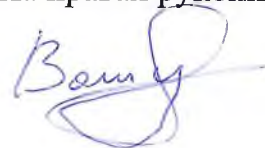


На правах рукописи



Валиуллин Валерий Владимирович

ВОЗДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА
ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ БАТАРЕИ КОСМИЧЕСКИХ
АППАРАТОВ

Специальность: 2.5.15. – Тепловые, электроракетные двигатели и
энергоустановки летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: **Надирадзе Андрей Борисович**, доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Твердохлебова Екатерина Михайловна**, доктор технических наук, Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (г. Королев), начальник Центра автоматических космических систем и комплексов.

Онуфриев Валерий Валентинович, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», профессор кафедры «Плазменные энергетические установки».

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва" (Самарский университет)

Защита диссертации состоится 26 декабря 2024 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.327.06, созданного на базе ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» или на сайте:

https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=182882

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета 24.2.327.06,
д.т.н., доцент



Краев Вячеслав Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

В настоящее время одним из перспективных направлений развития систем электропитания (СЭП) космических аппаратов (КА) является переход на высоковольтные солнечные батареи (БС) с рабочим напряжением от 100 и более вольт. Это позволяет существенно снизить массу СЭП и, соответственно, увеличить массу полезной нагрузки КА.

Яркой иллюстрацией этой тенденции является трехлетняя программа NASA (2001–2003 гг.) по разработке системы питания двигателя на эффекте Холла с так называемым прямым приводом – D2NET. Данная программа была направлена на значительное уменьшение сложности, массы и стоимости энергосистемы по сравнению с обычными низковольтными системами за счет применения БС с рабочим напряжением 300 В. Результаты выполнения этой программы послужили заделом для создания энергосистем следующего поколения, исследования которых ведутся в настоящее время.

Однако увеличение рабочего напряжения БС сопряжено с риском возникновения вторичных дуговых разрядов (ВДР), способных привести к разрушению элементов конструкции высоковольтных БС (ВБС) и значительному снижению их выходной мощности. Такие разряды могут быть инициированы первичными электростатическими разрядами (ЭСР), возникающими при электризации КА, находящихся в среде геомагнитной плазмы, а также плазмой электроракетных двигателей (ЭРД), которые широко применяются для управления полетом современных КА.

Первые аномалии в работе ВБС, связанные с электроразрядными явлениями, были зафиксированы в 1997 г. В период с 1997 по 2002 гг. было зарегистрировано 32 отказа по причине возникновения дуговых разрядов. Повреждения ВБС коммерческих телекоммуникационных спутников в результате дугового разряда за указанный период обошлись из-за убытков и расходов на перепроектирование более чем в 100 млн долларов. Пострадали и программы NASA.

Чтобы обеспечить надежную работу ВБС в космосе, необходимо создать эффективные средства защиты от дуговых разрядов, что является сложнейшей научно-технической и технологической задачей, сопряженной с глубоким

изучением физики процессов взаимодействия геомагнитной плазмы и плазмы ЭРД с элементами конструкции ВБС КА.

Успешное решение этих задач создаст условия для перехода на перспективные высоковольтные СЭП и значительно снизит аномалии, происходящие на ВБС КА в околоземном космическом пространстве.

В связи с изложенным **актуальность темы исследования** определяется: в научном плане – необходимостью развития современных теоретических представлений о процессах дугообразования на электродах ВБС, находящихся в плазменной среде ЭСР, в практическом отношении – необходимостью разработки эффективных средств защиты ВБС от дуговых разрядов и методов испытания ВБС в лабораторных условиях.

Данное исследование проведено в рамках научно-исследовательской работы «Проведение испытаний образцов БС на несущей конструкции различных типов в вакуумной камере под воздействием электронов» (договор МАИ с АО «Сатурн» №498 от 14 декабря 2020 г.), составной части опытно-конструкторской работы «Проведение испытаний образцов БС на воздействие струй СПД» (договор МАИ с АО «Сатурн» №59840-02080 от 02 августа 2021 г.) и составной части опытно-конструкторской работы «Проведение испытаний образцов БС на воздействие струй СПД» (договор МАИ с АО «Сатурн» №59850-02080 от 16 марта 2022 г.), а также инициативных научно-исследовательских работ кафедры 208 МАИ.

Степень разработанности темы исследования.

Вакуумные дуговые разряды исследуются уже более 60 лет. Одна из первых классических работ в этой области принадлежит И.Г. Кесаеву. Значительный вклад в теорию вакуумных дуговых разрядов внес академик Г.А. Месяц. Существует множество других работ, в том числе современных, выполненных с применением мощных компьютерных программ моделирования, в которых раскрыты многие закономерности дуговых разрядов в вакууме. Однако практически все исследователи отмечают, что данная тема до конца не может быть раскрыта, поскольку кинетика дугового разряда во многом определяется спецификой электродов и среды, в которой происходит его горение.

Первые публикации по дуговым разрядам на ВБС появились за рубежом еще в начале 1970-х годов. В последующие годы выходило до нескольких сот

публикаций в год, что в общей сложности составило более 5 тыс. работ. К наиболее известным авторам можно отнести D.C. Ferguson, I. Katz, S. Hosoda, J. Kim, M. Cho и еще более 20 исследователей.

В России дуговые разряды между электродами БС впервые наблюдались в 1987 г. Л.С. Новиковым, В.А. Летиным, Л.С. Гоценко. В связи с распадом СССР в 1991 г. исследования в этом направлении практически полностью остановились. Исследования возобновились только после 1995–2000 гг. Были опубликованы работы Г.В. Бабкина, Н.И. Ягушкина, А.И. Акишина. Но общее количество публикаций по данной тематике в отечественных изданиях до недавнего времени не превышало 15.

Вопросы взаимодействия геомагнитной плазмы с поверхностями КА в рамках проблемы электризации в России исследовались Л.С. Новиковым, М.П. Бургасовым, О.С. Графодатским, В.М. Антоновым, А.Г. Пономаренко и многими другими учеными.

Отдельным блоком этих исследований являются работы, направленные на изучение процессов в твердом теле при их радиационном облучении потоками магнитосферной плазмы. Эти процессы чрезвычайно сложны и многообразны и до сих пор не имеют единого, общепризнанного модельного описания. Наиболее известными специалистами в этой области являются Н.И. Ягушкин, Э.А. Гостищев, А.И. Сергеев, В.И. Шаповалов, H.J. Fitting, N. Cornet, X. Meyza.

Большой пласт работ посвящен дуговым разрядам на ВБС, инициированным первичными ЭСР, а также устойчивости высоковольтных СЭП к дугообразованию. Среди отечественных специалистов в этой области следует отметить В.М. Зыкова и В.А. Батракова с их учениками.

Вопросы взаимодействия плазмы ЭРД с поверхностями КА изучены существенно меньше. Однако и в этой области имеется большое количество работ, включая программные продукты (например, SPIS), позволяющие моделировать эти процессы. Наиболее известными авторами в этой области являются M. Takahashi, Wartelski Matias, Theroude Christophe, Azziz Yassir.

Еще в меньшей степени изучены электроразрядные явления, протекающие на открытых электродах высоковольтных БС в плазме ЭРД. Имеется множество экспериментальных работ, показывающих, что такие разряды возможны и могут приводить к разрушению конструкции БС. В этой

области наиболее известны работы M. Cho, T. Shneider, T.W. Kerslake, D. Ferguson, G.A. Jongeward, I.G. Mikellides, D.E. Hastings и ряда других авторов. Несколько работ посвящены определению токов утечки через плазму ЭРД и ионосферную плазму, например, работы Е.М. Твердохлебовой, А.Г. Корсуна, V. Khaums.

Однако несмотря на большое количество работ в этой области, до сих пор отсутствуют модели, описывающие развитие дуговых разрядов на электродах ВБС, находящихся в плазменной среде ЭРД, а также критерии, позволяющие определить возможность возникновения дуговых разрядов во время проведения испытаний и в условиях летной эксплуатации ВБС.

Исходя из этого были выбраны объект и предмет исследования, сформулированы цели и задачи исследования, выбраны методы решения поставленных задач.

Объект исследования: процессы взаимодействия геомагнитной плазмы и плазмы ЭРД с поверхностями высоковольтных БС КА.

Предмет исследования: основные закономерности и критерии возникновения электрических разрядов на диэлектрических поверхностях и на открытых электродах высоковольтных БС КА в плазме ЭРД.

Цель исследования: разработка моделей взаимодействия плазмы ЭРД с ВБС КА, формулировка критериев возникновения дуговых разрядов на открытых электродах ВБС.

Задачи исследования:

1. Разработка математической модели накопления и релаксации электрического заряда в диэлектрических материалах ВБС под действием геомагнитной плазмы и плазмы ЭРД. Численное исследование возможности возникновения электрического пробоя радиационно-заряженного диэлектрика при воздействии на него плазмы ЭРД;

2. Экспериментальное определение токов утечки и условий возникновения дуговых разрядов на положительно и отрицательно смещенных электродах в зависимости от концентрации плазмы, потенциала и материала электродов;

3. Разработка феноменологической модели возникновения и развития электрического разряда на открытых электродах высоковольтной БС, формулирование критериев перехода этого разряда в дуговой режим;

4. Разработка инженерной модели для оценки потенциалов и токов утечки с электродов полноразмерной высоковольтной БС, определение возможности возникновения дугового разряда между электродами высоковольтной БС.

Научная новизна результатов исследования:

1. Разработана физико-математическая модель взаимодействия плазмы ЭРД с поверхностью радиационно-заряженных диэлектрических материалов ВБС КА;

2. Численно показано, что при появлении плазмы ЭРД над поверхностью радиационно-заряженного защитного стекла солнечных элементов пробоя в стекле не возникает. Накопленный в объеме стекла отрицательный электрический заряд сохраняется, но компенсируется положительными зарядами, локализованными в тонком приповерхностном слое;

3. Разработана феноменологическая модель возникновения и развития дугового разряда на положительно смещенных электродах высоковольтной БС в плазме ЭРД;

4. Сформулированы критерии возникновения дуговых разрядов на открытых электродах высоковольтной БС в плазме ЭРД;

5. Определены характерные значения потенциала и токов утечки через плазму ЭРД с электродов высоковольтной БС;

6. Показано, что на открытых электродах ВБС КА с ЭРД могут возникать условия для развития дуговых разрядов.

Теоретическая и практическая значимость результатов исследования:

1. Полученные экспериментальные данные позволяют обосновать выбор конструктивных элементов ВБС, параметры системы измерений и режимы испытаний ВБС на устойчивость к дугообразованию в плазме ЭРД;

2. Выработаны рекомендации, позволяющие снизить риск возникновения разрядных явлений на высоковольтных БС КА, работающих в плазме ЭРД;

3. С использованием предложенных моделей и критериев возникновения дуговых разрядов на ВБС разработана и успешно реализована

Программа-методика испытаний ВБС перспективного КА с ЭРД (акт внедрения АО «Сатурн» № 45/22-24 от 30.09.2024).

Методология и методы исследования.

В работе использованы экспериментальные и теоретические методы исследования. В экспериментах применялись современные методы регистрации параметров плазмы и электрического разряда. Физико-математические, феноменологические и инженерные модели, представленные в работе, построены на известных принципах физики конденсированного состояния, физики вакуумных разрядов и теории электрических зондов Ленгмюра.

Положения, выносимые на защиту:

1. Физико-математическая модель накопления и релаксации электрического заряда в диэлектрических материалах ВБС под действием геомагнитной плазмы и плазмы ЭРД и результаты численных исследований, полученные с ее использованием;
2. Результаты экспериментального исследования характеристик вакуумных разрядов на модельных электродах ВБС в плазме ЭРД;
3. Феноменологическая модель развития дугового разряда на положительно смещенных электродах высоковольтной БС в плазме ЭРД;
4. Критерии возникновения дуговых разрядов на положительно и отрицательно смещенных электродах высоковольтной БС в плазме ЭРД;
5. Инженерная модель для оценки потенциалов и токов утечки с электродов полноразмерной высоковольтной БС и результаты численного моделирования, полученные с ее использованием.

Степень достоверности и обоснованности результатов исследований.

Достоверность результатов экспериментальных исследований обеспечена применением современных методик измерений, сбора и обработки данных. Все экспериментальные работы проводились на аттестованном оборудовании. Обоснованность теоретических результатов обусловлена корректным выбором исходных положений, основных допущений и ограничений при постановке задач. Результаты расчетов подтверждаются экспериментальными данными, полученными как в данной работе, так и в работах других исследователей.

Вклад автора в проведенное исследование.

1. В расчетно-теоретической части: разработка всех представленных в работе моделей, проведение расчетов, оценка параметров и верификация моделей с использованием экспериментальных данных.

2. В экспериментальной части: постановка и проведение всех экспериментальных исследований, разработка и изготовление экспериментальных узлов и системы автоматизации эксперимента, обработка и анализ полученных экспериментальных данных.

Апробация результатов работы.

Результаты работ были доложены в рамках 11 российских и международных конференций: 19-й, 20-й, 21-й, 22-й Международных конференций «Авиация и космонавтика» (Москва, 23–27 ноября 2020 г., 22–26 ноября 2021г., 21–25 ноября 2022г., 20–24 ноября 2023г.), XXI, XXIII, XXIV Межвузовской молодежной научной школы конференции имени Б.С. Ишханова «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине» (Москва, 23–24 ноября 2020 г., 23–24 ноября 2022г., 22–23 ноября 2023г.), XLVIII, XLIX Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения» (Москва, 10–12 октября 2022г., 11–14 апреля 2023г.), XXII Международной конференции по Вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2021) (Алушта, 4–13 сентября 2021г.), XIV Международной конференции по Прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (АММАГ'2022) (Алушта, 4–13 сентября 2022г.).

Публикации по теме диссертации.

Материалы диссертационной работы излагались в **16** печатных работах. Из них опубликовано **5** работ в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, в т.ч. **4** работы опубликовано по научной специальности 2.5.15. «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов» (технические науки) и **1** работа по смежной научной специальности 1.3.8. «Физика конденсированного состояния» (физико-математические, технические науки).

Структура и объем работы.

Диссертация изложена на 152 страницах машинописного текста, включает в себя 60 рисунков, 4 таблицы, а также 100 библиографических

ссылки. Работа разделена на введение, 4 главы содержательной части, заключение, список сокращений и условных обозначений, список литературы, приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается общая характеристика работы, обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены объект и предмет исследования, сформулированы цель работы и задачи для её достижения, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Представлены положения, выносимые на защиту, а также апробация результатов и публикации по теме диссертационной работы.

В первой главе рассмотрено современное состояние проблемы обеспечения устойчивости ВБС к дугообразованию в условиях воздействия геомагнитной плазмы и плазмы ЭРД. Приведены данные по конструктивным особенностям современных ВБС, применяемым в них материалам и технологиям изготовления, а также по условиям функционирования ВБС в космосе. В рамках проблемы электризации рассмотрены процессы, протекающие на поверхностях ВБС КА при воздействии на них магнитосферной плазмы. Дан краткий обзор литературы по взаимодействию плазмы ЭРД с ВБС, в части определения потенциалов, токов утечки и условий возникновения электрических разрядов. Показано, что плазма ЭРД может инициировать электроразрядные явления как в объеме, так и на поверхностях ВБС. В настоящее время отсутствуют модели и критерии, позволяющие оценить риск возникновения разрядов на ВБС. В связи с чем выбор расчетно-теоретических методов для исследования взаимодействия плазмы ЭРД с радиационно-заряженными поверхностями диэлектрических материалов ВБС, и экспериментальных методов для исследования разрядов на открытых электродах ВБС является обоснованным.

Во второй главе приведены результаты теоретических исследований взаимодействия радиационно-заряженных диэлектрических поверхностей ВБС (например, защитных стекол фотопреобразователей, изоляции кабелей, монтажных плат и т.п.) с низкотемпературной плазмой ЭРД (рисунок 1).

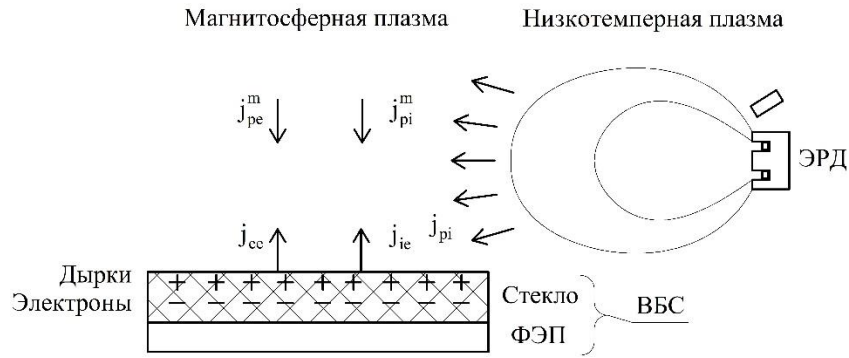


Рисунок 1 - Схема взаимодействия радиационно-заряженной диэлектрической поверхности ВЭС с низкотемпературной плазмой ЭРД

Механизм данного вида взаимодействия состоит в следующем.

В космосе на КА воздействуют потоки магнитосферной плазмы, что приводит к зарядке поверхности КА до отрицательных потенциалов порядка 1-10 кВ. Электроны магнитосферной плазмы, имеющие энергии 1-100 кэВ, проникают в диэлектрические материалы на глубину 1-10 мкм и захватываются кристаллической решеткой. Когда при включении ЭРД над поверхностью радиационно-заряженного диэлектрика появляется плазма, наличие в нем заряда может вызвать увеличение напряженности поля в диэлектрике выше предела электрической прочности (10^8 В/м). В результате может произойти пробой диэлектрика, сопровождающийся его разрушением.

С целью определения условий возникновения таких пробоев в диссертации была разработана физико-математическая модель взаимодействия плазмы ЭРД с радиационно-заряженным диэлектриком.

За основу взята так называемая «конденсаторная» модель (рисунок 2), в которой внедренные электрические заряды локализованы на внутренней обкладке, расположенной на глубине среднего пробега электронов, а носители зарядов, образованные в результате процессов вторичной электронной эмиссии и взаимодействия ионов с поверхностью – в тонком приповерхностном слое, толщиной в несколько атомных слоев. Такой подход

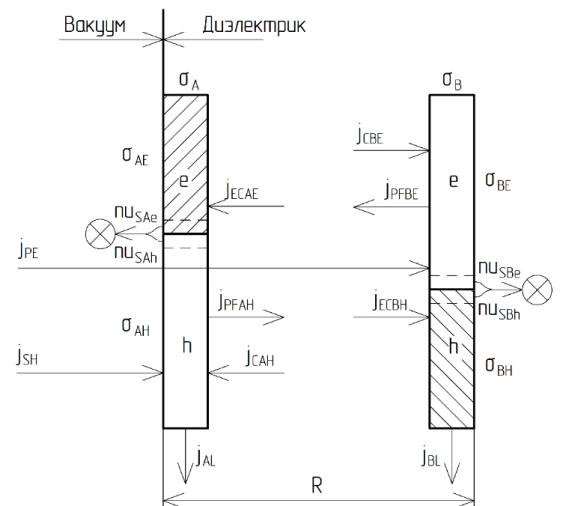


Рисунок 2 - Схема «конденсаторной» модели

заключается в том, что заряды, локализованные на внутренней обкладке, создают электрическое поле, которое усиливается в тонком приповерхностном слое. Такой подход позволяет учитывать влияние радиационно-заряженной поверхности на взаимодействие с плазмой.

позволяет определять все требуемые характеристики из уравнений баланса токов:

$$\begin{cases} \sigma_A = \int_0^t j_A dt \\ \sigma_B = \int_0^t j_B dt \end{cases} \quad (1)$$

в которых j_A, j_B – плотности тока носителей заряда, текущих на «обкладки».

Данная модель имеет достаточно убедительное теоретическое обоснование и применяется многими авторами. В данной работе в модели были учтены процессы транспорта носителей заряда, влияющие на кинетику процессов накопления и релаксации зарядов, а также процессы взаимодействия диэлектрика с плазмой ЭРД. Плотность ионного тока на поверхность диэлектрика определялась в рамках зондовой теории.

Адекватность модели была подтверждена путем сравнения результатов расчета с имеющимися экспериментальными данными (рисунок 3).

С помощью разработанной модели были проведены численные исследования процессов взаимодействия плазмы ЭРД с поверхностью радиационно-заряженных диэлектриков (рисунок 4).

Было установлено, что все процессы взаимодействия ионов плазмы с заряженной поверхностью в конечном итоге приводят к образованию в приповерхностном слое диэлектрика положительных зарядов («дырок»). При этом напряженность поля в объеме диэлектрика возрастает, но остается на несколько порядков величины ниже пробойных значений (рисунок 4а), поэтому пробоя диэлектрика происходить не будет.

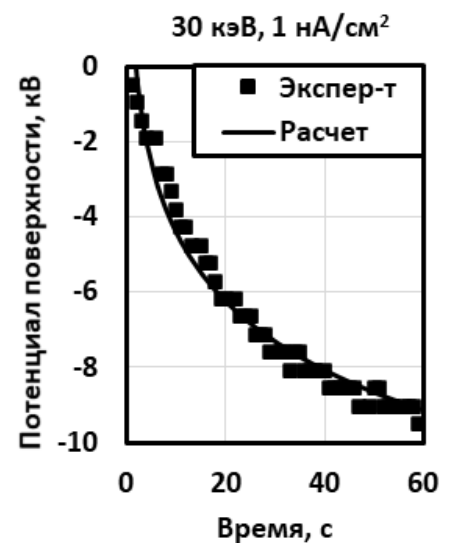


Рисунок 3 – Сравнение модели и эксперимента

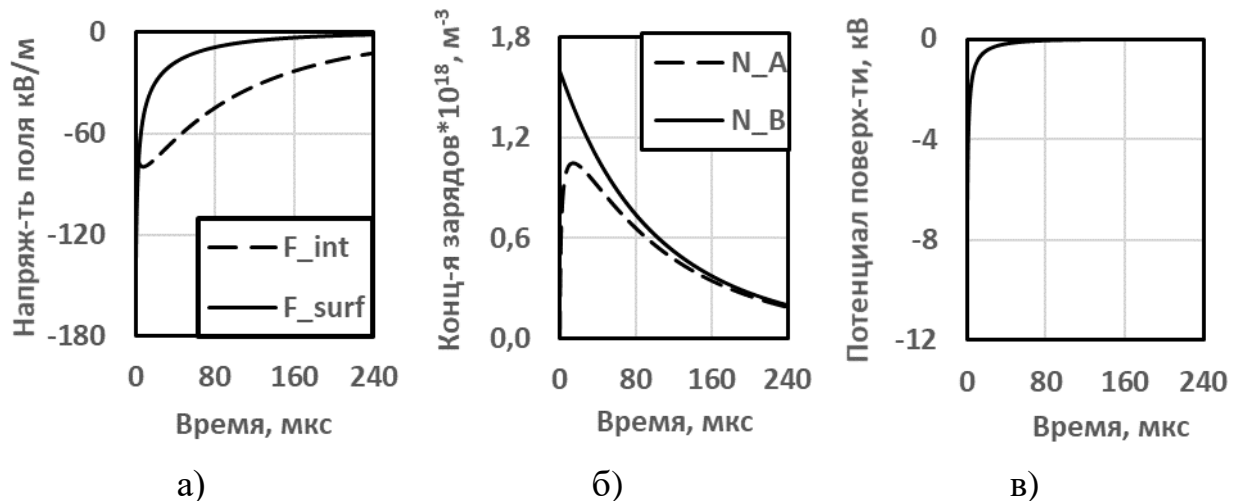


Рисунок 4 - Результаты численных исследований взаимодействия плазмы ЭРД с радиационно-заряженным диэлектриком

Накопленный в объеме отрицательный заряд (N_B) не успевает рекомбинировать с положительным зарядом «дырок» (N_A). В результате этого потенциал и напряженность поля поверхности (F_{surf}) падают (рисунок 4в), а заряд и напряженность поля в объеме (F_{int}) сохраняются (рисунок 4б).

Теперь остается вопрос произойдет ли пробой на шинках ВБС при появлении низкотемпературной плазмы ЭРД. Для ответа на этот вопрос необходимы экспериментальные исследования.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований электроразрядных явлений на модельных электродах ВБС.

Схема экспериментов приведена на рисунке 5.

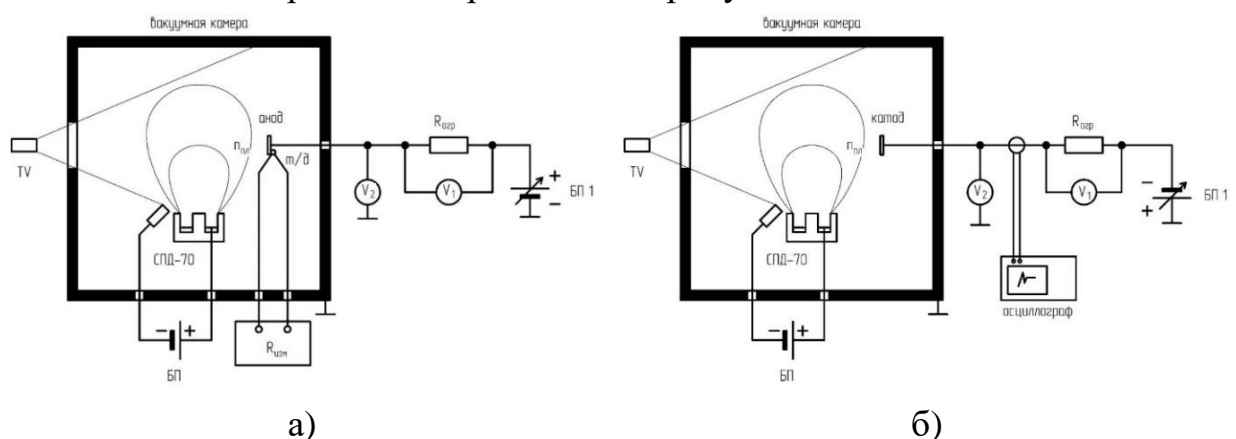


Рисунок 5 - Схемы экспериментов по исследованию разрядов на анодах (а) и катодах (б) в плазме ЭРД

Исследования проводились в вакуумной камере стенда «ПП-2» МАИ объемом 2 м^3 . В качестве источника плазмы использован двигатель типа СПД-70, работающий на ксеноне при напряжении разряда 290 В и токе разряда

1,45 А. Давление в вакуумной камере при работающем двигателе составляло 5×10^{-5} торр.

Для исследований были изготовлены модельные образцы электродов ВБС (рисунок 6), содержащие аноды диаметром 2, 5 и 10 мм (поз. 7,6,5), выполненные из меди и катоды диаметром 40 мм, выполненные из углепластика, нержавеющей стали, меди и алюминиевого сплава (поз. 1,2,3,4). На анодах были установлены резистивные датчики температуры. Электроды были закреплены в обойме из стеклотекстолита и изолированы силиконовым герметиком. Всего было изготовлено 3 сборки по 7 электродов. Сборки были размещены в струе СПД на расстоянии 360, 700 и 1000 мм от среза двигателя под углом 58, 47 и 40° от оси струи, соответственно.

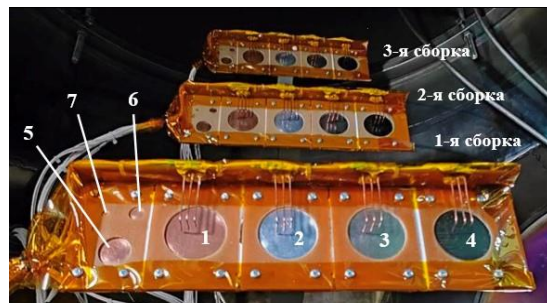


Рисунок 6 - Модельные образцы электродов ВБС

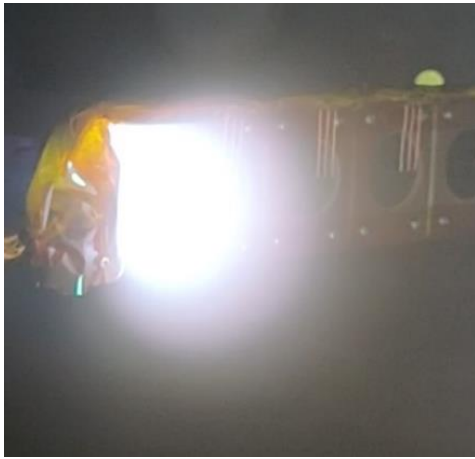
Концентрация плазмы в окрестности электродов составляла от 1×10^{14} (на сборке 3) до $5 \times 10^{14} \text{ м}^{-3}$ (на сборке 1), что соответствует концентрации плазмы у поверхности ВБС КА в летных условиях.

В ходе исследований измерялись вольт-амперные характеристики электродов в плазме СПД, температура электродов, условия возникновения разрядов, импульсы тока, возникающие при разрядах. Велась видеосъемка разрядных процессов, происходящих на электродах.

Проведенные эксперименты показали, что в плазме СПД на анодах и катодах могут возникать мощные дуговые разряды, приводящие к разрушению электродов и прилегающих к ним диэлектриков (рисунок 7).

Разряды на аноде возникают в результате выделения газов из диэлектриков, прилегающих к нагретому электроду. Нагрев электрода происходит электронами плазмы, ускоренными в электрическом поле анода.

При напряжении до 100-200 В ток анода линейно зависит от напряжения (рисунок 8). Температура анода постепенно увеличивается.



а)



б)

Рисунок 7 - Характерные дуговые разряды на анодах (а) и катодах (б)

С ростом напряжения линейность характеристики нарушается, что связано с ионизацией выделяющихся при нагреве анода газов. Когда концентрация нейтральных частиц и напряжение на электроде достигнут пороговых значений, разряд переходит в дуговой режим. Ток разряда при этом ограничивается предельным током источника питания на уровне 1,5 А.

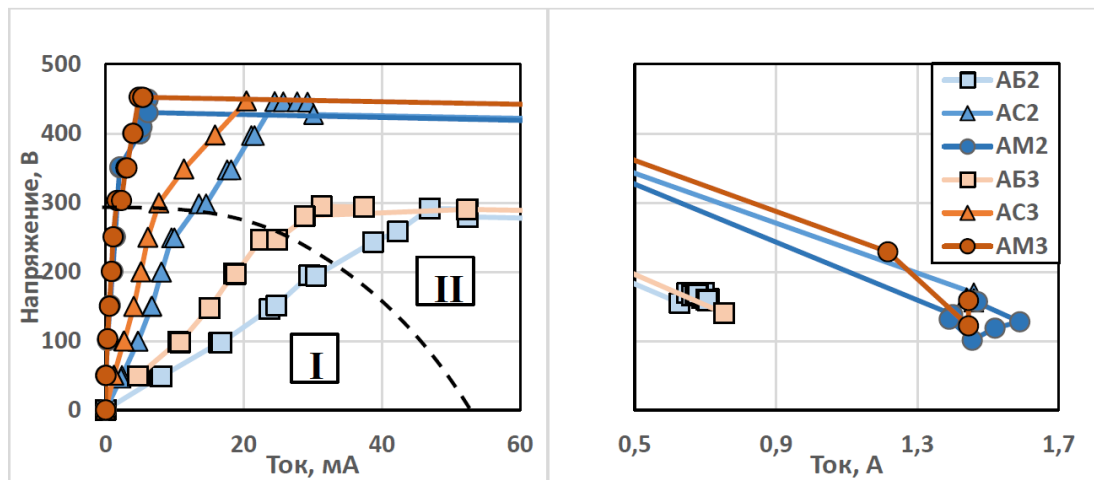


Рисунок 8 - Вольт-амперные характеристики дуговых разрядов на анодах

Для описания этих процессов была построена феноменологическая модель, учитывающая размножение электронов в газе за счет ионизации ускоренными электронами окружающей плазмы, тепловые процессы на аноде, зависимости анодного тока от напряжения на начальном участке вольт-амперной характеристики разряда. Расчеты по данной модели показали, что ионизация газов приводит к значительному увеличению тока электронов, отбираемых из окружающей плазмы. При этом вклад вторичных электронов в ток дугового разряда не превышает 10-20%.

Критерием возникновения дугового разряда на аноде является превышение температуры анода температуры пиролиза прилегающих диэлектриков.

Исследования разрядов в плазме ЭРД на катодах показали, что механизм их возникновения связан с образованием эмиссионных центров на неровностях или местах загрязнения поверхности катодов. При отрицательном напряжении на катоде в этих местах происходит локальный нагрев поверхности катода за счет взаимодействия с окружающей плазмой, сопровождающийся усилением эмиссии электронов. На это указывает и сильное влияние материала электродов на параметры и характер горения дуговых разрядов. Разряды на катодах из углепластика, содержащие значительное количество органического связующего, оказываются существенно более мощными, чем на металлических катодах.

Анализ осциллограмм показал, что при относительно небольших напряжениях происходят одиночные микроразряды, которые завершаются сгоранием выступов (рисунок 9а). По мере увеличения напряжения частота микроразрядов возрастает от 0,01 до 1 Гц. При этом количество эмиссионных центров увеличивается и множество микроразрядов сливаются в один непрерывный дуговой разряд (рисунок 9б).

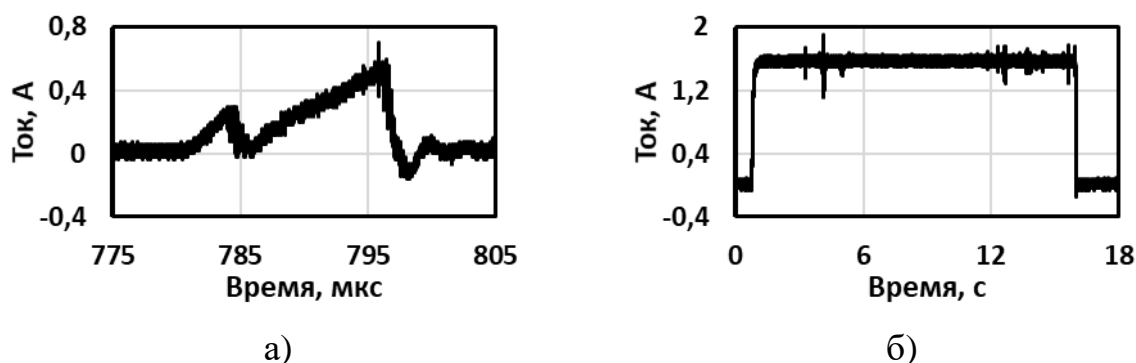


Рисунок 9 - Импульсы тока при разрядах на катодах

Характер линейного роста тока в начале разряда (рисунок 9а) говорит об увеличении эмиссии за счет локального нагрева выступов на поверхности катода. После перегорания выступа ток резко прекращается (рисунок 9б).

Наблюдающиеся закономерности развития разрядов на катодах в плазме ЭРД в целом соответствуют известным результатам исследований вакуумного дугового разряда, однако наличие плазмы и специфика применяемых на ВБС электродов существенно влияют на параметры и характер дуговых разрядов.

Критерием возникновения дуговых разрядов на катодах в плазме ЭРД является снижение отрицательного потенциала катода ниже 50 В относительно потенциала окружающей плазмы.

В четвертой главе представлена инженерная модель взаимодействия плазмы ЭРД с ВБС, позволяющая определить потенциалы электродов полноразмерной ВБС относительно плазмы ЭРД, электронные и ионные токи через электроды (токи утечки) и тепловые эффекты от протекания этих токов.

Схема формирования токов на открытых электродах ВБС и электрическая схема ВБС приведены на рисунке 10.

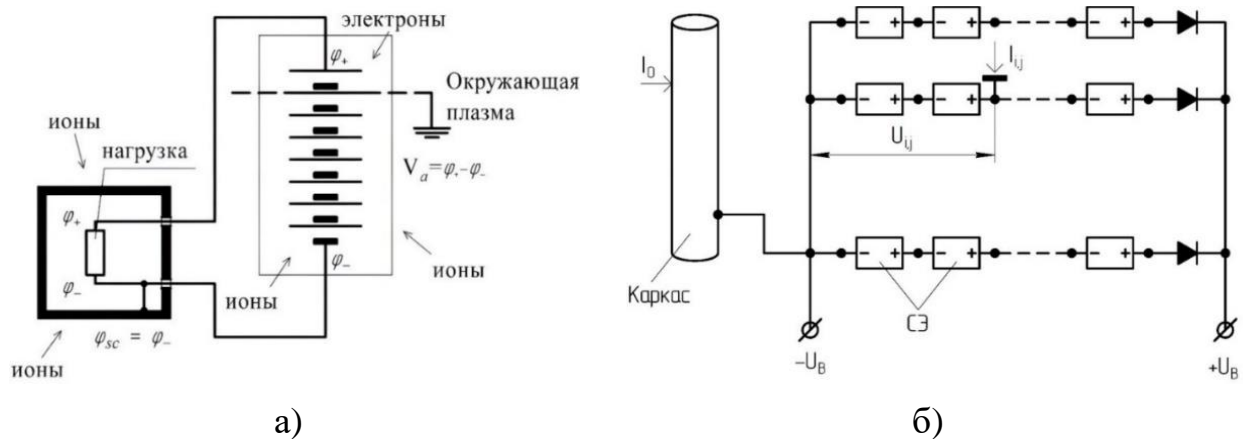


Рисунок 10 - Схема формирования потенциалов на электродах ВБС (а) и упрощенная электрическая схема ВБС (б)

Ионные токи оценивались исходя из параметров плазменной струи ЭРД в предположении, что потенциал электрода не оказывает существенного влияния на траектории ионов и, следовательно, на величину плотности тока.

Электронная составляющая тока на электроды, находящиеся под отрицательным потенциалом относительно окружающей плазмы, определялась по классической зондовой теории:

$$I_{i,j}^{(-)}(V^-) = J_{e,0} \exp\left(-\frac{eV^-}{kT_e}\right) A_{i,j}, \quad (2)$$

где $J_{e,0} = \frac{1}{4} en_{i,j} v_e$ – плотность хаотического тока; $v_e = \left(\frac{8kT_e}{\pi m_e}\right)^{1/2}$ – средняя тепловая скорость электрона; $n_{i,j}$ – концентрация плазмы в точке $r_{i,j}$; $A_{i,j}$ – площадь электрода.

При положительном потенциале электрода расчет тока на электрод значительно усложняется. В этом случае применяют так называемую «орбитальную теорию», согласно которой электронный ток насыщения приближенно равен:

$$I_{i,j}^{(-)}(V^+) = I_0 \left(1 + \frac{eV^+}{kT_e}\right)^\beta. \quad (3)$$

Показатель степени β в (6) для цилиндрического зонда равен 1/2, а для сферического – 1. Поскольку электроды СЭ имеют относительно небольшие размеры и собирают электроны из полусферы (трехмерная геометрия), можно принять, что $\beta = 1$, что согласуется с результатами проведенных экспериментов. Более точная оценка коэффициента β может быть получена только экспериментально для конкретной конструкции электродов, применяемых материалов и параметров плазменного потока, наиболее приближенных к реальным.

Потенциалы электродов ВБС определялись из уравнения баланса токов:

$$I_s + \sum_{i=0, N, j=1, M} I_{i,j} = 0, \quad (4)$$

где $I_{i,j}$ – токи утечки через плазму в каждом узле электрической схемы ВБС (на каждом открытом электроде, включая отрицательные выводы СЭ, подключенных к отрицательной шине (рисунок 10б); I_s – суммарный ток утечки через каркас ВБС.

По рассмотренной модели были рассчитаны потенциалы электродов гипотетической ВБС с рабочим напряжением 150 В при токе 16 А. Панель ВБС имеет размеры 2,5×3,2 м, содержит 40 стрингов по 60 элементов. Солнечные элементы 40×80 мм имеют напряжение в рабочей точке $U_p = 2,5$ В и ток 0,4 А. Площадь открытых электродов (медь) принималась равной 0,05, 0,1 и 0,2 см², что соответствует трем вариантам исполнения электродов: 10×2 мм, 5×1 мм, 5×2 мм при толщине 50 мкм. Последовательные цепочки СЭ («стринги») ориентированы вдоль стороны 2,5 м. Каркас панели выполнен из алюминиевой трубы диаметром 30 мм. Схема взаимного расположения панели ВБС и двигателя приведены на рисунке 11а. Панель БС равномерно вращается вокруг оси Z по часовой стрелке, отслеживая направление на Солнце.

Расчетное поле концентрации плазмы над панелью ВБС при угле поворота 45° приведено на рисунке 11б. Расчеты проведены с использованием верифицированного пакета программ Turbo DESIGN-10.0. Расчетные максимальные значения концентрации плазмы (9×10^{13} м⁻³) приблизительно совпадают со значениями концентрации, реализованными в эксперименте.

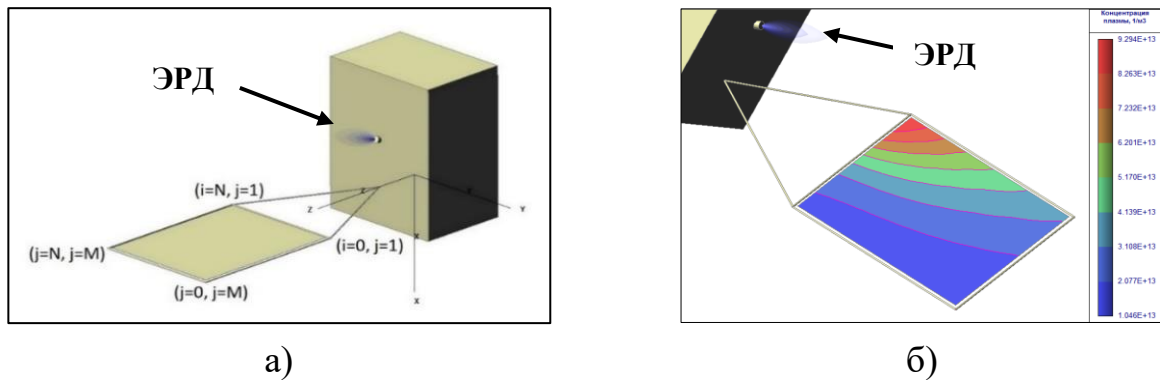


Рисунок 11 - Геометрическая модель КА (а) и поле концентрации плазмы ЭРД над поверхностью панели ВБС (б)

На рисунке 12а приведены результаты расчета потенциала минусовой шины φ_- в зависимости от угла поворота панели ВБС. Из этого рисунка видно, что практически при любом положении панели $\varphi_- \leq -50$ В. Согласно введенному в Главе 3 критерию, это значит, что на минусовой шине и каркасе ВБС могут возникать микродуговые и более мощные вторичные дуговые разряды.

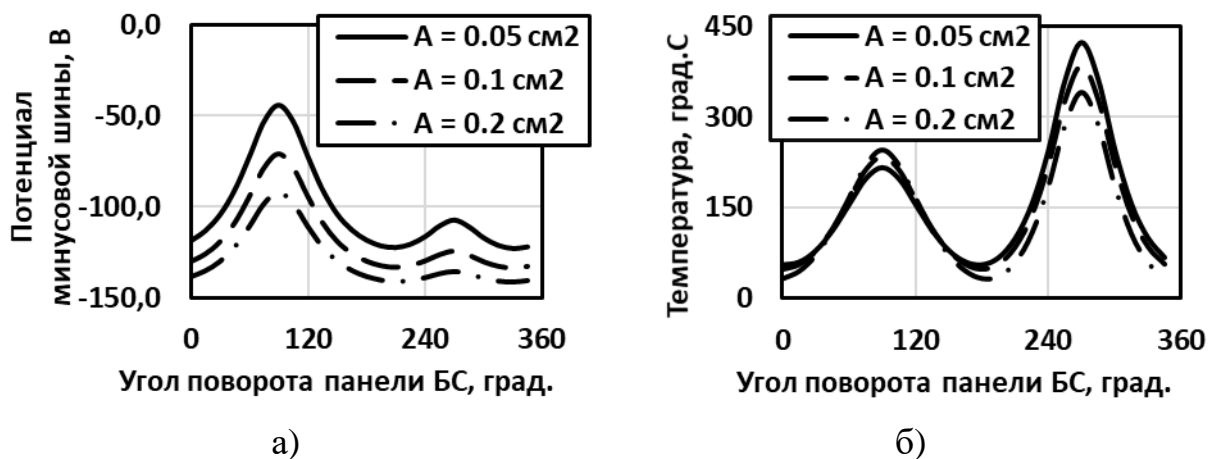


Рисунок 12 - Расчетные значения потенциала минусовой шины (а) и температуры электродов (б) в зависимости от угла поворота панели ВБС

На рисунке 12б приведены результаты расчета равновесной температуры электродов, имеющих положительный потенциал относительно плазмы ЭРД. Из этого рисунка видно, что при углах поворота $45-135^\circ$ и $225-315^\circ$ температура электродов превышает температуру пиролиза диэлектрических материалов ВБС. Согласно введенному в Главе 3 критерию, это значит, что на положительно смещенных электродах ВБС могут развиваться дуговые разряды.

Таким образом, показано, что на открытых электродах ВБС КА с ЭРД могут возникать условия для развития дуговых разрядов.

На основании проведенных исследований были сформулированы рекомендации по защите ВБС от дуговых разрядов. В частности, предлагается изолировать каркас ВБС и обеспечить гальваническую развязку электрических цепей ВБС от корпуса КА и каркаса ВБС, применять материалы с низким массовыделением и высокой температурой пиролиза, ограничить время воздействия плазмы или включать ЭРД только в тех положениях панелей ВБС, при которых возникновение разрядов исключено. Наиболее эффективной мерой защиты является введение гальванической развязки, которая позволяет ограничить ток вторичных разрядов и снизить вероятность их возникновения до минимума.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследований получены следующие результаты.

1. Разработана физико-математическая модель накопления и релаксации электрического заряда в диэлектрических материалах ВБС под действием геомагнитной плазмы и плазмы ЭРД. Численно показано, что появление плазмы ЭРД над поверхностью радиационно-заряженных диэлектрических материалов ВБС не приводит к их пробое. При этом накопленный в объеме диэлектрика отрицательный электрический заряд сохраняется, но компенсируется положительным зарядом, локализованными в тонком приповерхностном слое материала.

2. Экспериментально определены значения токов утечки и условия возникновения дуговых разрядов на положительно и отрицательно смещенных модельных электродах в струе ЭРД в зависимости от концентрации плазмы, потенциала и материала электродов. Установлено, что среди конструкционных материалов, применяемых на ВБС, наиболее вероятны разряды на углепластике. Вероятность разрядов на нержавеющей стали и алюминии примерно в 3 раза меньше.

3. На основании полученных экспериментальных данных разработана феноменологическая модель и сформулированы критерии возникновения дуговых разрядов на электродах ВБС. Для положительно смещенных электродов критерием является нагрев электрода до температуры пиролиза прилегающего диэлектрика, а для отрицательно смещенных – снижение потенциала электрода ниже -50 В относительно потенциала плазмы.

4. Разработана инженерная модель для оценки потенциала и токов утечки с электродов ВБС. Расчетным путем показано, что потери мощности ВБС за счет токов утечки не превышают 1-2%, на открытых электродах ВБС могут возникать условия для возникновения дуговых разрядов.

5. Проведен анализ возможных методов защиты ВБС от дуговых разрядов в плазме ЭРД, показано, что наиболее эффективным методом защиты является гальваническая развязка электрических цепей ВБС с каркасом ВБС и корпусом КА.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях ВАК РФ по специальности 2.5.15.:

1. Валиуллин В.В., Надирадзе А.Б. Потенциал высоковольтной солнечной батареи космического аппарата в плазме электроракетного двигателя // Вестник Московского авиационного института. - 2023. - № 3. - с. 125-135.

2. Валиуллин В.В., Кочура С.Г., Максимов И.А., Надирадзе А.Б. Вопросы обеспечения стойкости высоковольтных солнечных батарей космических аппаратов к воздействию вторичных дуговых разрядов // Сибирский аэрокосмический журнал. - 2024. - № 1. - с. 85–105.

3. Валиуллин В.В., Надирадзе А.Б. Математическая модель взаимодействия низкотемпературной плазмы электроракетного двигателя с поверхностью радиационно-заряженного диэлектрика // Тепловые процессы в технике. – 2024. - № 4. - с. 151–161.

4. Валиуллин В.В., Надирадзе А.Б. Исследование электроразрядных явлений, инициированных плазмой электроракетных двигателей, в электрических цепях высоковольтных солнечных батарей // Космическая техника и технологии. - 2024. - № 3. - с. 89-105.

Другие публикации:

5. Валиуллин В.В., Надирадзе А.Б. Механизмы взаимодействия перезарядочной плазмы электроракетного двигателя с радиационно-заряженной поверхностью диэлектрика // Ученые записки физического факультета московского университета. - 2021. - № 3. – с. 1-5. (Перечень ВАК РФ, 1.3.8.).

Тезисы докладов:

6. Валиуллин В.В., Надирадзе А.Б. Физические механизмы взаимодействия перезарядочной плазмы с радиационно-заряженной поверхностью диэлектрика // Тезисы 19-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика», 23-27 ноября 2020 г., Москва. – М.: «Перо». – 138-140 с.

7. Валиуллин В.В., Надирадзе А.Б. Модель взаимодействия перезарядочной плазмы электроракетного двигателя с радиационно-заряженной поверхностью диэлектрика // Труды XXI Международной научной школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине», 23-24 ноября 2020 г., Москва. – М. «КДУ», «Добросвет». – 133-136 с.

8. Валиуллин В.В., Надирадзе А.Б. Моделирование процессов взаимодействия низкотемпературной плазмы с радиационно-заряженной поверхностью диэлектрика // Материалы XXII международной конференции по Вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2021), 4-13 сентября 2021 г., Алушта. – М.: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)". – 325-327 с.

9. Валиуллин В.В., Надирадзе А.Б. Моделирование взаимодействия дырок, сгенерированных перезарядочной плазмой, с накопленными электронами радиационно-заряженного диэлектрика // Тезисы 20-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика», 22-26 ноября 2021 г., Москва. – М.: «Перо». – 98-99 с.

10. Валиуллин В.В., Надирадзе А.Б. Математическая модель релаксации электрических зарядов в радиационно-заряженном диэлектрике под действием низкотемпературной плазмы электроракетного двигателя // Сборник тезисов работ XLVIII Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения», 10-12 октября 2022 г., Москва. – М.: «Перо». – 150-151 с.

11. Валиуллин В.В., Надирадзе А.Б. Модель плоского конденсатора для описания процессов релаксации радиационно-накопленного заряда в диэлектрике под действием потоков низкотемпературной плазмы //

Материалы XIV Международной конференции по Прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (АММАИ'2022), 4-13 сентября 2022 г., Алушта. – М.: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). – 119-121 с.

12. Валиуллин В.В., Надирадзе А.Б. Модель радиационной зарядки диэлектрических элементов конструкции космического аппарата в магнитосферной плазме // Тезисы 21-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика», 21-25 ноября 2022 г., Москва. – М.: «Перо». – 100-102 с.

13. Валиуллин В.В., Надирадзе А.Б. Конденсаторная модель кинетики формирования поверхностного заряда в диэлектриках // Сборник тезисов докладов XXIII межвузовской молодежной научной школы-конференции имени Б.С. Ишханова «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине», 23-24 ноября 2022 г., Москва. – М.: «КДУ». – 2 с.

14. Валиуллин В.В., Надирадзе А.Б. Конденсаторная модель радиационной зарядки диэлектрических поверхностей космического аппарата // Сборник тезисов докладов XLIX Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения», 11-14 апреля 2023 г., Москва. – М.: «Перо». – 99-100 с.

15. Валиуллин В.В., Надирадзе А.Б. Конденсаторная модель формирования поверхностных зарядов в диэлектрических элементах конструкции космического аппарата // Тезисы 22-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика», 20-24 ноября 2023 г., Москва. – М.: «Перо». – 70 с.

16. Валиуллин В.В., Надирадзе А.Б. Моделирование взаимодействия низкотемпературной плазмы с радиационно-заряженной поверхностью диэлектрика // Сборник тезисов докладов XXIV межвузовской молодежной научной школы-конференции имени Б.С. Ишханова «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине», 22-23 ноября 2023 г., Москва. – М.: «КДУ». – 82 с.