (1.8.11). Для стенок разрядной камеры также требуется задавать граничные условия, так как математическая формулировка модели не допускает формулировку границ. С этой целью для потоков электронов и плотности энергии электронов применяются условия изоляции

$$\begin{aligned} \vec{n} \vec{\Gamma}_e &= 0 \\ \vec{n} \vec{\Gamma}_\varepsilon &= 0 \end{aligned} \quad (1.12.1)$$

а для ионов – условия рекомбинации.

Начальные условия задаются в виде однородного распределения концентрации электронов  $n_0$ . Также требуется задать начальное среднее значение энергии электронов и начальное распределение потенциала. Данные значения здесь и далее во всех расчётах принимаются одинаковыми: средняя энергия - 2 эВ, потенциал – нулевой. Начальная концентрация

нейтральных атомов аргона рассчитывается автоматически исходя из фиксированных параметров давления  $p_0$  и температуры 300 К. Кроме того считается, что в начальный момент концентрация ионов равна нулю.

После однозначного задания геометрических размеров, начальных и граничных условий задачи, следуя общим принципам метода конечных элементов, необходимо определить разбиение расчётной области на конечные элементы. В среде COMSOL Multiphysics типичным методом разбиения является триангуляция Делоне, которая осуществляется с учётом специфики задач физики плазмы. В частности, построение конечноэлементной сетки должно удовлетворять следующему критерию - минимальный размер элемента выбирается значительно меньше характерных радиусов Дебая в условиях формирования пробоя. Кроме того, хорошее пространственное разрешение обеспечивается путём равномерного сгущения сетки вблизи любых геометрических неоднородностей и границ счётной области. Также в расчётах используется дополнительная возможность, которая существенно увеличивает разрешение метода – граничные слои – набор конечных элементов специальной формы вблизи границ. Возможности среды COMSOL для адаптивной подстройки вычислительной сетки не применялись. На рисунке 11.2 схематически изображён пример корректного разбиения моделируемой области, выполняемый в COMSOL Multiphysics с использованием стандартных встроенных шаблонов.

Теперь мы имеем все необходимые данные для того чтобы можно было моделировать электроразрядные процессы, которые могут протекать в бортовом оборудовании космического аппарата.

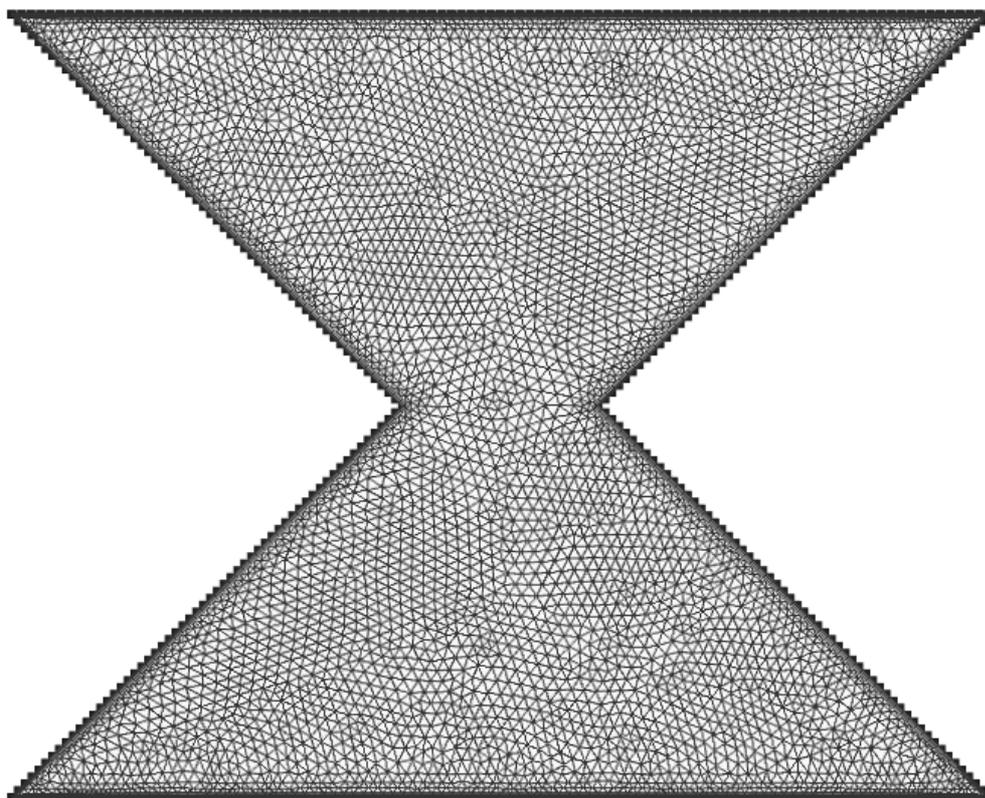


Рисунок 11.2 – Представление области расчёта в виде конечно-элементного разбиения.

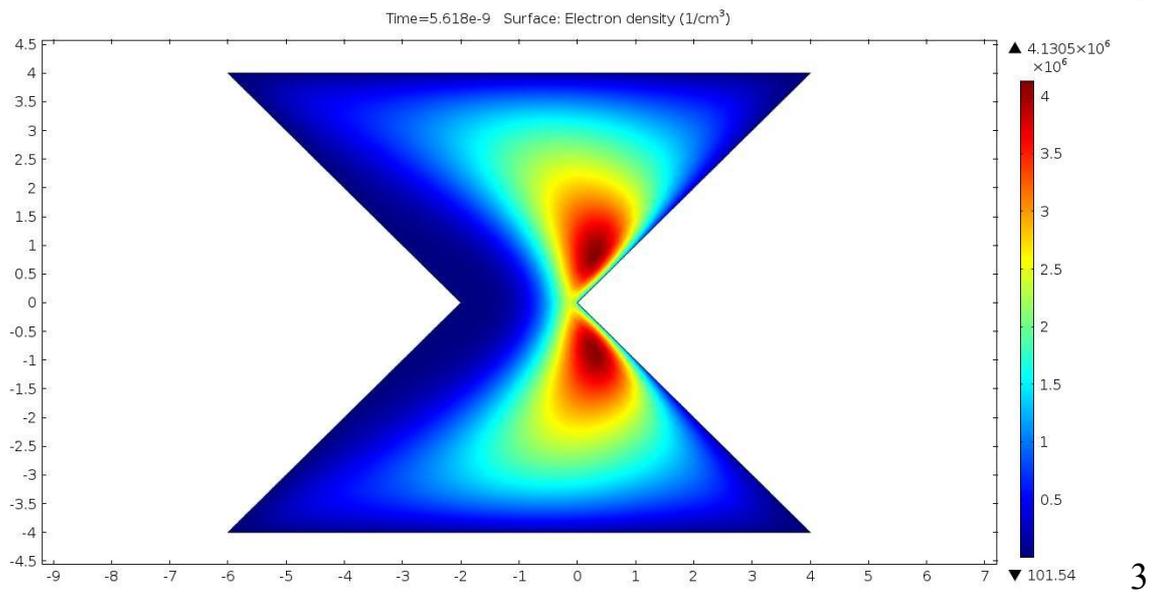
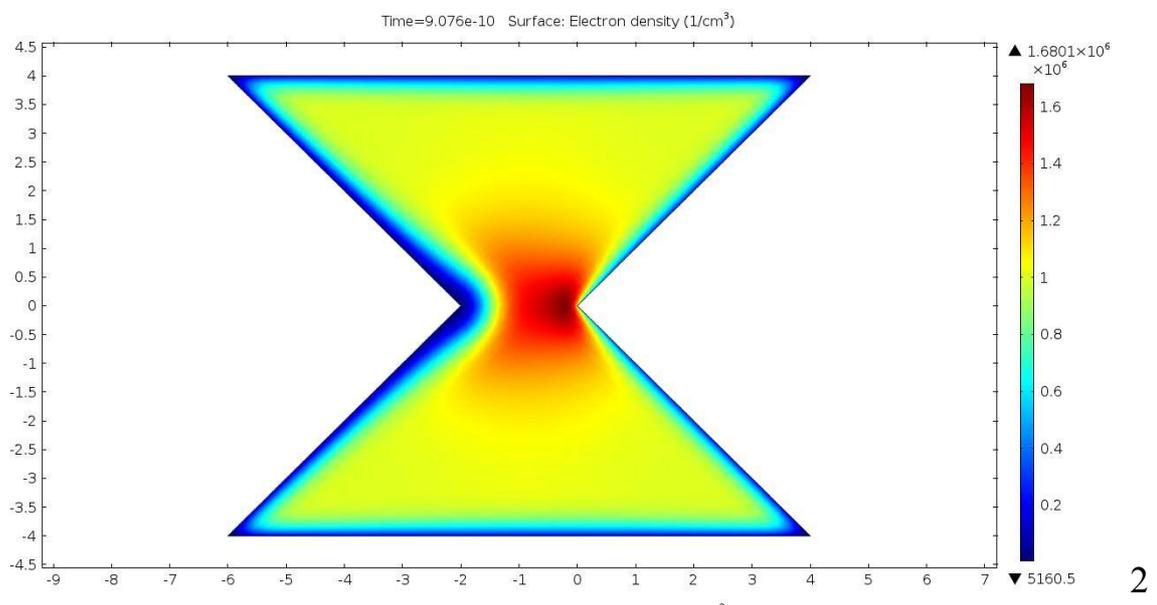
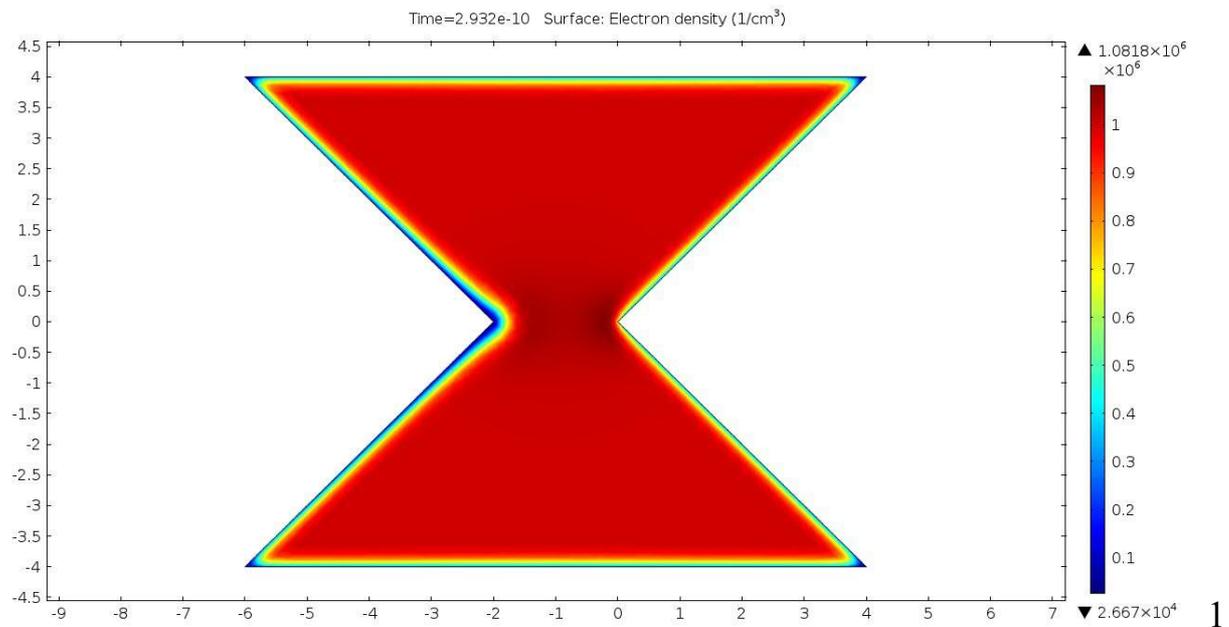
После того, как выбран метод и форма разбиения рабочей области расчётов на конечные элементы, производится расчёт в результате которого для заданных значений временного интервала задачи получается решение системы дифференциальных уравнений модели. В ходе указанной процедуры осуществляется пошаговый контроль точности относительной ошибки метода. Для большинства приведённых расчётов достаточно обеспечения точности порядка 0.1% для каждой зависимой переменной задачи. Решение продолжается до тех пор, пока не будет достигнут конец временного интервала задачи, задаваемый параметром  $t_{\text{end}}$ , значение которого выбирается достаточно большим (порядка сотни микросекунд) чтобы получить полную картину развития самостоятельного разряда при определённых конфигурациях начальных параметров.

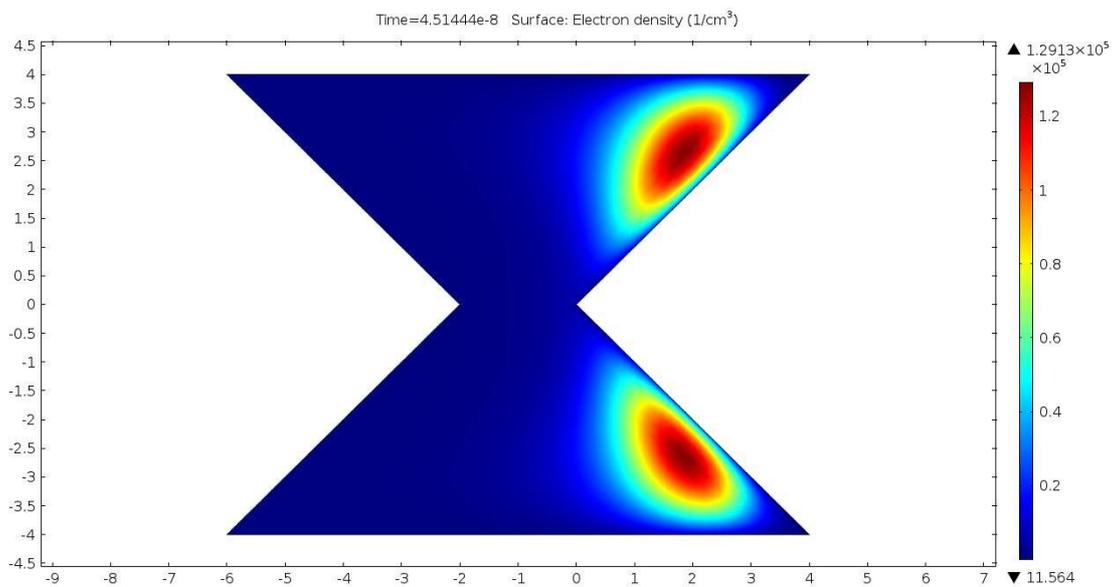
Ход численного решения задачи при значениях параметров соответствующих и не соответствующих формированию электрического пробоя промежутка между материальными шинами различен. Моделирование пробивных явлений в рамках одной и той же модели требует существенно больших вычислительных ресурсов, нежели моделирование ситуаций, в которых пробой не достигается. Затраты вычислительных ресурсов в первую очередь касаются дополнительного объёма памяти, необходимого для выбора адекватного конечно-элементного разбиения.

Ввиду того что расчёты двумерных моделей занимают значительное время, для доступного представления промежуточных результатов среда COMSOL Multiphysics позволяет выводить распределение концентрации электронов на каждом временном шаге для визуального контроля получаемого решателя. На массиве рисунков 11.3 представлены такие последовательные во времени промежуточные распределения для разряда в аргоне для указанной геометрии при  $p_0 = 10$  Тор,  $d = 2$  мм,  $n_0 = 10^6$  1/см<sup>3</sup>. Рабочее напряжение источника  $V_0 = 100$  Вольт.

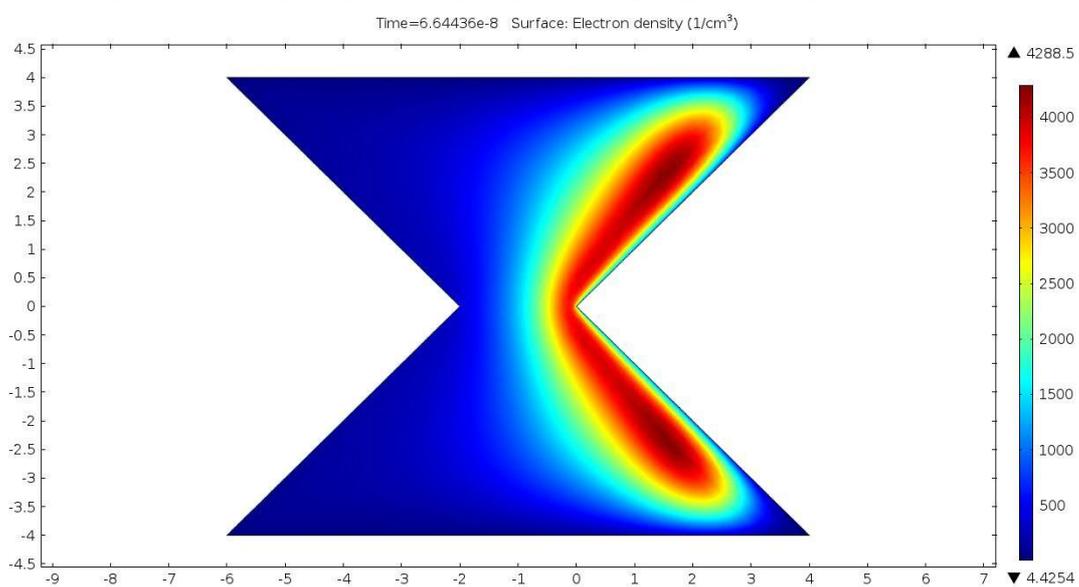
Для того чтобы выделить совокупность параметров, которые могут приводить к возникновению дуговых разрядов в аппаратуре, предполагается провести расчеты при самых различных значениях значимых параметров.

Программа исследований численно-аналитической модели предусматривает вариацию основных параметров задачи: геометрия разрядного промежутка, давление рабочего газа, напряжение на разрядном промежутке, эмиссионная способность катодной поверхности. Наиболее значимым параметром, требующим вариации в широком диапазоне, является давление газа.

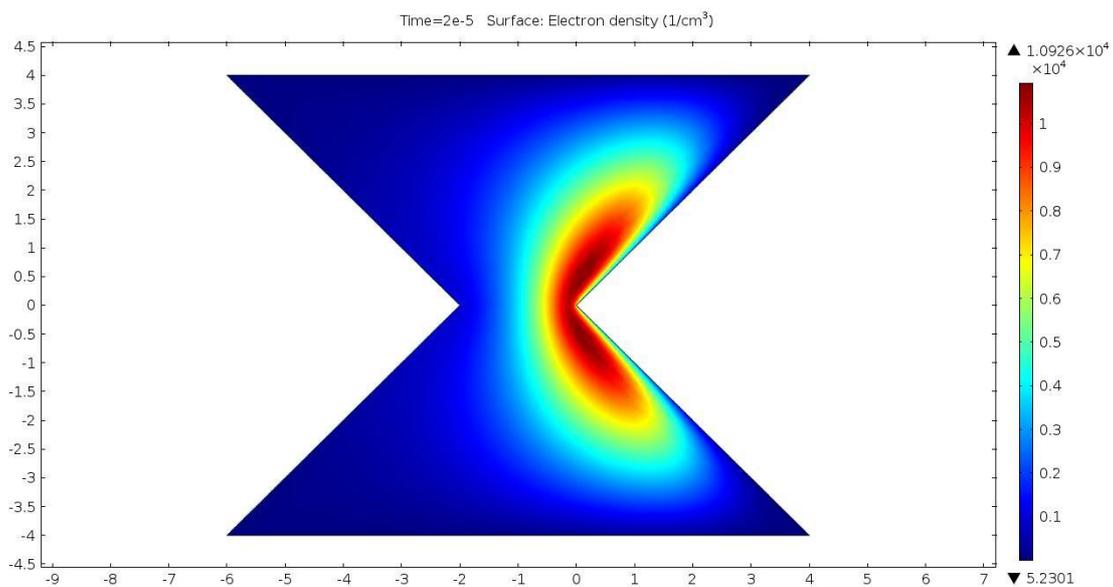




4



5



6

Рисунок 11.3 – Результаты расчета промежуточных распределений концентрации плазмы при эволюции пробоя разрядного промежутка в аргоне.

## **12 Разработка Программы и методик экспериментальных исследований численно-аналитической модели процессов возникновения дуговых разрядов в бортовом оборудовании в условиях космического пространства.**

Разработка программы экспериментальных исследований своей целью ставит разработку алгоритма проверки работоспособности численно-аналитической модели, а также получения новых знаний о вероятности инициирования самоподдерживающегося дугового разряда в результате первичного события, имитирующего первичный слаботочный разряд в РЭА. За методологическую основу программы взяты данные, представленные в разделах 1.6 и 1.11, а также требования пункта 6.3.1.6 Технического задания. В качестве первичного инициирующего события выбран дуговой разряд, осциллограмма которого должна быть подобной осциллограммам, регистрируемым в лабораторных испытаниях РЭА при срабатывании защитного элемента в виде плавкой ставки и представленным на рисунке 5.4. При этом согласно условиям пункта 6.3.1.6 Технического задания требуется проследить влияние давления окружающей атмосферы (остаточных газов) от  $10^5$  Па в нормальных условиях до  $1,3 \cdot 10^{-4}$  Па в высоком вакууме. Поскольку исследуется модель дугообразования в модулях РЭА, Программа исследования должна охватить основные типовые конструкционные элементы, встречаемые в РЭА, включая силовые шины электропитания. Последние (силовые шины) представляют наибольшую опасность для разрушительных последствий дугообразования из-за потенциально большого тока, обеспечивающего системой питания КА. Последнее условие, требуемое быть учтённым в Программе, является неопределённость в локализации первичного инициирующего события и последующего вторичного разряда (дуги). В связи с этим алгоритм экспериментальной проверки модели должен учесть возможность изменения расстояния между первичным и вторичным событиями.

Все перечисленные выше условия могут быть удовлетворены путём реализации алгоритма, представленного на рисунке 12.1 и лежащего в основе Программы экспериментальных исследований. Данный алгоритм подразумевает, что наиболее часто изменяющимся параметром является давление в системе. После завершения цикла по давлению осуществляется изменение расстояния между локализацией первичного события и вторичной вакуумной дуги, и цикл по давлению повторяется. После завершения цикла по расстоянию осуществляется смена геометрии системы, и все циклы повторяются для новой геометрии.

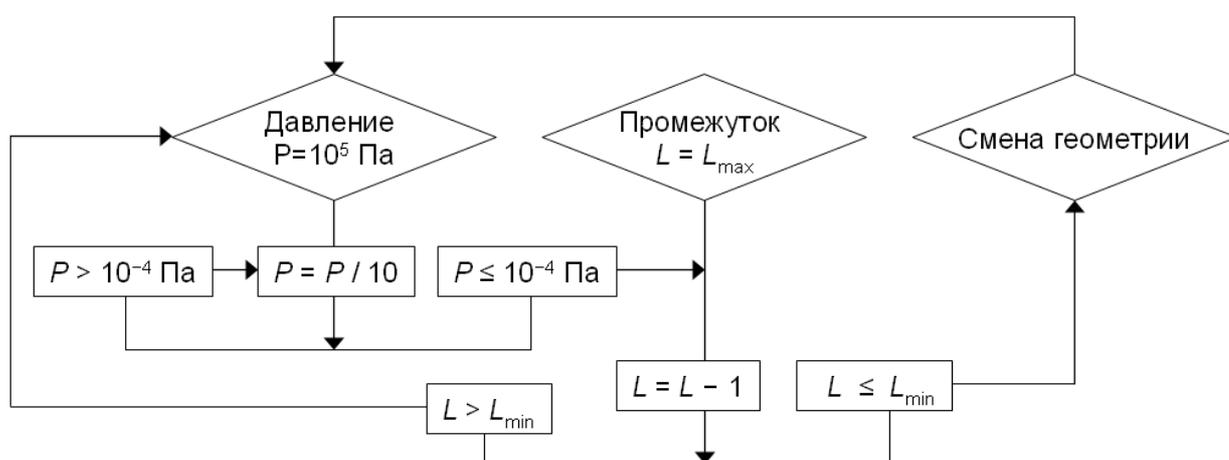


Рисунок 12.1 – Алгоритм реализации программы экспериментальной проверки модели.

Методика проведения численного эксперимента основывается на реализации критерия самоподдерживающегося разряда, заключающегося в том, что фиксируется рост или отсутствие роста концентрации свободных носителей в промежутке с течением времени. Событиям, для которых зафиксирован рост концентрации свободных носителей заряда в промежутке, присваивается атрибут «arc = 1», в противном случае «arc = 0». Результаты численного эксперимента сравниваются с результатами физического эксперимента. При обнаружении расхождения между результатами численного эксперимента и результатами физического эксперимента, превышающем значения, устанавливаемые пунктами 6.3.1.3 и 6.3.1.4

Технического задания, осуществляется корректировка параметров уравнений модели, описывающих эмиссионную способность поверхности электродов, и численный эксперимент в соответствии с алгоритмом, представленным на рисунке 12.1, повторяется.

Методика физического эксперимента основывается на проверке корреляции между первичным событием и вторичной дугой с использованием электрической схемы, представленной на рисунке 12.2, при этом параметры окружающей среды, геометрия системы и последовательность итераций соответствуют параметрам алгоритма, представленного на рисунке 12.1. Схема состоит из двух блоков: блока первичной дуги и блока вторичной дуги. Соответственно, в блоках осуществляется питание и регистрация сигналов в первичном промежутке К1-А1 и вторичном промежутке К2-А1. На К1 через диод D2 от генератора подаётся импульс высокого напряжения отрицательной полярности амплитудой до 10 кВ и длительностью порядка 10 мкс. Благодаря диодам D1 и D2 импульс заряжает контур C2-R5, который остаётся заряженным до тех пор, пока не произойдёт инициирование первичной дуги. Промежуток К1-А1 выбирается таким, чтобы инициирование первичной дуги происходило при каждом импульсе напряжения амплитудой  $-10$  кВ. После снижения напряжения на C2 ниже 500 В по абсолютной величине открывается диод D1, и начинается разрядка контура C1-R6. Параметрами контуров C2-R5 и C1-R6 следует добиться требуемой формы тока разряда первичной дуги. На расстоянии  $L$  от А1 располагается тестируемый промежуток К2-А2, питание которого осуществляется от контура C3-R8. Внутри К2 расположен зонд, режим измерения которого определяется сопротивлением R1 и подаваемыми на зонд напряжениями (не показаны на рисунке). Сигналы, регистрируемые в эксперименте: Ch 1 – напряжение на основном накопителе первичной дуги; Ch2 – напряжение на пусковом накопителе первичной дуги; Ch3 – ток первичной дуги, регистрируемый шунтом R9; Ch4 – ток вторичной дуги; Ch5 – напряжение на накопителе вторичной дуги; Ch6 – зондовый ток. Зондовые

измерения проводятся в режиме электронного тока насыщения на зонд в соответствии с методикой зондовых измерений, подробно изложенной в [82].

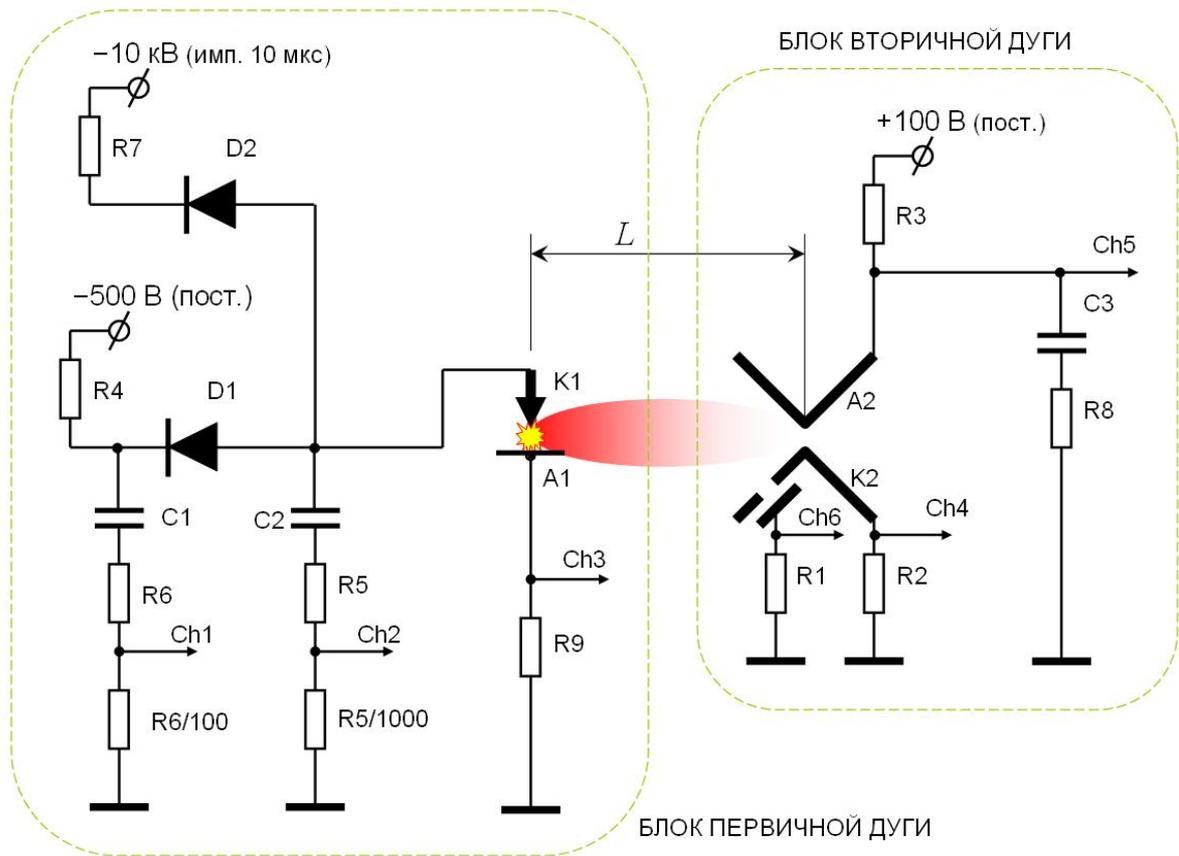


Рисунок 12.2 – Принципиальная схема имитационных исследований дугообразования.

## Заключение

На основании результатов выполнения первого этапа работ можно сделать следующие выводы:

1. Поиск латентных дефектов конструкции КА, способных приводить к дугообразованию в условиях длительной эксплуатации, следует вести по следующим направлениям:

– Поиск и выявление недостатков в выборе материала электродов и покрытий, что может приводить к росту нитевидных кристаллов.

– Поиск и выявление недостатков в выборе диэлектрических материалов в пользу хороших диэлектриков, что может приводить к накоплению значительного количества объёмного заряда с последующим электростатическим пробоем.

– Поиск и выявление использования листовых диэлектрических материалов большой толщины (порядка 1 мм), что может приводить к накоплению значительного количества объёмного заряда с последующим электростатическим пробоем. В стандартах ESA предписывается использование листовых диэлектриков толщиной не более 0.15 мм.

– Поиск и выявление использования диэлектрических покрытий с хорошими электроизоляционными свойствами, что может приводить к накоплению значительного количества поверхностного заряда с последующим электростатическим пробоем. В стандартах ESA предписывается использование диэлектриков с дозированной проводимостью.

– Поиск и выявление устаревших требований в нормативных документах. В качестве примера, в соответствии с пунктом 1.1.4 в тексте ГОСТ 19005-81 утверждается, что металлизации подлежат «металлические и неметаллические части конструкции, которые образуют внешний контур изделия, площадь наружной поверхности которых превышает 0,2 м<sup>2</sup> или превышает длину 0,5 м», что является некорректным с точки зрения защиты

от накопления заряда в условиях КП. Металлизация должна быть более полной, о чём свидетельствует опыт использования КА, опубликованный в источниках информации.

– Разработка новых стандартов. В качестве примера, не существует или не найден исполнителями нормативный документ, регламентирующий использование экранов внутри блоков РЭА КА, в то время как экранирование является известным и эффективным способом предотвращения каскадных процессов с иницированием вторичных дуг.

2. Комплексный метод исследования процессов возникновения дуговых разрядов в бортовом оборудовании в условиях космического пространства, основанный на сочетании физического и программного эксперимента позволит сформировать модель блока РЭА, позволяющую анализировать зоны риска вторичного дугообразования.

3. Разработанная численно-аналитическая модель и её программная реализация достаточно полной с точки зрения физических уравнений, лежащих в её основе, и адаптивной к описанию процессов в многофакторных системах за счёт возможности использования феноменологических параметров, отражающих состояние поверхности и элементов и получаемых методом физического моделирования.

Все пункты содержания работ по первому этапу выполнены в полном объёме, в частности:

– Выполнен анализ современной научно-технической, нормативной, методической литературы, затрагивающей проблему обеспечения надежности работы бортового оборудования в условиях космического пространства.

– Проведены патентные исследования по теме работы.

– Выполнен анализ существующих методов обнаружения опасных технологических дефектов в электронных платах.

– Выполнен комплексный анализ современных методов выявления латентных технологических дефектов бортовой РЭА КА с длительным

сроком активного существования, приводящих к возникновению дуговых разрядов в условиях космического пространства.

– Предложен и обоснован комплексный метод исследования процессов возникновения дуговых разрядов в бортовом оборудовании в условиях космического пространства на основе физического и программного эксперимента с целью формирования модели блока РЭА, позволяющей анализировать зоны риска вторичного дугообразования.

– Выполнены теоретические исследования путей создания численно-аналитической модели процессов возникновения дуговых разрядов в бортовом оборудовании в условиях космического пространства. Определён круг явлений, требующий учёта при создании численно-аналитической модели.

– Разработана численно-аналитическая модель процессов возникновения дуговых разрядов в бортовом оборудовании в условиях космического пространства.

– Разработаны алгоритмы для программной реализации численно-аналитической модели процессов возникновения дуговых разрядов в бортовом оборудовании в условиях космического пространства.

– Обосновано использование среды физического моделирования COMSOL MultiPhysics для программной реализации численно-аналитической модели процессов возникновения дуговых разрядов в бортовом оборудовании в условиях космического пространства.

– Обоснованы и выбраны задачи для численно-аналитического моделирования процессов возникновения дуговых разрядов в бортовом оборудовании в условиях космического пространства.

– Осуществлена программная реализация разработанных алгоритмов, используемых для численно-аналитического моделирования процессов возникновения дуговых разрядов в бортовом оборудовании в условиях космического пространства.

– Разработана Программа и две методики экспериментальных исследований численно-аналитической модели процессов возникновения дуговых разрядов в бортовом оборудовании в условиях космического пространства.

На втором этапе выполнения работы следует осуществить разработку способа прогнозирования риска дугообразования в радиоэлектронной аппаратуре космических аппаратов и оформить и подать заявку на изобретение данного способа.

Внедрение результатов данной работы следует осуществлять в исследованиях и разработках, связанных с проблемами дугообразования в условиях термоциклирования в режимах, подобных орбитальным режимам, включающих радиационное воздействие. Работа может подразумевать создание экспериментального комплекса на основе высоковакуумной экспериментальной установки с диапазоном термоциклирования от минус 80°С до +180°С, и укомплектование её оборудованием, включающим средства диагностики и источники радиационного воздействия, имитирующие потоки излучения и заряженных частиц в условиях орбитального КП. Перспективным является разработка методик ранней диагностики усиления эмиссионных процессов и возникновения предпробойных состояний для различных элементов БКС и СПУ. Конечной целью внедрения результатов работы может быть создание программной базы знаний, обеспечивающей экстраполяцию и интерполяцию данных экспериментальных исследований с возможностью автоматической оценки рисков дугообразования в зависимости от условий и времени эксплуатации элементов РЭА.

Исследования в рамках настоящей работы выполняются на высоком научном уровне

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Елинсон М.И., Васильев Г.Ф. Автоэлектронная эмиссия / Под ред. Д. В.Зернова.- М.: Государственное издательство физико-математической литературы.- 1958.- 274 с.
- 2 Эмиссионная электроника / Л.Н. Добрецов и М.В. Гамаюнова.- М.: Наука.- 1966.- 564 с.
- 3 Месяц Г.А. Взрывная электронная эмиссия.- М.: Издательство физико-математической литературы.- 2011.- 280 с.
- 4 Г.А. Месяц. Законы подобия в импульсных газовых разрядах // Успехи физических наук.- 2006.- т. 176.- № 10.- 1069-1091.
- 5 Andre. Anders. Cathodic Arcs: From Fractal Spots to Energetic Condensation.- Springer, New York.- 2008.- 540 p.
- 6 High Voltage Vacuum Insulation: Basic Concepts and Technological Practice / Ed. By Rod Latham.- Academic Press.- 1995.- 568 p.
- 7 Rodney V. Latham. High Voltage Vacuum Insulation: A New Perspective.- Bloomington, IN. Author House.- 2006.- 100 p.
- 8 Райзер Ю.П. Физика газового разряда. Научное издание. - 3-е изд., испр. и доп. - Долгопрудный: Издательский дом "Интеллект", 2009. - 736 с.
- 9 Аппаратура, приборы, устройства и оборудование космических аппаратов. Методы расчёта радиационных условий на борту космических аппаратов и установления требований по стойкости радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов к воздействию заряженных частиц космического пространства естественного происхождения // Нормативный документ стандартизации РКТ № ОСТ 134-1044-2007.- 2007.- 182 с.
- 10 Space engineering. Space environment // ECSS (European Cooperation for Space Standardization) Secretariat ESA-ESTEC.- Standard No. ECSS-E-ST-10-04C.- 2008.- 198 p.
- 11 Акишин А.И. Космическое материаловедение. Методическое и учебное пособие.– М: НИИЯФ МГУ, 2007, 209 с.

12 Аппаратура, приборы, устройства и оборудование космических аппаратов. Методы испытаний и оценки стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов к воздействию электронного и протонного излучений космического пространства по дозовым эффектам // Нормативный документ стандартизации РКТ № ОСТ 134-1034-2003.- 2003.- 44 с.

13 Space engineering. Methods for the calculation of radiation received and its effects, and a policy for design margins // ECSS (European Cooperation for Space Standardization) Secretariat ESA-ESTEC.- Standard No. ECSS-E-ST-10-12C.- 2008.- 105 p.

14 Design Standard. Spacecraft Charging and Discharging // Japan Aerospace Exploration Agency, Safety and Mission Assurance Department, 2-1-1 Sengen Tsukuba1 Sengen Tsukuba-shi, Ibaraki 305-8505, Japan.- 2012.- Paper JERG-2-211A, 87 p.

15 Hastings, D., H.B. Garrett. Spacecraft-Environment Interactions. Atmospheric and Space Science Series / ed. A.J. Dessler.- England: Cambridge University Press.- 1996.- 292 p.

16 H.B. Garrett, A.C. Whittlesey. Guide to Mitigating Spacecraft Charging Effects.- NASA. JPL Space Science and Technology Series.- 2011.- 242 p.

17 Mitigating In-space Charging Effects – A Guideline // NASA Technical Handbook.- No. NASA-HDBK-4002A.- 2011.- 181 p.

18 Space engineering. Spacecraft charging // ECSS (European Cooperation for Space Standardization) Secretariat ESA-ESTEC.- Standard No. ECSS-E-ST-20-06C.- 2008.- 120 p.

19 Space engineering. Electromagnetic compatibility // ECSS (European Cooperation for Space Standardization) Secretariat ESA-ESTEC.- Standard No. ECSS-E-ST-20-07C.- 2008.- 91 p.

20 Григорьев И.С., Мейлихов Е.З. Физические величины. Справочник.- М.: Энергоатомиздат, 1991.- 1232 с.

- 21 Даниэльс Ф., Олберти Р. Физическая химия / под ред. К.В.Топчиевой. – М.: Мир, 1978. – 646 с.
- 22 В.М. Ужегов (ФГУП ЦНИИмаш). Программа обеспечения стойкости бортовой РЭА космических аппаратов к воздействию ИИ КП // V Российская межотраслевая школа-семинар «Методы оценки и обеспечения радиационной стойкости изделий электронной техники».- 2008.- лекция 12.- 13 с.
- 23 Ю.А. Котов, С.Ю. Соковнин, В.А. Скотников. О радиационной устойчивости внутренней памяти программируемых цифровых микросхем // Письма в ЖТФ.- 1998.- т. 24.- № 22.- с. 29-32.
- 24 Химия высокомолекулярных соединений: Конспект лекций. / В.Ф. Куренков. Казань: Издательство – Редакция “Бутлеровские сообщения”. 2004. 146 с.
- 25 Физическая энциклопедия / под ред. А.М. Прохоров.- М.: «Советская энциклопедия».- 1988.- т. 3.- с. 592.
- 26 V. Adames, J. Calderwood. Electrical Conduction in Dielectrics at High Fields // J. Appl. Phys.- 1975.- vol. 8.- No. 5.- pp. 551-560.
- 27 К.Г. Гордеев, А.А. Остапущенко, В.Н. Галайко, М.П. Волков. Системы питания и управления электрореактивными двигательными установками автоматических космических аппаратов // Известия Томского политехнического университета.- 2009.- Т. 315.- № 4.- с. 131-136.
- 28 H. Fujii, M. Osuga. Creeping Discharge of the Printed Circuit Board for Onboard Power Supply // Proc. 26th Space Energy Symposium.- 2007.- pp. 41-45.
- 29 Основы физических процессов в плазме и плазменных установках / С.К. Жданов, В.А. Курнаев, М.К. Романовский, И.В. Цветков; под ред. В.А. Курнаева.- М: МИФИ.- 2007.- 368 с.
- 30 Кесаев И.Г. Катодные процессы электрической дуги.- М.: Наука, 1968. - 244 с.

31 Беломытцев С.Я., Коровин С.Д., Пегель И.В. Ток в сильноточном планарном диоде с дискретной эмиссионной поверхностью // Журн. техн. физики. - 1999. - Т. 69, вып. 6. - С. 97-101.

32 J. Brusse, H. Leidecker, L. Panashchenko. Metal Whiskers: Failure Modes and Mitigation Strategies [Электронный ресурс].- 2007.- База данных "NASA Tin Whisker (and Other Metal Whisker) Homepage".- Режим доступа: [http://nepp.nasa.gov/whisker/reference/tech\\_papers/2007-brusse-metal-whiskers.pdf](http://nepp.nasa.gov/whisker/reference/tech_papers/2007-brusse-metal-whiskers.pdf) свободный.- Яз. англ.

33 T.H. Chuang, H.J. Lin, C.C. Chi. Rapid growth of tin whiskers on the surface of Sn-6.6Lu alloy // Scripta Materialia.- 2007.- vol. 56.- pp. 45-48.

34 T.-H. Chuang. Rapid whisker growth on the surface of Sn-3Ag-0.5Cu-1.0Ce solder joints // Scripta Materialia.- 2006.- vol. 55. pp. 983-986.

35 R.D. Hilty, N.E. Corman, H. Herrmann. Electrostatic fields and current-flow impact on whisker growth // IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing.- 2005.- vol.28.- no.1.- pp.75-84.

36 G.T. Galyon. Annotated Tin Whisker Bibliography And Anthology [Электронный ресурс].- 2003.- База данных "IBM Server Group, NEMI Tin Whisker Modeling Project".- Режим доступа [http://thor.inemi.org/webdownload/newsroom/TW\\_biblio-July03.pdf](http://thor.inemi.org/webdownload/newsroom/TW_biblio-July03.pdf) свободный.- 64 с.- Яз. английский.

37 K.-W. Moon, M. E. Williams, C. E. Johnson, G. R. Stafford, C.A. Handwerker, and W. J. Boettinger. The Formation of Whiskers on Electroplated Tin Containing Copper // Proc. 4th Pacific Rim Conference on Advanced Materials and Processing.- 2001.- pp. 1115-1118.

38 Rui Zhang, Jiawei Zhang, John L. Evans, Wayne Johnson, Jan Jan Vardaman, Issei Fujimura, Andy Tseng, Jeff Knight. Tin-bismuth plating for component finishes // Proc. IEEE 61st Electronic Components and Technology Conference (ECTC).- 2011.- pp. 2060-2066.

39 B. Horváth. Examination of Tin Whisker Growth in Electronic Assemblies.- Budapest University of Technology and Economics.- 2012.- 101 p.

40 Tong Fang. Tin Whisker Risk Assessment Studies.- University of Maryland.- Ph.D. Thesis.- 2005.- 110 p.

41 J.S. Kadesch, H. Leidecker. Effects of Conformal Coat on Tin Whisker Growth // Proc. 37th IMAPS Nordic Annual Conference.- 2000.- pp. 108-116.

42 Cho M., Ramasamy R., Toyoda K., Nozaki Y. and Takahashi M.: Laboratory Tests on Interaction between 110V Solar Arrays and Ion Thruster Plasma // J. Spacecraft and Rocket.- 2003.- Vol.40.- No.2.- pp. 221-229.

43 S.A. Barengolts, G.A. Mesyats, M.M. Tsventoukh. Ignition and Sustainment of the Explosive Electron Emission Cyclic Pulses – Ectons by Plasma–Surface Interaction // Proc. Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum.- 2012.- pp. 376-379.

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

45 Nefedtsev E.V., Ozur G.E. Electric-field enhancement and ion-flux focusing at the multiwire cathode of a high-current plasma-filled diode // Proc. 23rd Int. Symp. Discharges and Electrical Insulation in Vacuum.- 2008. vol. 1.- pp. 235-238.

46 J. Kim, S. Aso, S. Hosoda, M. Cho. Threshold conditions to induce the sustained arc on the solar array of LEO satellite.- Proc. 9th Spacecraft Charging Technology Conf.- 2005.- pp. 179-191.

47 Low Earth Orbit Spacecraft Charging Design Handbook.- NASA, NASA-HDBK-4006.- 2007.- 63 p.

48 Technical Support to the National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) on the Reported Toyota Motor Corporation (TMC) Unintended Acceleration (UA) Investigation // NASA Engineering and Safety Center.- 2011.- Technical Assessment Report No. TI-10-00618.- 177 p.

49 H. Leidecker, G. Brusse. Tin Whiskers: A History of Documented Electrical System Failures [Электронный ресурс].- 2006.- База данных "NASA Tin Whisker (and Other Metal Whisker) Homepage".- Режим доступа:

[http://nepp.nasa.gov/whisker/reference/tech\\_papers/2006-Leidecker-Tin-Whisker-Failures.pdf](http://nepp.nasa.gov/whisker/reference/tech_papers/2006-Leidecker-Tin-Whisker-Failures.pdf) свободный.- Яз. англ.

50 D.I. Proskurovsky. Explosive Electron Emission From Liquid-Metal Cathodes // IEEE Trans. Plasma Science.- 2009.- vol. 37.- issue 8, part 1.- pp. 1348-1361.

51 A.V. Batrakov, B.J. Juettner, E.L. Pryadko. Investigation into Light Emission from Droplet Spots Produced by Low-Current Vacuum Arc Discharge // Proc. 21st Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum.- 2004.- pp. 201-204.

52 Ю.Урличич, В. Субботин, В. Стешенко, Обеспечение аппаратуры ракетно-космической техники электронной компонентной базой [Электронный ресурс].- 2011.- Аэрокосмический курьер, № 5(77).- Режим доступа <http://www.spacecorp.ru/press/publications/item2740.php> свободный.- 11 с.- Яз. русский.

53 Ермолович А. Комбинированное тестирование печатных плат // Электронные компоненты и системы.- 2001.- №4.- с. 38-43.

54 Медведев А.М. Надежность и контроль качества печатного монтажа. – М.: Радио и связь, 1986, 216 с.

55 Литвинский И.Е., Прохоренко В.А. Обеспечение безотказности персональных ЭВМ. – М.: Радио и связь, 1993, 208 с.

56 Федухин А.В. Контроль качества и диагностика неисправностей многослойных печатных плат [Сетевой ресурс].- 2003.- Системотехника, № 1.- Режим доступа <http://systech.miem.edu.ru/2003/n1/Fedukhin.htm> свободный.- 11 с.- Яз. русский.

57 Глудкин О.П., Енгальчев А.Н., Коробов А.И., Трегубов Ю.В. Испытания радиоэлектронной, электронно-вычислительной аппаратуры и испытательное оборудование / под редакцией Коробова А.И.- М.: Радио и связь, 1987.- 272 с.

58 Беляев Ю. К. Статистические методы в теории надежности.- М.: Знание, 1978.- 66 с.

59 Беляев 10. К. Статистические методы обработки результатов испытаний на надежность.- М.: Знание, 1982.- 109 с.

60 Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д. Математические методы в теории надежности.- М.: Наука, 1965.- 524 с.

61 Обеспечение высокой надежности и ремонтпригодности военной РЭА на этапе разработки (опыт США). Обзор // Радиоэлектроника за рубежом. 1981. - N 5. - с. 29-45.

62 Р.Ю. Дорофеев, Д.А. Белов. Проблема обеспечения надежности бортовой радиоэлектронной аппаратуры КА при воздействии электростатических полей в орбитальных условиях эксплуатации // Успехи современной радиоэлектроники.- 2013.- № 1.- с. 20-22.

63 Соколов А. Б., Саенко В. С. Моделирование изменений радиационной электропроводности полимеров внешней поверхности космических аппаратов при воздействии факторов космического пространства // Технологии электромагнитной совместимости.- М.: ИД «Технологии».- 2008.- № 2(25).- с. 9-11.

64 Комягин С. И., Соколов А. Б. Математическая модель электромагнитной стойкости // Электромагнитная совместимость и проектирование электронных средств: Сб. научных трудов.- М.: МИЭМ.- 2008.- с. 19-21.

65 J.A. Brusse, G.J. Ewell, J.P. Siplon. Tin Whiskers: Attributes and Mitigation // Proc. CARTS 2002: 22nd Capacitor and Resistor Technology Symposium.- 2002.- pp. 67-80.

66 B. Dunn. A Laboratory Study of Tin Whisker Growth // Proc. European Space Agency (ESA) STR-223.- 1987.- pp. 1-50.

67 P. Hinton. Tin-Plating, Tin-Nickel Electroplate and Tin-plating over Nickel as Final Finishes on Copper // Proceedings Surface-Mount International Conference.- 1996.- pp. 806-810.

68 K. Tu. Interdiffusion and Reaction in Bimetallic Cu-Sn Thin Films // Acta Metallurgica.- 1973.- No. 12.- pp. 347-354.

69 В.А. Бурцев, Н.В. Калинин, А.В. Лучинский. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках.- М.: Энергоатомиздат.- 1990.- 288 с.

70 K. Whitlaw, A. Egli, M. Toben. Preventing whiskers in electrodeposited tin for semiconductor lead frame applications // Circuit World.- 2004.- Vol. 30.- Iss: 2.- pp. 20-24.

71 Vincenzo, P.L. Cavallotti, P. Crema. Electrochemical Control of Whisker Growth on Electrodeposited Tin Coatings // Trans. IMF (Institute of Materials Finishing).- 2002.- vol. 80.- No. 3.- pp. 79-84.

72 iNEMI Recommendations on Lead-Free Finishes for Components Used in High-Reliability Products: Version 4 [Электронный ресурс].- 2006.- Режим доступа [http://thor.inemi.org/webdownload/projects/ese/tin\\_whiskers/Pb-Free\\_Finishes\\_v4.pdf](http://thor.inemi.org/webdownload/projects/ese/tin_whiskers/Pb-Free_Finishes_v4.pdf) свободный.- 23 с.- Яз. английский.

73 D.C. Ferguson, B.V. Vayner, J.T. Galofaro, G.B. Hillard, J. Vaughn, and T. Schneider. NASA GRC and MSFC Space Plasma Arc Testing Procedures // IEEE Transactions on Plasma Science.- 2006.- vol.- 34.- issue 5.- pp. 1948-1958.

74 M.J. Mandell, V.A. Davis, D.L. Cooke, A.T. Wheelock, C.J. Roth, Nascap-2k Spacecraft Charging Code Overview // IEEE Trans. Plasma Science.- 2006.- Volume 34.- Issue 5.- pp. 2084-2093.

75 T. Masuyama, M. Nagata, T. Onishi, et al. Ground Experiment and Numerical Simulation of Spacecraft Arcing in Ambient Plasma Environments // Proc. 8th Spacecraft Charging Technology Conference (NASA/CP—2004—213091).- 2004.- p. 88-102.

76 B. Vayner, J. Galofaro, D. Ferguson. Arc Inception Mechanism on a Solar Array Immersed in a Low-density Plasma // Proc. 7th Int. Conf. Spacecraft Charging Technology / Edited by R.A. Harris.- ESA SP-476.- 2001.- pp. 469-474.

77 J. Galofaro, B. Vayner, D. Ferguson, W. Degroot. A Desorbed Gas Molecular Ionization Mechanism for Arcing Onset in Solar Arrays Immersed in a Low-Density Plasma // Proc. 33rd Plasmadynamics and Lasers Conference (NASA/TM-2002-211552).- 2002.- AIAA-2002-2262.- 10 p.

78 B. Vayner. The Neutral Gas Desorption and Breakdown on a Metal-Dielectric Junction Immersed in a Plasma // Proc. 33rd Plasmadynamics and Lasers Conference (NASA/TM-2002-211552).- 2002.- AIAA-2002-2244.- 7 p.

79 K. Toyoda, T. Ose, H. Masui, M. Cho. Threshold Measurement of Secondary Arc on Solar Arrays for Japanese Spacecraft Charging Guideline // Proc. 4th Int. Space Environment Symp.- 2008.- pp. 85-90.

80 G. Bonin, N. Orr, R.E. Zee, J. Cain. Solar Array Arcing Mitigation for Polar Low-Earth Orbit Spacecraft // Proc. Conf. Small Satellites.- 2010.- SSC10-X-2.- 9 p.

81 D.I. Proskurovsky, “Explosive electron emission from liquid-metal cathodes”, Proc. 23rd ISDEIV, September 15-19, 2008, Bucharest, Romania, pp. 1-8.

82 Козлов О.В. Электрический зонд в плазме.- М.: Атомиздат, 1969. – 293 с.

83 Сливков И.Н. Процессы при высоком напряжении в вакууме.– М.: Энергоатомиздат, 1986.– 256 с.

84 Boyle W.S., Haworth F.E. Glow-to-arc Transition // Phys.Rev.– 1956.– V.101, N 3.– P.935–938.

85 Мышенков В.И. Об устойчивости катодного слоя и о механизме перехода тлеющего разряда в дугу // Теплофиз.выс.темп.– 1984.– Т.22, В.1.– С.20–25.

86 Эккер Г. Вопросы теории вакуумной дуги / В кн. Вакуумные дуги: Пер. с англ./ Под ред. В.И.Раховского.– М.: Мир.– 1982.– С.269–384.

87 Королев Ю.Д., Месяц Г.А. Автоэмиссионные и взрывные процессы в газовом разряде.– Новосибирск: Наука, 1982.– 253 с.

88 Козырев А.В., Королев Ю.Д., Месяц Г.А. Автоэмиссионные процессы и переход от тлеющего разряда к дуговому // Журн.техн.физ.– 1987.– Т.57, В.1.– С.58–64.