

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

На правах рукописи

Муллахметов Ильшат Рамилович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР НА
ЭЛЕКТРИЗУЕМОСТЬ ПОЛИМЕРНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Резюме диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Пожидаев Евгений Дмитриевич

Москва – 2024

Актуальность темы исследования

Практическое применение космических аппаратов включает точное картографирование, прогнозирование погоды, глобальное позиционирование, связь и множество других приложений как для научных исследований, так и двойного назначения.

Спутники дороги в проектировании, строительстве и запуске, и зачастую их невозможно отремонтировать. Поэтому крайне важно, чтобы космические аппараты были созданы так, чтобы выдерживать условия факторов космического пространства, а в частности, космической плазменной среды, в которой они находятся. Особенно важно смягчить последствия электростатических разрядов, на которые приходится более половины сбоев космических аппаратов, связанных с взаимодействием с факторами космического пространства.

Одним из ключевых факторов космического пространства является ионизирующее излучение. Оно состоит из фотонов, протонов, ионов и электронов, которые взаимодействуют с поверхностью космических аппаратов. Из этих частиц электроны вносят наибольший вклад в зарядку космических аппаратов из-за их высокой подвижности. Поэтому взаимодействие электронов с космическими аппаратами лежит в основе данного диссертационного исследования.

Типичная плазменная среда вокруг спутников создается окружающим солнечным ветром и магнитосферным слоем Земли. Энергия падающих электронов в этой среде колеблется в пределах 10 эВ – 1 МэВ, причем наибольшая плотность потока приходится на спектр в десятки кэВ. Когда поверхность космического аппарата взаимодействует с электронами, электрически нейтральный материал становится заряженным. Энергия и поток налетающих электронов, а также удельное сопротивление материала определяют количество накопленного заряда.

Накопление заряда, которое является предшественником электростатических разрядов, зависит от трех ключевых факторов: природы падающих электронов, времени воздействия и удельного электрического сопротивления материала. Распределение энергии и плотность потока падающих электронов, а также время воздействия электронов на материал определяют величину заряда и мощность

поглощенной дозы. Электропроводность, которая зависит от температуры и материала определяет, как данный материал отреагирует на этот приток заряда.

В металлах или материалах с высокой проводимостью заряд растекается быстро. На Земле заряд можно отвести на землю, а затем материал вернется в свое электрически нейтральное состояние. Однако, металлические поверхности в космосе не заземлены, поэтому на поверхности возникает напряжение относительно окружающей плазменной среды – процесс, известный как абсолютное зарядение. Согласно модели динамики электронов, высокая подвижность электронов в металлах или проводниках является результатом частичного заполнения валентной зоны и зоны проводимости в этих материалах. Аналогично, хорошие изоляторы имеют низкую проводимость из-за электронных зон, которые полностью заполнены или полностью пусты. Поскольку диэлектрики не способны хорошо проводить заряд, они не будут иметь постоянный потенциал на всей своей поверхности. Вместо этого создаются области высокого и низкого напряжения – процесс, известный как дифференциальное зарядение. Часто дифференциальное зарядение происходит между затененными областями и областями, находящимися под солнечным светом. Напряжение между разными областями поверхности диэлектрика или разница потенциалов между металлом и изолирующей поверхностью могут привести к электростатическим разрядам.

Объемное зарядение диэлектрика также может привести к электростатическим разрядам. Если электроны осаждаются с большей скоростью, чем рассеиваются, в материале растет напряженность электрического поля. Если поле становится больше, чем электрическая прочность материала, возникают электростатические разряды.

В некоторых случаях могут также происходить разряды с космического аппарата в окружающую космическую плазму – явление, известное как «разряд в космос». Это происходит, когда корабль развивает большой электрический потенциал по отношению к окружающей плазме.

Полимерные материалы нашли широкое применение в космической технике в качестве конструктивных элементов космического аппарата, слоев экранно-

вакуумной теплоизоляции для поддержания температурных режимов космического аппарата, электроизоляции кабельных изделий, печатных плат бортовой радиоэлектронной аппаратуры и др. Полимерные диэлектрики имеют крайне низкую собственную электропроводность и в то же время подвергаются воздействию потоков ионизирующих излучений. В связи с этим существует проблема, связанная с зарядением диэлектриков, которая приводит к возникновению электростатических разрядов в полимерах. Основным физическим параметром диэлектрика, контролирующим накопление электрических зарядов при облучении, является радиационная электропроводность этого диэлектрика. Чем она ниже, тем больше вероятность возникновения электростатического разряда. Также следует отметить, что в течение суток наблюдается изменение температуры на поверхности космического аппарата от 120 К до 350 К. При низких температурах как радиационная, так и темновая электропроводность диэлектриков существенно снижается, что приводит к увеличению вероятности возникновения электростатических разрядов в диэлектриках, применяемых в космических аппаратах. Электростатические разряды, в свою очередь приводят к сбоям и отказам бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата. Это все обуславливает **актуальность** исследования радиационной электропроводности полимерных диэлектриков при низких температурах (120 К и ниже).

Степень разработанности вопроса радиационной электропроводности полимерных диэлектриков достаточно широка. Данную область исследовали отечественные ученые, среди которых можно выделить такие имена как: Тютнев А.П., Саенко В.С., Пожидаев Е.Д., Новиков Л.С., Новиков С.В., Никитенко В.Р., Ихсанов Р.Ш., Хатилов С.А., Вайсберг С.Э., Архипов В.И., Руденко А.И., Ванников А.В., Мингалеев Г.С., Садовничий Д.Н. Необходимо также отметить ряд зарубежных ученых, работавших по указанной теме: Б. Гросс, А. Роуз, Дж.Ф. Фаулер, Х. Бесслер, Х.Б. Гарретт, Г.М. Сесслер, Дж.Е. Вест, Дж.Р. Деннисон, Р.К. Хьюз, Г.Р. Фриман, А. Хьюмел.

Радиационная электропроводность полимерных диэлектриков изучена экспериментально и теоретически при импульсном и непрерывном облучении, в основном при нормальной (298 К) и повышенной температурах. Однако, в литературе практически отсутствуют результаты измерений и моделирования радиационной электропроводности полимерных диэлектриков при низких температурах.

Научной школой лаборатории функциональной безопасности космических аппаратов и систем были получены экспериментальные данные по низкотемпературной радиационной электропроводности полимеров при воздействии миллисекундных импульсов ускоренных электронов. Однако, для изучения возможности возникновения электростатических разрядов в бортовой радиоэлектронной аппаратуре космических аппаратов необходимо получить экспериментальные данные по длительному (до трех часов) облучению полимерных диэлектриков.

Также сотрудниками лаборатории была разработана методика оценки возникновения электростатических разрядов в полимерных диэлектриках при нормальной температуре. В полученной методике радиационная электропроводность описывается с помощью аппроксимирующей функции, начиная с максимального значения радиационной электропроводности и масштабируемой в зависимости от мощности поглощенной дозы. Данный подход неприменим для описания радиационной электропроводности при низких температурах, так как максимум радиационной электропроводности при низких температурах наступает на 2–3 порядка по времени позже, что не позволяет учесть начальное изменение радиационной электропроводности.

Целью данной диссертационной работы является увеличение срока эксплуатации космических аппаратов за счет применения полимерных диэлектриков, обладающих пониженной электризуемостью при низких температурах.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

– Разработана экспериментальная методика измерения долговременной радиационной электропроводности полимерных диэлектриков при низкой температуре, отличающаяся возможностью её поддержания в течение длительного времени за счет помещения под катодом электронно-лучевой пушки пленки полиэтилентерефталата, а также защитой измерительной ячейки с теплопроводящим стержнем от внешних тепловых потоков экранно-вакуумной теплоизоляцией. Экспериментальная методика учитывает: мощность поглощенной дозы для различных полимерных диэлектриков; напряженность внутреннего электрического поля, обусловленную инъекцией внешних электронов; возможность устранения шумов при измерении радиационной электропроводности полимерных диэлектриков.

– На примере модельного полимерного диэлектрика – полистирола проведены экспериментальные и теоретические исследования радиационной электропроводности при комнатной и низкой температурах с возможностью их сопоставления. Показано, что радиационная электропроводность в полистироле при 79 К в 40 раз ниже, чем при комнатной температуре. Это означает, что полистирол, устойчивый к электростатическим разрядам при комнатной температуре, становится материалом, в котором электростатические разряды возможны при низких температурах. Также определены значения параметров модели Роуза-Фаулера-Вайсберга для полиимида и полиэтилентерефталата при 103 К. Для этого разработан порядок определения сдвига термализованных носителей заряда на основе экспериментальных данных.

– Разработана модель радиационного заряжения полимерных диэлектриков при низкой температуре, особенностью которой является использование полуэмпирической модели радиационной электропроводности Роуза-Фаулера-Вайсберга, параметры которой определяются экспериментально из кривых зависимости радиационной электропроводности от времени облучения при соответствующей температуре.

– Разработана инженерная методика моделирования радиационного заряжения полимерных диэлектриков при низких температурах, которая позволяет оценить возможность возникновения электростатических разрядов и с этой точки зрения определить целесообразность применения конкретного полимерного диэлектрика.

Комплекс решенных задач позволяет, на этапе эскизного проектирования космического аппарата, рассмотреть различные варианты полимерных диэлектриков, применение которых возможно на космическом аппарате. Это поможет увеличить срок эксплуатации космических аппаратов за счет применения полимерных диэлектриков, обладающих пониженной электризуемостью при низких температурах, что и является целью данного диссертационного исследования.

В диссертационной работе показано, что основное влияние на ухудшение электризуемости полимерных диэлектриков при низких температурах оказывает существенное уменьшение радиационной электропроводности этого полимера. В связи с этим необходимо проведение низкотемпературных исследований радиационной электропроводности полимерных диэлектриков.

Перспективами дальнейшей разработки темы являются:

- доработка экспериментальной методики по контролю заданного температурного режима;
- исследование радиационной электропроводности полимерных диэлектриков при различных температурах от 79 К до 298 К с заданным шагом;
- дальнейшие исследования в области защиты радиоэлектронных средств космического применения от пагубного воздействия электростатических разрядов и создания безразрядных космических аппаратов.

Объектом исследования являются полимерные диэлектрики космического и радиационного материаловедения.

Предметом исследования является радиационное заряжение полимерных диэлектриков под воздействием космической плазмы при низкой температуре.

Научная новизна работы заключается в

– разработке экспериментальной методики измерения долговременной радиационной электропроводности полимерных диэлектриков при низкой температуре, отличающейся возможностью поддержания постоянного значения низкой температуры в течение длительного времени (до трех часов), с точностью измерения медь-константановой термопары, за счет помещения под катодом электронно-лучевой пушки пленки полиэтилентерефталата, а также защитой измерительной ячейки с теплопроводящим стержнем от внешних тепловых потоков экранно-вакуумной теплоизоляцией;

– впервые полученных результатах исследования радиационной электропроводности полимерных диэлектриков и определении параметров модели Роуза-Фаулера-Вайсберга для последующего моделирования радиационной электропроводности при низкой температуре;

– разработанной модели радиационного заряжения диэлектриков, отличающейся тем, что радиационная электропроводность, используемая в ней, определяется с помощью модели Роуза-Фаулера-Вайсберга.

Работа имеет **теоретическую значимость** для радиационной физики диэлектриков, заключающуюся в развитии модели Роуза-Фаулера-Вайсберга и определении параметров данной модели для ряда полимерных диэлектриков при низких температурах.

Практическая значимость работы заключается в создании инженерной методики моделирования радиационного заряжения полимерных диэлектриков при низких температурах, используемой при конструировании и производстве космической техники.

Методами исследования, используемыми в работе, являются физический эксперимент, метод физического моделирования, численные методы.

На защиту выносятся:

– методика экспериментальных исследований радиационной электропроводности полимерных диэлектриков при низких температурах в широком временном интервале;

– результаты исследования радиационной электропроводности полимерных диэлектриков при низкой температуре и определение сдвига термализованных носителей заряда непосредственно из экспериментальных данных, что позволяет определить параметры модели Роуза-Фаулера-Вайсберга для последующего моделирования радиационной электропроводности при заданной температуре;

– модель радиационного заряжения диэлектриков, которую возможно применять при низких температурах за счет моделирования радиационной электропроводности полимерных диэлектриков моделью Роуза-Фаулера-Вайсберга;

– инженерная методика моделирования радиационного заряжения полимерных диэлектриков при низких температурах, в основе которой лежит модель, позволяющая оценить напряженность поля и сравнить ее с критериальным значением, после достижения которого возникают разряды.

Личный вклад автора состоит в постановке задачи; доработке экспериментальной методики измерения радиационной электропроводности полимерных диэлектриков при низких температурах, а также в проведении экспериментов; выборе модели радиационной электропроводности и подбора ее параметров. Анализ и оформление результатов проведены автором лично. В рамках диссертационного исследования автором получены свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021664635 от 10 сентября 2021 г. «Цифровой фильтр для устранения шумов при измерении радиационно-индуцированного тока композитных полимеров» и № 2023661020 от 25 мая 2023 г. «Программа для сбора и последующей верификации экспериментальных данных по электризуемости полимерных диэлектриков космической техники».

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка литературы.

Во введении обоснована актуальность темы исследования; обозначена степень ее разработанности; сформулированы цель, задачи, научная новизна исследования; представлены теоретическая и практическая значимость работы;

описаны методология и методы исследования; представлены положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов.

В первом разделе проведен обзор и анализ литературных данных по радиационной электропроводности полимерных диэлектриков при нормальной и низкой температурах, приведено значение данных исследований с точки зрения проблемы электризуемости диэлектрических материалов космических аппаратов, в качестве результата анализа сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

Во втором разделе описана методика экспериментальных исследований радиационной электропроводности полимерных диэлектриков при низких (азотных) температурах. Описаны сложности, которые могут возникнуть при низкотемпературных измерениях радиационной электропроводности полимерных диэлектриков и как их избежать.

В третьем разделе, на примере полистирола, описан подход к исследованию радиационной электропроводности при нормальной и низкой температурах, приведено решение определения сдвига термализованных носителей заряда из экспериментальных данных, а также представлены параметры модели Роуза-Фаулера-Вайсберга для полимерных диэлектриков космического применения при низких температурах.

В четвертом разделе приведены модель радиационного заряжения полимерных диэлектриков, а также инженерная методика оценки возникновения электростатических разрядов в полимерных диэлектриках космического применения при низких температурах.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Целью исследования является увеличение срока эксплуатации космических аппаратов за счет применения полимерных диэлектриков, обладающих слабой электризуемостью при низких температурах. Таким образом работа **соответствует паспорту специальности 05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нано- электроника, приборы**

на квантовых эффектах» в части п. 5 «Исследование и моделирование функциональных и эксплуатационных характеристик изделий, включая вопросы качества, долговечности, надежности и стойкости к внешним воздействующим факторам, а также вопросы эффективного применения».

В рамках работы над диссертационным исследованием были опубликованы следующие статьи:

– Tyutnev A.P., Saenko V.S., Mullakhmetov I.R., Agapov I. «Radiation-induced conductivity in polystyrene, a common insulating polymer with a hopping conduction» в журнале «Journal of Applied Physics». 2021. Vol. 129. № 17. Article 175107 (Q2);

– Тумковский С.Р., Муллахметов И.Р., Пожидаев Е.Д., Саенко В.С. «Идентификация модели радиационной проводимости полимерных материалов» в журнале «Информационные технологии». 2022. Т. 28. № 5. С. 233-239 (K1);

– Tyutnev A.P., Saenko V.S., Mullakhmetov I.R., Abrameshin A.E. «Radiation-induced conductivity in polystyrene at extremely low (79 K) temperature» в журнале «Journal of Applied Physics». 2022. Vol. 132. № 13. Article 135105 (Q2);

– Муллахметов И.Р., Саенко В.С., Тютнев А.П., Пожидаев Е.Д. «Низкотемпературная радиационная электропроводность полистирола под действием электронов низких энергий» в журнале «Журнал технической физики». 2023. Т. 93. № 1. С. 130-134 (K1);

– Mullakhmetov I.R., Saenko V.S., Tyutnev A.P., Pozhidaev E.D. «Low-temperature radiation-induced conductivity of polystyrene under the action of low-energy electrons» (перевод с русского) в журнале «Technical Physics». 2023. Vol. 68. №. 1. P. 123-126 (Q3);

– Tyutnev A.P., Saenko V.S., Mullakhmetov I.R., Pozhidaev E.D. «Experimental and theoretical investigations of the radiation-induced conductivity in spacecraft polymers at extremely low temperatures» в журнале «Journal of Applied Physics». 2023. Vol. 134. № 9. Article 095903 (Q2);

– Толстикова С.Ю., Муллахметов И.Р., Пожидаев Е.Д., Тумковский С.Р. «Компьютерное моделирование радиационного заряжения полимерных

материалов космического применения при низких температурах» в журнале «Технологии электромагнитной совместимости». 2024. Т. 88. № 1. С. 57-62 (К2).