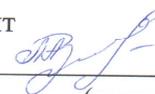


Минобрнауки России
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук
(ИСЭ СО РАН)
Отдел образовательной деятельности

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД
об основных результатах
научно-квалификационной работы на тему:
«Теоретическое моделирование электроразрядных процессов в системах с
комбинированными электродами при низких давлениях газа»

Направление подготовки: 11.06.01 Электроника, радиотехника и системы связи
Профиль подготовки (специальность): 05.27.02 – вакуумная и плазменная
электроника

Аспирант



(подпись)

Зюлькова Лариса Александровна

Научный руководитель:
Козырев Андрей Владимирович,
доктор физ.-мат. наук, профессор,
зав. лаб. теоретической физики
ИСЭ СО РАН

Томск – 2020

Актуальность избранной темы и степень её разработанности

С электрическими явлениями в газе люди сталкивались уже очень давно (молния, огни святого Эльма), но исследовать их на научной основе начали в XVIII веке. Многообразие условий, определяющих исходное состояние газовой среды, внешних воздействий на нее, форм, материала и расположения электродов, геометрии возникающего в газе электрического поля, наличие и геометрия магнитного поля приводит к тому, что существует множество видов (форм) электрических разрядов в газе. Исследованию газовых разрядов посвящено огромное количество экспериментальных и теоретических работ. Однако на ранних этапах исследования сами электрические разряды в газах не были предметом серьезных исследований, а служили скорее средством изучения других явлений, и многое в собственном механизме функционирования газовых разрядов еще долго оставалось необъясненным. С появлением в начале XIX века достаточно мощных источников питания были открыты и описаны сначала дуговой и тлеющий разряды, а потом и многие другие (Петров, Дэви, Фарадей). Особенно плодотворным был конец XIX - начало XX веков, когда были открыты многие интересные эффекты (Крукс, Дж.Дж. Томсон, Таунсенд). Тогда же началась история газового разряда в магнитном поле.

В технических применениях низкотемпературной плазмы очень часто используются системы с комбинированными электродами: газоразрядные тиратроны, коммутаторы на основе псевдоискрового разряда, плазменные эмиттеры заряженных частиц и т.п. Эти устройства имеют довольно разнообразную конструкцию, в некоторых из них разряд осуществляется во внешнем магнитном поле, рабочие газы также сильно различаются по своим свойствам (водород, аргон, азот).

Кроме этого, в настоящее время всё более важной становится проблема зажигания самостоятельного разряда при функционировании летательных аппаратов в космическом пространстве в связи с переходом систем электропитания и бортовой кабельной сети космических аппаратов на уровни рабочих напряжений, значительно превышающих порог возникновения дугового разряда в вакууме. Чем больше превышение рабочих напряжений над порогом возникновения дугового разряда в вакууме, тем больше обостряются существующие и проявляются новые проблемы, связанные с нарушением вакуумной изоляции и формированием дуги. Дугообразование является одной из основных причин выхода из строя систем электропитания, а доля ответственности систем электропитания в сбоях работы космических аппаратов составляет 3% в общей статистике и 9% в статистике фатальных отказов, приведших к потере аппаратов [Отчет о прикладных научных исследованиях «Разработка методов комплексной диагностики бортовой аппаратуры космических аппаратов на устойчивость к дугообразованию». Этап 1. Соглашение № 14.607.21.0008 от 05.06.2014 (https://www.hcei.tsc.ru/images/contracts/14607210008_phase1_otch_PNI.pdf)].

Высокая стоимость космических аппаратов определяет важность не только их функциональных возможностей, но и надёжности бортовой аппаратуры и, как следствие, срока службы устройства, так как проведение ремонтных работ во время эксплуатации космического аппарата затруднительно или вообще невозможно. Поскольку бортовое оборудование космических аппаратов представляет собой комплекс, сочетающий сложнейшую функциональную нагрузку со значительным энергопотреблением в условиях воздействия факторов космического пространства, делает наземную диагностику и тестирование элементов радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов нетривиальной задачей. Но, несмотря на это, в настоящее время нет стандартных методов диагностики радиоэлектронной аппаратуры космических

аппаратов на устойчивость к дугообразованию из-за относительной новизны проблемы. Принимая во внимание сложность, а иногда и уникальность бортового оборудования космических аппаратов, методы диагностики бортового оборудования не должны использовать режимы, способные привести к ухудшению его характеристик или снижению срока его активного существования.

В этих ситуациях большое значение имеет хорошее представление обо всех физических процессах, определяющих функциональные возможности того или иного устройства. Именно теоретическое моделирование сложных и разнообразных физических процессов, протекающих в низкотемпературной плазме, открывает большие возможности для правильного понимания реальных и потенциальных возможностей приборов. Поэтому тема исследовательской работы представляется полезной и актуальной.

Цель научного исследования

Целью настоящего научного исследования является разработка и математическая реализация теоретических моделей основных физических процессов, протекающих в плазме газового разряда низкого давления, позволяющих делать расчеты ее важнейших параметров в рамках аналитических, численных или численно-аналитических математических методов.

Основные задачи научного исследования

1. Разработка алгоритма и критериев возникновения ситуаций риска дугообразования, реализующихся с различной вероятностью и с учетом физических условий внутреннего пространства модулей бортовой аппаратуры, состояния изоляции и электрических контактов бортовой кабельной сети космических аппаратов.

2. Определение и моделирование конкретных ситуаций, способных привести к возникновению электрического разряда в бортовой аппаратуре космических аппаратов. Разработка набора тестовых задач для численного моделирования.

Содержание выполненного исследования с описанием использованных методов, и его основные результаты

Первичная дуга может быть инициирована одним из следующих процессов [Отчет о ПНИ «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». Этап 1. ГК № 14.514.11.4076 от 14.03.2013 (https://www.hcei.tsc.ru/images/contracts/14514114076_1.pdf)]:

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. 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.

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 [Райзер Ю.П. Физика газового разряда. Научное издание. - 3-е изд., испр. и доп. - Долгопрудный: Издательский дом "Интеллект", 2009. - 736 с.]. Один из вариантов пробоя данного типа является пробой с отрицательно заряженного корпуса космического аппарата в открытое пространство. Такой разряд питается ёмкостью между космическим аппаратом и плазменным окружением.

Переход бортовой сети космических аппаратов от низкого напряжения (27 В) к высокому напряжению с точки зрения конструкции бортовой аппаратуры космического аппарата (100 В), однако с позиции физики вакуумной дуги оба эти напряжения являются низкими с точки зрения инициирования вакуумной дуги. Наиболее «лёгким» с точки зрения инициирования дуги открытого промежутка (вакуумного или газового) является режим, соответствующий минимуму кривой Пашена, т.е. инициирование пробоя промежутка в условиях разреженной атмосферы. Кривые Пашена подобны для всех газов. Из литературных данных известно, что для различных газов, включая воздух, минимальное давление инициирования пробоя (соответственно, дугообразования) выше 100 В. Основным механизмом интенсивной эмиссии электронов, способным к инициированию пробоя в вакуумных и плазмонаполненных промежутках, является автоэлектронная эмиссия [Отчет о ПНИ «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». Этап 1. ГК № 14.514.11.4076 от 14.03.2013 (https://www.hcei.tsc.ru/images/contracts/14514114076_1.pdf)]. Модельное представление эмиссии из таких центров [High Voltage Vacuum Insulation: Basic Concepts and Technological Practice / Ed. By Rod Latham.- Academic Press.- 1995.- 568 p., Rodney V. Latham.

High Voltage Vacuum Insulation: A New Perspective.- Bloomington, IN. Author House.- 2006.- 100 p.] основывается на следующих положениях. В системе металл–диэлектрик электрическое поле проникает в диэлектрик и, несмотря на то, что оно ослаблено там в ε 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 свою энергию на дефектах решётки и колебаниях, за счёт чего происходит их термолизация. Электроны в диэлектрике приобретают тепловую энергию $3kT_e/2 = e\Delta U$, где $\Delta U = \Delta d U / (\varepsilon d)$; k – постоянная Больцмана, T_e – температура электронов, ε – диэлектрическая проницаемость; Δd – толщина диэлектрической пленки на поверхности металла, d – длина промежутка; U – напряжение на промежутке. За счёт столкновений направленная энергия электронов переходит в тепловую энергию (в качестве приближения полагаем, что полностью), и

$$T_e = \frac{2e \Delta d U}{3k \varepsilon d} = \frac{2e \Delta d}{3k \varepsilon} E. \quad (1)$$

Видно, что температура электронов растёт линейно с напряженностью поля. Поскольку электроны термализованы, их распределение становится Максвелловским, и для них можно применить формулу Ричардсона–Дэшмана для термоэлектронной эмиссии [Эмиссионная электроника / Л.Н. Добрецов и М.В. Гамаюнова.- М.: Наука.- 1966.- 564 с.], в которой вместо работы выхода следует использовать электронное сродство χ , поскольку распределение термолизированных 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

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

Выражение (2) подобно уравнению Фаулера-Нордгейма [Елинсон М.И., Васильев Г.Ф. Автоэлектронная эмиссия / Под ред. Д. В.Зернова.- М.: Государственное издательство физико-математической литературы.- 1958.- 274 с.], но предэкспоненциальный и экспоненциальный множители при $1/E$ с учётом типичных значений Δd и ε , наблюдаемых экспериментально, обеспечивает условия, эквивалентные (с точки зрения плотности тока эмиссии) требуемому локальному усилению поля [Отчет о ПНИ «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». Этап 1. ГК № 14.514.11.4076 от 14.03.2013 (https://www.hcei.tsc.ru/images/contracts/14514114076_1.pdf)].

Наличие эмиссионных центров, например, тройных точек (металл – диэлектрик – вакуум) может понизить напряжения пробоя вплоть до 100 В. Так, в экспериментах с сегментами солнечных батарей [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] было показано, что соответствующее минимуму кривой Пашена напряжение оказывается более чем в 2 раза ниже по сравнению со случаем металлических электродов, и составляет 100 В. С учётом того, что зажигание самостоятельного газового разряда низкого давления осуществляется преимущественно за счёт объёмной ионизации, такое снижение пробивного напряжения показывает значительное усиление вклада в пробой катодных процессов.

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

поверхность катода не ниже двухсот мегаватт на квадратный сантиметр [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]. Плотность тока (за счёт тока ионов из плазмы первичной дуги) ограничена критерием Бома и составляет [Рожанский В.А. Р 62 Теория плазмы: Учебное пособие.— СПб.: Издательство «Лань».— 2012.— 320 с.]

$$j_B \approx en \sqrt{\frac{kT_e}{M_i}}. \quad (3)$$

На расстояниях, превышающих сотни микрометров, исключая протяжённые диэлектрические плёнки (покрытия), способные накапливать избыточный заряд в течение длительного времени, такого значения тока недостаточно для инициирования ионным током вторичной дуги. Более значимым процессом в инициировании вторичной дуги является собственная эмиссионная активность поверхности, находящейся под отрицательным относительно плазмы потенциалом [Отчет о ПНИ «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». Этап 1. ГК № 14.514.11.4076 от 14.03.2013 (https://www.hcei.tsc.ru/images/contracts/14514114076_1.pdf)]. В отличие от первичной дуги, под плазмой образуется катодный слой, толщина которого L_{sh} вычисляется [Рожанский В.А. Р 62 Теория плазмы: Учебное пособие.— СПб.: Издательство «Лань».— 2012.— 320 с.] как

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

где длина Дебая L_D , соответственно,

$$L_D = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 k T_e}{n_e e^2}}. \quad (5)$$

При напряжении 100 В, температуре электронов плазмы первичной дуги 3 эВ и концентрации на некотором удалении 10^{12} см^{-3} напряжённость электрического поля составит величину около 10^4 В/см , что требует для пробоя наличия эмиссионного центра с безразмерным формфактором (либо его формальный эквивалент) в уравнении Фаулера-Нордгейма не менее 1000. Данная оценка указывает на доминирование зарядки диэлектрических плёнок (включая естественные окислы) над автоэлектронной эмиссией при инициировании вторичной вакуумной дуги.

Наличие газообразной среды (формирующейся путем газовыделения с элементов конструкции при временном нагреве космического аппарата, а также за счет источников газа из двигательных установок и систем жизнеобеспечения), заполняющей пространство между элементами бортовой аппаратуры космических аппаратов, является важным фактором, обеспечивающим горение самостоятельного разряда.

Процесс появления вторичной дуги можно разбить на совокупность более мелких событий, вероятность реализации которых проще оценить. Оценка вероятности реализации на каждом уровне представляется достаточно сложной теоретической и экспериментальной проблемой. Предложен следующий алгоритм определения вероятности дугообразования в блоках бортовой аппаратуры космических аппаратов [Отчет о ПНИ «Разработка методов комплексной диагностики бортовой аппаратуры космических аппаратов на устойчивость к дугообразованию». Этап 2. Соглашение № 14.607.21.0008 от 05.06.2014]:

0. Иницирующий дуговой разряд. Но в рамках исследования это событие считается достоверным, то есть имеющим место по определению.

1. Наличие близко расположенных металлических элементов, несущих сравнительно большую разность потенциалов. Вероятность этого события P_1 может быть оценена как отношение объема потенциально опасных сегментов V по отношению к полному объему, занятому бортовой аппаратурой. Ее можно сравнительно точно оценить после трехмерного макро моделирования блоков бортовой аппаратуры космических аппаратов.

2. Возможность переноса плазмы от первичного источника к потенциально опасным элементам первого уровня. Здесь естественно полагать вероятность P_2 обратно пропорциональной расстоянию от первичной дуги до проблемного элемента первого уровня.

3. Ненулевая вероятность появления дефектов диэлектрических покрытий P_3 , особенно в местах расположения наиболее уязвимых элементов. Эту вероятность можно оценить на основе экспериментальных испытаний по деградации материалов под действием факторов космического пространства сертифицированными методами.

4. Ненулевая вероятность пробоя разрядного элемента при возможных для этого условиях (оптимальные давления, наиболее «пессимистичные» уровни эмиссионной активности, максимальный уровень напряжения и т.п.). Эта вероятность P_4 может быть вычислена для каждой тестовой конфигурации на основе теоретического моделирования. Для этого необходимо проведение численного моделирования тестовых задач.

Таким образом, для каждого потенциально уязвимого n -го элемента можно вычислить частную величину вероятности P_n того, что он будет объектом вторичного дугообразования [Отчет о ПНИ «Разработка методов комплексной диагностики бортовой аппаратуры космических аппаратов на устойчивость к дугообразованию». Этап 2. Соглашение № 14.607.21.0008 от 05.06.2014]:

$$P_n \sim \left(VP_4 P_3 \sum_m L_m^{-2} \right)_n. \quad (6)$$

Здесь L_m – расстояние от данного элемента до m -го места первичной дуги.

После подсчета всех частных вероятностей их следует сложить, и получится некоторая величина, характеризующая вероятность вторичного дугообразования для всего тестируемого блока космического аппарата [Отчет о ПНИ «Разработка методов комплексной диагностики бортовой аппаратуры космических аппаратов на устойчивость к дугообразованию». Этап 2. Соглашение № 14.607.21.0008 от 05.06.2014]. Здесь уместно сделать важное разъяснение. Обычно понятие вероятности употребляют только при знании полного пространства событий, чтобы можно было пронормировать вероятность того или иного события из этого пространства, то есть сумма вероятностей всех событий должна быть равна единице и вероятность события можно назвать абсолютной. В нашей постановке задачи речь идет о другой вероятности, которую можно назвать относительной. Она не нормирована, так как нам не известны вероятности всех возможных событий. Очевидно, что эта вероятность будет равна нулю, только если напряжение питания бортовой сети будет ниже минимального напряжения горения дуги (< 10 В). Но и относительная вероятность может служить хорошим ориентиром для разработчиков аппаратуры, так как каждая конкретная конструкция модуля будет обладать некоторой объективной числовой характеристикой, которую в результате отработки различных технических решений нужно стремиться свести к минимально возможной.

Под критериями дугообразования понимается совокупность обязательных факторов, сопровождающих явление возникновения и поддержания дугового разряда в бортовой аппаратуре космических аппаратов. Было предложено в качестве такого критерия взять условия, при которых в радиоэлектронной аппаратуре космических аппаратов мог бы инициироваться

электрический разряд другого типа: самостоятельный тлеющий разряд [Отчет о ПНИ «Разработка методов комплексной диагностики бортовой аппаратуры космических аппаратов на устойчивость к дугообразованию». Этап 2. Соглашение № 14.607.21.0008 от 05.06.2014]. Этот разряд при достаточно большом времени горения способен создать условия для перехода в сильноточную стадию – дуговой разряд. При этом резко увеличивается концентрация плазмы в месте горения тлеющего разряда, и, как следствие, повышается мощность энерговыделения и, соответственно, температура элементов аппаратуры в месте протекания тока. Кроме того, длительное (или регулярно повторяющееся) горение тлеющего разряда может привести к существенной локальной деградации свойств электрической изоляции, приводящей к дальнейшему распространению области возможного дугообразования. Конечно, зажигание самостоятельного слаботочного разряда еще не означает его последующего перехода в сильноточную дуговую стадию, но без предварительной стадии самостоятельного разряда дуговой разряд инициирован не будет. Поэтому сама возможность существования локального самостоятельного разряда в узлах бортовой аппаратуры может служить критерием вторичного дугообразования. Для того чтобы выяснить, какие элементы и узлы радиоэлектронной аппаратуры наиболее уязвимы с точки зрения этого критерия был разработан набор тестовых задач.

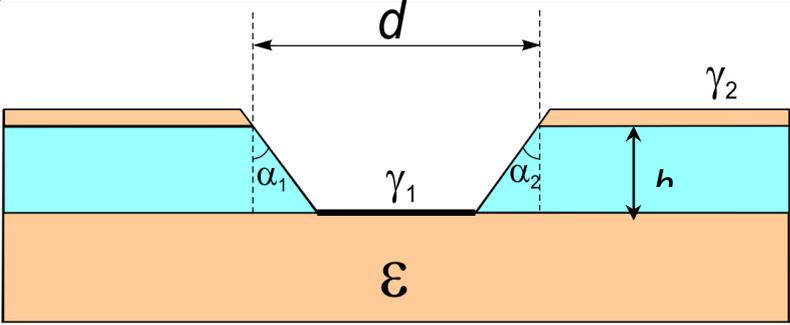
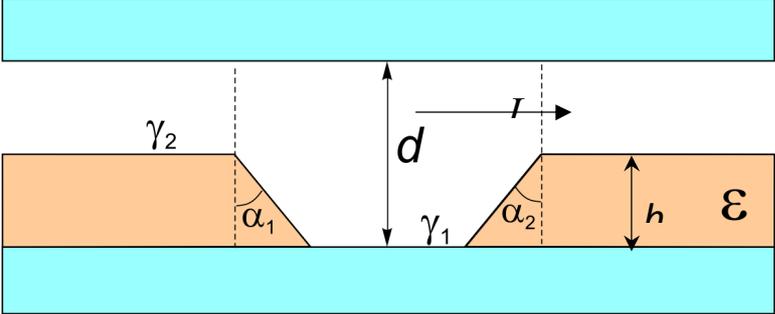
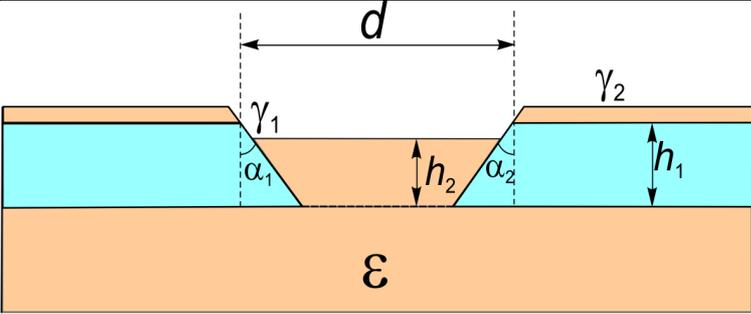
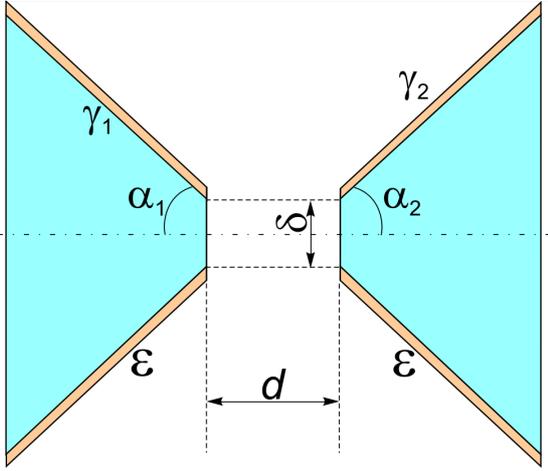
Методом исследования является компьютерное моделирование с проверкой модели компьютерным и физическим экспериментом. Был разработан многофункциональный диагностический комплекс, который позволяет предварительно просканировать и создать цифровую модель поверхности отдельной платы или готового блока на основе схемотехнического моделирования и вычислить пространственное распределение электрического потенциала внутри исследуемого блока или вокруг и на поверхности

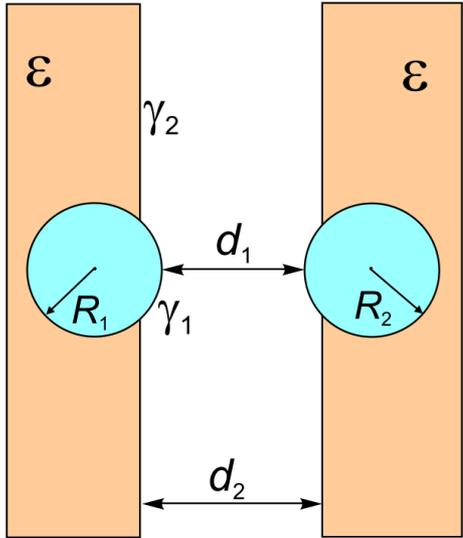
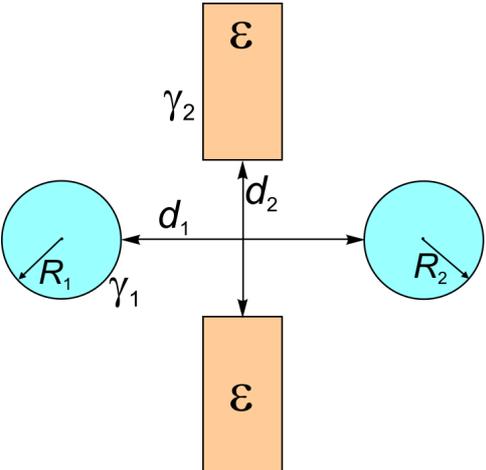
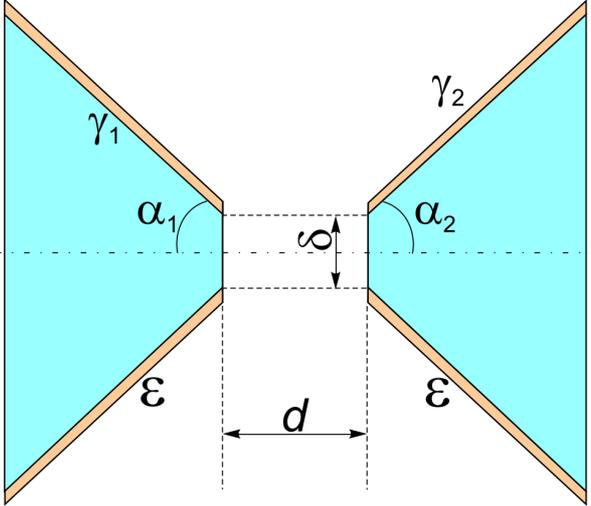
исследуемой платы [Отчет о ПНИ «Разработка методов комплексной диагностики бортовой аппаратуры космических аппаратов на устойчивость к дугообразованию». Этап 2. Соглашение № 14.607.21.0008 от 05.06.2014; V.Yu. Kozhevnikov, A.V. Kozyrev, A.V. Batrakov, N.S. Semeniuk and V.M. Karaban, " Diagnostic of primary arcing in electronics of satellite telecommunication system," 23th TEFLOR 2015, Serbia, Belgrade, pp. 615-618, November 24-26 2015]. Для решения задачи электростатики удобно использовать среду конечно-элементного моделирования COMSOL Multiphysics с программным электростатическим модулем AC/DC.

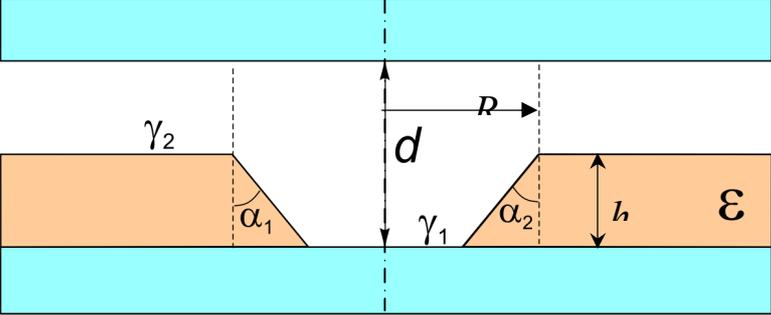
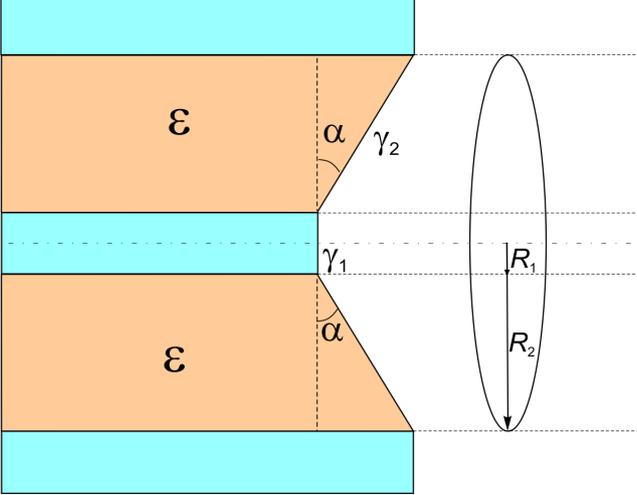
Для дальнейшего моделирования плазмы эта конфигурация представляет огромную проблему, которую очень сложно решить непосредственно с помощью высокопроизводительных вычислений, даже для современной вычислительной физики плазмы. Гораздо проще и быстрее выделить и просчитать только потенциально опасные области. Получившуюся трехмерную модель платы или блока можно последовательно разбить на сечения и посчитать получившиеся сечения или небольшие потенциально опасные области. Поэтому был определен набор потенциально опасных конфигураций для дальнейшего исследования (Таблица 1).

Таблица 1 – Схематические изображения разрядных узлов для тестовых задач и их краткие описания [Отчет о ПНИ «Разработка методов комплексной диагностики бортовой аппаратуры космических аппаратов на устойчивость к дугообразованию». Этап 2. Соглашение № 14.607.21.0008 от 05.06.2014].

Изображение разрядного элемента	Краткое описание
Плоские конфигурации	

Изображение разрядного элемента	Краткое описание
	<p>1П. Элемент моделирует отсутствие изолирующего покрытия между близко расположенными металлическими шинами.</p>
	<p>2П. Элемент моделирует пробой промежутка с щелевидным дефектом (царапина, трещина) изолятора на одном из электродов.</p>
	<p>3П. Элемент моделирует частичное отсутствие изолирующего покрытия в печатном монтаже.</p>
	<p>4П. Элемент моделирует дефект изоляции на острых кромках металлических шин.</p>

Изображение разрядного элемента	Краткое описание
	<p>5П. Элемент моделирует частичное нарушение изоляции на поверхности близко расположенных параллельно идущих в диэлектрической среде круглых проводников.</p>
	<p>6П. Элемент моделирует щелевидный дефект изолирующей стенки между близко расположенными параллельными круглыми проводниками.</p>
<p>Аксиально-симметричные (цилиндрические) конфигурации</p>	
	<p>1Ц. Элемент моделирует нарушение изоляции на вершине острых металлических выступов конической формы.</p>

Изображение разрядного элемента	Краткое описание
	<p>2Ц. Элемент моделирует дефект в форме круглого отверстия (след пузырька в лаковом покрытии) в диэлектрическом покрытии одного из электродов.</p>
	<p>3Ц. Элемент моделирует торцевой обрыв коаксиального кабеля.</p>

Во всех этих задачах с целью разумного ограничения фазового пространства варьируемых параметров будут заданы фиксированные значения следующих величин: $\epsilon = 4$ – относительная диэлектрическая проницаемость изоляторов; $d = 2$ мм – длина основного разрядного промежутка вдоль направления вектора напряженности электрического поля; $\gamma_1 = 0,1$ – коэффициент вторичной ион-электронной эмиссии на поверхности проводников; $R_l = 0,5$ мм – радиусы тонких круглых проводников. Остальные обозначенные параметры (другие размеры, углы) можно дискретно варьировать при моделировании так, чтобы просчитывались несколько вариантов величин.

В данной работе представлено исследование одной из таких конфигураций – микропромежуток между корпусом блока или дорожкой платы без лакового покрытия и дорожкой с нарушенным защитным лаковым покрытием в виде трещины или царапины (тестовая задача 2П), чтобы

получить диаграммы критических параметров (полученные результаты также частично представлены в [Отчет о ПНИ «Разработка методов комплексной диагностики бортовой аппаратуры космических аппаратов на устойчивость к дугообразованию». Этап 2. Соглашение № 14.607.21.0008 от 05.06.2014; Simulation of primary discharge ignition in spacecraft electronic equipment/ L.A. Zjulkova, A.V. Kozyrev, V.M. Karaban, D.S. Kosov, S.A. Popov, E.V. Nefedtsev// Proceedings of the 27th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV 2016) – Suzhou, China, 18-23 September, 2016, Vol. 2, pp. 790 – 793]).

Основные параметры, которые можно выделить на основе предварительного теоретического анализа разрядных процессов, – это давление и род газа, а также коэффициент вторичной ион-электронной эмиссии поверхности диэлектрика, подверженной воздействию низкотемпературной плазмы от внешнего источника (инициирующий дуговой разряд). Важным физическим параметром, влияющим на процесс дугообразования, является способность материалов накапливать на поверхности и в объеме сторонние заряды, которые могут создавать электрические поля, влияющие на возможность дугообразования.

Для изучения микрозарядов в работе [A.V. Kozyrev, V.Yu. Kozhevnikov and N.S. Semeniuk, "Theoretical simulation of a low pressure gas breakdown in the gap with combined metal-dielectric electrodes," XXVI Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum - Mumbai, pp. 29-32, India – 2014] предложено применить двумерную (двухмоментную "жидкостную" модель) модель в дрейфово-диффузионном приближении [Райзер Ю.П. *Физика газового разряда*. - М.: Наука, 1987]. Существует большое разнообразие таких моделей. Все они используют упрощенное описание движения электронов и ионов. Двухмоментная модель состоит из двух уравнений непрерывности для плотности электронов n_e и плотности энергии n_ε , и k -уравнений непрерывности для концентрации ионов каждого n_k

$\propto \rho \omega_k$ (ρ - плотность всех ионов, ω_k - массовая доля k -го компонента смеси) [R. J. Kee, M. E. Coltrin, and P. Glarborg, *Chemically Reacting Flow Theory and Practice*. Wiley, 2003] и уравнения Пуассона для электростатического потенциала V

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{G}_e &= R_e, \\ \frac{\partial n_\varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{G}_\varepsilon + \mathbf{E} \cdot \mathbf{G}_e &= R_\varepsilon, \\ \rho \frac{\partial \omega_k}{\partial t} &= \nabla \cdot (\rho \omega_k \mathbf{U}_k) + R_k, \\ \nabla^2 V &= -\frac{q}{\varepsilon_0} \left(\sum_{k=1}^N Z_k n_k - n_e \right), \\ \mathbf{E} &= -\nabla V, \end{aligned} \quad (7)$$

где q – заряд электрона, ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, \mathbf{U}_k – многокомпонентная диффузионная скорость, Z_k – заряд k -го иона.

Плотность электронов и потоки энергии приведены в дрейфово-диффузионном приближении, как и многокомпонентные диффузионные

$$\begin{aligned} \mathbf{G}_e &= -\mu_e n_e \mathbf{E} - D_e \nabla n_e, \\ \mathbf{G}_\varepsilon &= -\mu_\varepsilon n_\varepsilon \mathbf{E} - D_\varepsilon \nabla n_\varepsilon, \\ \mathbf{U}_k &= \sum_{j=1}^2 \tilde{D}_{kj} \frac{\left[\nabla p_k - \omega_k \nabla p - \rho_k \mathbf{g}_k + \omega_k \sum_{s=1}^2 \rho_j \mathbf{g}_j \right]}{cRT} \end{aligned} \quad (8)$$

где \tilde{D}_{kj} - многокомпонентные коэффициенты диффузии Максвелла-Стефана, p – общее давление, p_k – парциальное давление k -го компонента смеси, \mathbf{g}_k – электрическая сила на единицу массы k -го компонента смеси, c – молярная концентрация, R – универсальная газовая постоянная, T – температура газа.

Подвижность электронов μ_e взята из экспериментальных данных [P. Lamp, R. Eibl, G. Buschhorn, “Measurement of electron mobility in liquid and gaseous argon at low electric field strength and in the critical region,” in 10th International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids, 1990. ICDL 1990. Conference Record., Grenoble, 1990, pp. 39-45], и коэффициенты диффузии определялись из следующих выражений

$$D_e = \frac{2}{3} \mu_e \bar{\varepsilon} / q, \mu_e = \frac{5}{3} \mu_e, D_e = \frac{2}{3} \mu_e \bar{\varepsilon} / q, \quad (9)$$

где $\bar{\varepsilon} = n_e / n_e$ – средняя энергия электронов.

В дополнение к условиям конвекции и диффузии правая часть (7) содержит относительную скорость электронов и условия потерь/роста энергии, которые определяются из следующих интегральных представлений, включающих сечения соответствующих процессов

$$\begin{aligned} R_e &= N n_e \sqrt{\frac{2q}{m}} \int_0^\infty \varepsilon \sigma_i(\varepsilon) f(\varepsilon) d\varepsilon, \\ R_e &= N n_e \Delta \varepsilon_i \sqrt{\frac{2q}{m}} \int_0^\infty \varepsilon \sigma_i(\varepsilon) f(\varepsilon) d\varepsilon + \\ &+ N n_e \Delta \varepsilon_e \sqrt{\frac{2q}{m}} \int_0^\infty \varepsilon \sigma_e(\varepsilon) f(\varepsilon) d\varepsilon, \end{aligned} \quad (10)$$

где $f(\varepsilon)$ – функция распределения Дривестейна, N – число нейтральных атомов газа, определяемое из уравнения состояния, m – масса электрона, $\Delta \varepsilon_{e,i}$ – сумма потерь энергии электронов в одном акте рассматриваемого процесса (здесь, упругих (σ_e) и неупругих (σ_i) соударений). Одновременное решение дифференциальных уравнений в частных производных (7) обеспечивает пространственное распределение электрического поля и плотности компонентов плазмы во времени. Рекомбинация ионов на стенках разрядной камеры за счёт реакции поверхностной рекомбинации моделируется путем применения граничных условий. Для описания реакций на поверхности контакта диэлектрик-плазма по аналогии с процессами вторичной ион-электронной эмиссии с катода (третий коэффициент Таунсенда γ), вводится обобщённый коэффициент ионно-электронной эмиссии с подложки γ_{diel} [A. V. Kozyrev, V. Yu. Kozhevnikov, and N. S. Semeniuk, “Theoretical simulation of a low pressure gas breakdown in the gap with combined metal-dielectric electrodes,” in *Proc. ISDEIV*, Mumbai, India, 2014, pp. 29-32].

Система уравнений (7) с граничными и начальными условиями решалась методом конечных элементов в среде COMSOL Multiphysics с модулем Plasma на фиксированной расчетной сетке. Для достижения оптимального пространственного разрешения и сходимости применялись разные конечно-разностные сетки для областей вблизи электродов и контакта металл-диэлектрик. Для обнаружения установившихся состояний, относящихся к стационарному самоподдерживающемуся разряду, расчетное время можно ограничить 1 мс.

Предложенная физическая модель микроразряда позволяет полностью смоделировать самостоятельный разряд в определенных условиях. Широкий диапазон рабочих давлений ограничен только пределами применимости дрейфово-диффузионного приближения. Возможности моделирования разрядов между элементами бортового оборудования в значительной степени улучшаются благодаря введению эффективных параметров, характеризующих вторичную эмиссию электронов с поверхностей катода и диэлектрической подложки. После численного моделирования, можно получить многомерную диаграмму критических параметров. Эти диаграммы представляют собой временные профили тока разряда, в зависимости от давления, вторичной эмиссии и геометрических параметров задачи. В отличие от простейшего условия самоподдержания разряда (закона Пашена), полученные описанным выше способом диаграммы критических параметров дают всестороннюю информацию о возможности зажигания разряда для определенных конфигураций.

Исследуемая конфигурация 2П состоит с одной стороны из диэлектрической подложки с проводящей дорожкой (металлической фольгой), внешнее лаковое диэлектрическое покрытие имеет щелевидный дефект (царапина или трещина на дорожке), а с другой стороны – металлическая

поверхность (корпус или еще одна дорожка без защитного диэлектрического лакового покрытия), а между ними – аргон (Рисунок 1).

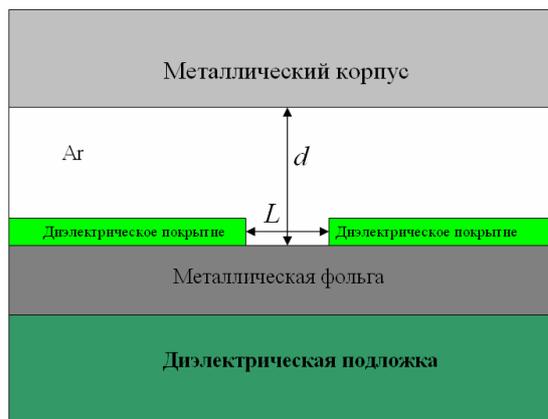


Рис. 1. Схематическая конфигурация микрозазора между металлическим корпусом и проводником с дефектом внешнего лакового покрытия в форме щели.

Поверхность металлической фольги покрыта диэлектрическим слоем толщиной 150 мкм с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 4.5$ и щелевидным дефектом (царапины) внешнего лакового диэлектрического покрытия длиной L . Инициирование реального разряда происходит с помощью искрового плазменного генератора импульсов, расположенном на некотором расстоянии от разрядного промежутка, создавая в зазоре однородную начальную концентрацию плазмы $n_0(0) = 10^{14} \text{ м}^{-3}$. Разница потенциалов между металлической фольгой и металлическим корпусом в модели считалась постоянной ($V_0 = 100 \text{ В}$). Боковые стенки корпуса расположены на значительном расстоянии от разрядного промежутка. Газоразрядный промежуток был заполнен аргон. Выбор аргона в качестве рабочего газа был обусловлен простотой его плазмохимической кинетики и хорошо известными сечениями [A. V. Phelps, and Z. Lj. Petrovic, “Cold-cathode discharges and breakdown in argon: surface and gas phase production of secondary electrons,” *Plasma Sources Sci. Technol.* 8 (1999) p.21–44] всех соответствующих элементарных процессов. В расчет брались только упругие и ионизационные столкновения, всеми электронно-возбужденными состояниями и реакциями с ними пренебрегается для упрощения модели. Рабочее давление могло меняться от атмосферного до

минимального предела применимости диффузионно-дрейфового приближения ~ 100 мТорр.

Для исследуемой конфигурации в среде COMSOL Multiphysics с плазменным модулем был подготовлен файл с заданием геометрии и исходных данных для расчета. Вероятный критический уровень давления p_{cr} может быть найден из $p_0d = 1$ см·Торр. Задавая p_{cr} в качестве начального давления p_0 , проводился расчет для различных значений коэффициента вторичной эмиссии диэлектрика γ_{diel} в диапазоне от 0.2 до 1.2. Границу существования самостоятельного разряда можно определить из зависимости от времени тока разряда. Тестируемая задача считалась решенной, если ток выходил на стационарное значение. После этого временные зависимости разрядного тока могут быть рассчитаны в широком диапазоне давлений от $0.1p_0$ до $10p_0$ с шагом $0.1p_0$ для определённой величины γ_{diel} . Границу существования самостоятельного разряда можно также определить по зависимости тока разряда от времени. Если диапазон критических значений определен, то перебор производится с меньшим шагом. В результате могут быть получены двумерные диаграммы в фазовой плоскости: давление p - коэффициент вторичной эмиссии диэлектрика γ_{diel} . Тестовая задача считается успешно решенной, если на фазовой диаграмме четко выделяется зона повышенного тока разряда. В итоге, для тестовой задачи может быть сформирован выходной пакет с изображениями пространственных распределений концентрации электронов, распределений электрического потенциала и зависимости тока разряда от времени.

Выберем расстояние между проводниками $d = 2$ мм, тогда критическое давление газа $p_{cr} = 666.6$ Па можно найти в соответствии с условием $p_0d = 1$ см·Торр. Результаты моделирования плазмы в конфигурации с щелевидным

дефектом внешнего лакового диэлектрического покрытия можно рассмотреть при изменении длины дефекта (царапины) L .

Рассмотрим эволюцию пространственной структуры разряда. Сначала на фоне изначально однородной начальной концентрации плазмы происходит быстрое перераспределение электрического потенциала в типичную для прикатодного слоя область сильного поля. Затем, спад начальной концентрации плазмы, начинающейся в основной части промежутка, где напряженность электрического поля не в состоянии обеспечить ионизацию электронным умножением. А в прикатодной области вторичная эмиссия электронов и сильное электрическое поле способствуют увеличению концентрации плазмы.

На данной стадии процесс может протекать различными способами:

1) распад объемной плазмы и дрейф к аноду быстрой вторичной плазмы приводят к выравниванию электрических потенциалов и снижению ионизации;

2) увеличение концентрации катодной плазмы обеспечивает существование сильного поля вблизи катода и последующее формирование стабильной независимой структуры тлеющего разряда.

Распад первоначальной плазмы наблюдается при низких давлениях, где скорость ионизации не компенсирует уход заряженных частиц из промежутка. Этот сценарий при давлении газа $0.1p_{cr}$ Па проиллюстрирован на рисунке 2.

Другой сценарий, завершающийся формированием самостоятельного разряда, реализуется при давлениях около 1 кПа и выше. Пример установившиеся структуры электронной плотности представлен на рисунке 3.

Для примера можно рассмотреть двумерные диаграммы критических параметров для исследуемой конфигурации при двух различных значениях параметра L : при $L = 1$ мм (двумерная диаграмма критических параметров для исследуемой конфигурации показана на рисунке 4,а) и для $L = 2$ мм (двумерная

диаграмма критических параметров для исследуемой конфигурации показана на рисунке 4,б).

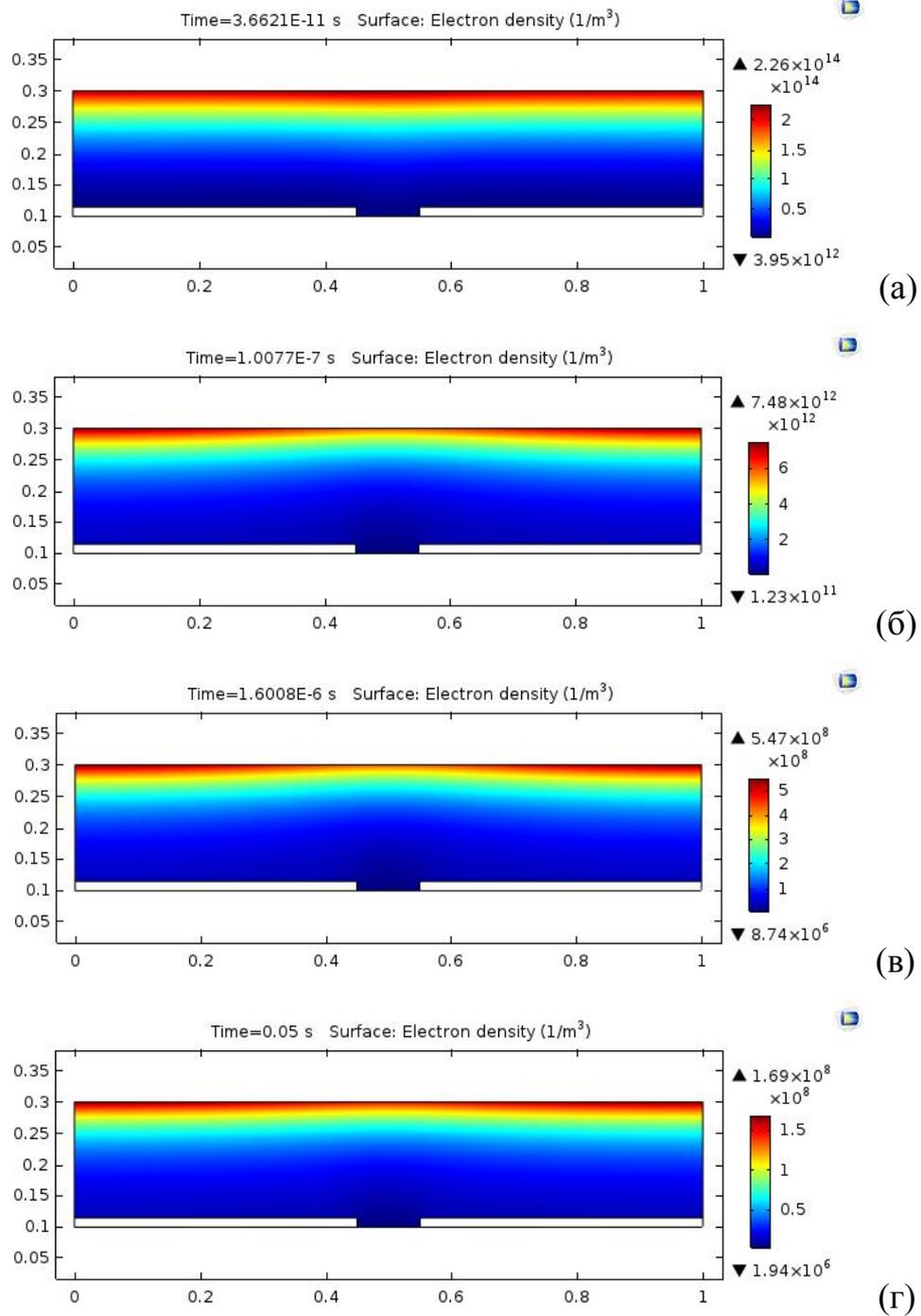


Рис. 2. Распад первоначального состояния плазмы ($p=0.1p_{cr} = 66.6$ Па, $L = 1$ мм, $d = 2$ мм, $\gamma_{\text{diel}} = 1.2$). Представлено пространственное распределение плотности электронов в различное время после зажигания, справа показана шкала уровня плотности электронов.

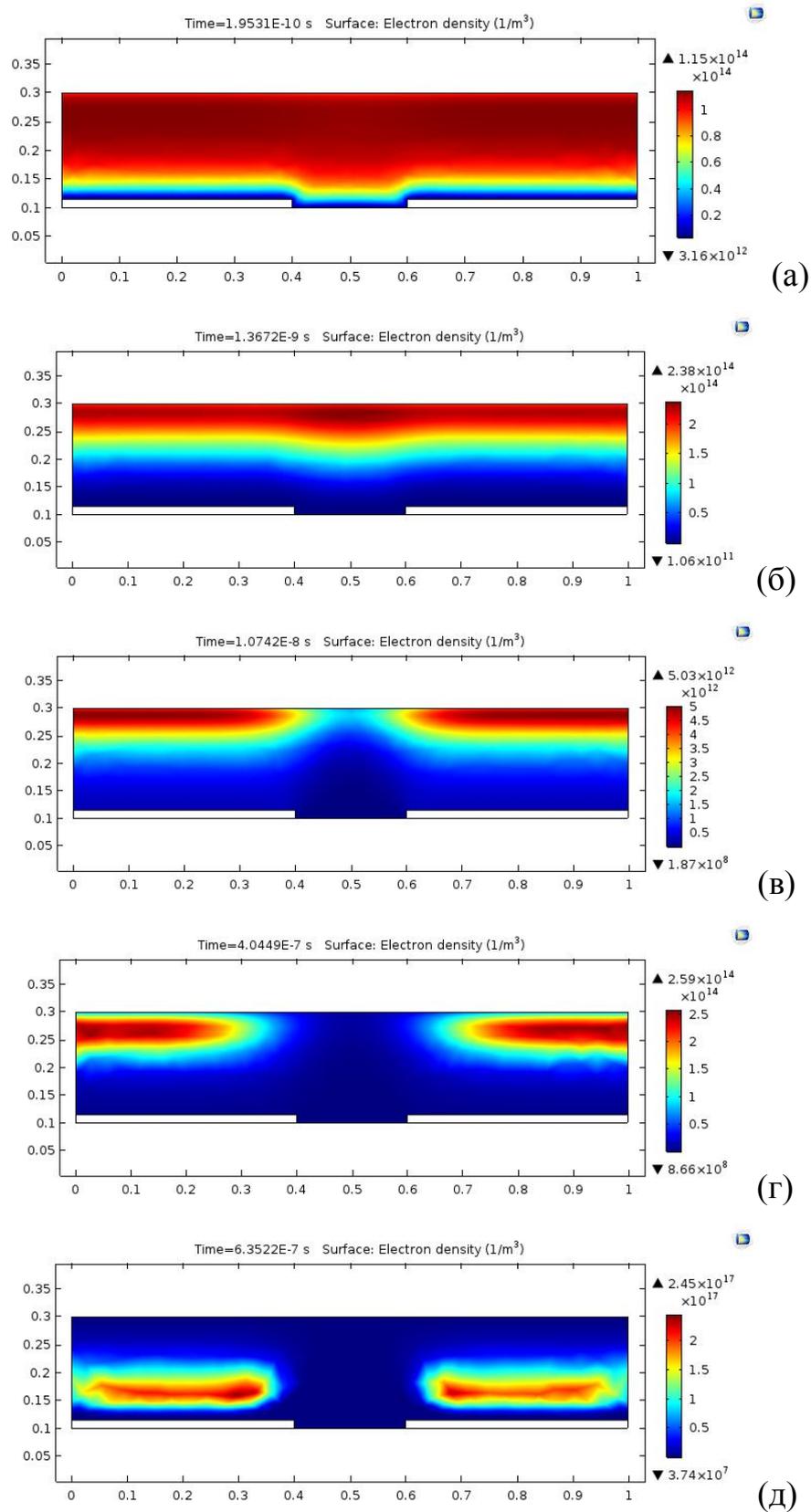


Рис. 3. Формирование структуры самостоятельного разряда ($p = 2p_{cr} = 1333.2$ Па, $L = 2$ мм, $d = 2$ мм, $\gamma_{diel} = 0.9$). Представлено пространственное распределение плотности электронов в различное время после зажигания, справа показана шкала уровня плотности электронов.

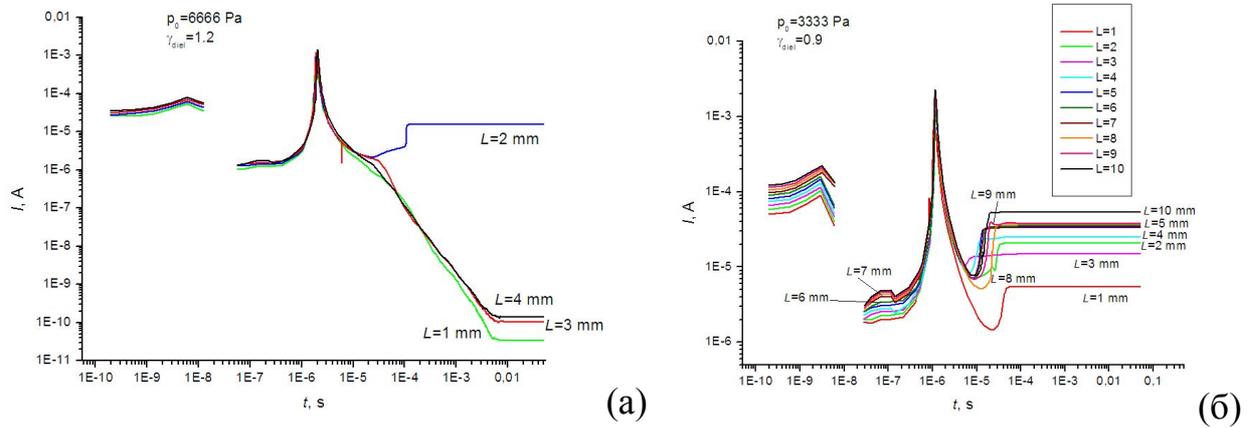


Рис. 4. Зависимости тока от времени для исследуемой конфигурации при изменении длины дефекта L в диапазоне: (а) $L = 1-4$ мм, $p_0=3333$ Па, $\gamma_{diel} = 1.2$ и (б) $L = 1-10$ мм, $p_0=6666$ Па, $\gamma_{diel} = 0.9$.

Рисунок 4 демонстрирует, что зависимость установившегося тока разряда от давления на диаграмме давление – среднее значение коэффициента эмиссии диэлектрика для исследуемой конфигурации при $L = 1$ мм и $L = 2$ мм значительно отличаются. Если при $L = 1$ мм потенциально опасным для стационарного горения является достаточно узкий диапазон параметров, то при $L = 2$ мм практически весь спектр параметров является потенциально опасным.

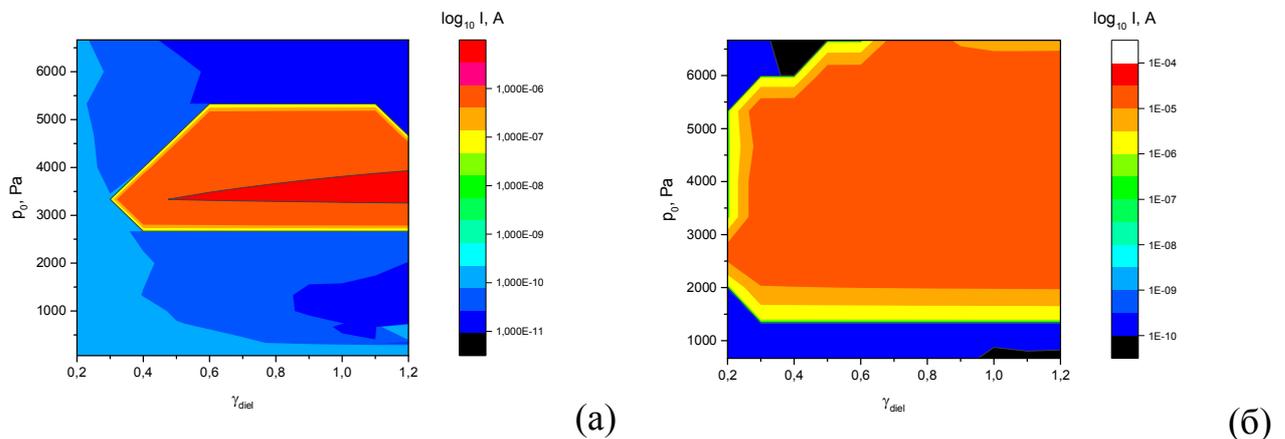


Рис. 5. Двумерные диаграммы критических параметров для исследуемой конфигурации при различных значениях L : (а) $L = 1$ мм и (б) $L = 2$ мм.

Рисунок 5 показывает, что при максимальном значении $\gamma_{diel} = 1.2$ и самом высоком давлении из исследуемого диапазона 6666 Па разряд сможет возникнуть только при двухмиллиметровом дефекта (Рис. 5,а), в то время как

при среднем давлении исследуемого диапазона 3333 Па и $\gamma_{diel} = 0.9$ разряд может зажигаться при любом дефекте миллиметрового размера (см. Рис.5,б).

Основные выводы по научно-исследовательской работе

1. Предложен модельный иерархический подход для диагностики бортового электронного оборудования, предназначенного для длительного автономного функционирования, характерного для космических аппаратов. Принципы, лежащие в основе иерархического тестирования, позволяют оптимизировать обнаружение подверженных разряду частей электронного оборудования вместо прямого численного решения масштабной вычислительной проблемы. Объединяя расчетные диаграммы в общую базу данных, можно получить возможность оценить безопасность отдельных узлов бортовых электронных устройств. Предложенный метод существенно упрощает процесс разработки разрядоустойчивого электронного оборудования, предназначенного для работы в трудных условиях космического пространства.

2. Разработаны алгоритмы и критерии возникновения ситуаций риска дугообразования, реализующиеся с различной вероятностью и с учетом физических условий внутреннего пространства модулей бортовой аппаратуры, состояния изоляции и электрических контактов бортовой кабельной сети космических аппаратов.

3. Составлен ряд тестовых конфигураций узлов радиоэлектронной аппаратуры, критических по отношению к возможному вторичному пробоя с образованием дугового разряда.

4. Проведено численное моделирование пробоя некоторых конфигураций, в частности, между металлическим корпусом и проводником с дефектом внешнего лакового диэлектрического покрытия в виде щели, определены его критические параметры.

Обоснование достоверности полученных результатов

Результаты исследования докладывались на международных конференциях 42ND IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON PLASMA SCIENCES (ICOPS 2015), Belek, TURKEY, MAY 24-28, 2015 и 27th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV 2016), Suzhou, China, 18-23 September, 2016.

В ходе выполнения Соглашения № 14.607.21.0008 от 05.06.2014 «Разработка методов комплексной диагностики бортовой аппаратуры космических аппаратов на устойчивость к дугообразованию» (информация о ходе выполнения проекта RFMEFI60714X0008 размещена на официальном сайте организации–исполнителя <http://www.hcei.tsc.ru/ru/cat/contracts/contracts.html>, выполнение проекта находилось под постоянным вниманием со стороны индустриального партнера ОАО «ИСС») автор приняла участие в III форуме молодых ученых U-NOVUS < <http://u-novus.ru/2016/> >, проходившем 12-13 мая 2016 года в г. Томске, где совместно с кандидатом технических наук В.М. Карабаном и Д.С. Косовым представляла выставочный стенд «Программный комплекс имитационного моделирования газоразрядных явлений, приводящих к дугообразованию в бортовой энергопреобразующей аппаратуре высоковольтных систем электропитания космических аппаратов». Также данный программный комплекс был представлен в качестве участника конкурса разработок в среде Comsol Multiphysics “Create the Future - 2016”, где попал в число дипломантов в номинации “Aerospace & Defense” (<https://contest.techbriefs.com/2016/entries/aerospace-and-defense/6919>).

Обоснование новизны и научной ценности результатов исследования

Новизна результатов исследования состоит в оригинальности постановки тестовых задач, их теоретическом описании, детальных расчетах газоразрядных процессов с выявлением диапазона параметров задач, потенциально допускающих вторичное дугообразование. Научная ценность обусловлена широким охватом возможных критических ситуаций, имеющих место в реальных элементах бортовой электрической аппаратуры космических аппаратов. Исследовательская часть выполнена на современном уровне понимания проблем в области теории газового разряда и плазменных

процессов. Новизна подтверждается публикациями в профильных научных изданиях.

Сведения об опубликовании результатов исследования в рецензируемых научных журналах

Theoretical Simulation of a Gas Breakdown Initiated by External Plasma Source in the Gap With Combined Metal-Dielectric Electrodes/ Andrey V. Kozyrev, Vasily Yu. Kozhevnikov, Natalia S. Semeniuk and Larisa A. Zyulkova. – IEEE Transaction on Plasma Science. – Vol. 43, No 8, August 2015, pp. 2294-2298.

Сведения о представлении результатов исследования на международных и всероссийских научных конференциях

1. TWO-DIMENSIONAL SIMULATIONS OF GAS DISCHARGE IGNITION IN SHORT GAPS AT VOLTAGE VALUES BELOW PASCHEN MINIMUM/ Kozhevnikov, Vasily Yu.; Kozyrev, Andrey V.; Zyulkova, Larisa A.; Semeniuk, Natalia S.// 42ND IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON PLASMA SCIENCES (ICOPS 2015), Belek, TURKEY, MAY 24-28, 2015.
2. Simulation of primary discharge ignition in spacecraft electronic equipment/ L.A. Zyulkova, A.V. Kozyrev, V.M. Karaban, D.S. Kosov, S.A. Popov, E.V. Nefedtsev// Proceedings of the 27th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV 2016) – Suzhou, China, 18-23 September, 2016, Vol. 2, pp. 790 – 793.

Сведения о личном вкладе аспиранта в получение результатов научного исследования

Совместно с научным руководителем работы профессором А.В. Козыревым был составлен план научных исследований, обсуждались задачи исследований и анализировались результаты. Совместно с профессором А.В. Козыревым, кандидатом физико-математических наук В.Ю. Кожевниковым и Семенюк Н.С. выполнялась отработка алгоритма и критериев возникновения самостоятельного разряда в бортовой аппаратуре космических аппаратов и набора тестовых геометрий для проведения численного моделирования.

Автором лично выполнялись численные расчеты, обрабатывались и анализировались полученные данные, готовились материалы для публикаций. Формулировка научных результатов проводилась совместно с научным руководителем.