

## СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ОТ ДЕЙСТВИЯ КОСМИЧЕСКОЙ РАДИАЦИИ

*И.В. Ваганов, В.Б. Федоров*

В работе проведен обзор и сравнение современных подходов обеспечению радиационной безопасности на борту автоматических космических аппаратов. Рассмотрены особенности активных и пассивных методов защиты. Сделаны выводы об эффективности этих методов.

Ключевые слова: космическая радиация, космический аппарат, защита от космической радиации, пассивная защита, активная защита.

В процессе полета космические аппараты (КА) подвергаются целому спектру факторов, способных негативно сказаться на стабильной работе бортовых и служебных систем. Одним из таких факторов является воздействие космической радиации. Космическая радиация – потоки заряженных частиц с энергией  $10^3$ – $10^{20}$  эВ солнечного или галактического происхождения [1]. Воздействие космической радиации способно вызвать структурные изменения в материалах КА и сбои в работе бортовых систем. Выход из строя бортовых систем и дальнейшая потеря КА, влекут за собой серьезный экономический ущерб и надолго замедляют продвижение фундаментальных научных исследований.

В современных исследованиях выделяют три компонента излучения: частицы радиационных поясов Земли (РПЗ), солнечные космические лучи (СКЛ) и галактические космические лучи (ГКЛ).

Частицы РПЗ представляют собой интенсивные потоки локализованных в магнитосфере электронов, протонов и тяжелых ядер, которые захвачены магнитным полем Земли. Энергия частиц в РПЗ лежит в диапазоне от 10 кэВ до 0,1 ГэВ. Средняя плотность потока частиц составляет  $10^{10}$  м<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>.

Солнечные космические лучи – непрерывное радиальное истечение плазмы солнечной короны в межпланетное пространство. 90 % состава этого компонента космической радиации приходится на протоны, остальное – ядра гелия и тяжелых элементов. Энергия частиц может варьироваться от 0,1 МэВ до нескольких ГэВ. Плотность потока в периоды максимума солнечной активности составляет порядка  $10^7$  м<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>.

Галактическое космическое излучение (ГКИ) состоит из межзвёздной плазмы, через которую проходит Солнечная система при своем движении. Потоки галактической плазмы обладают энергией порядка миллиардов ГэВ, но очень малой плотностью (около  $10^2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ ). Характерными особенностями этого компонента космической радиации является изотропность потока и корреляция с минимумами солнечной активности.

Воздействие космической радиации на системы и элементы КА весьма разнообразно. При облучении конструкционных материалов основными эффектами являются поверхностная эрозия и ионизация поверхности материала корпуса КА [2]. Поверхностная эрозия происходит под действием протонов и снижает такие механические характеристики материалов как коэффициент трения, степень черноты и коэффициент отражения. Ионизация поверхности КА увеличивает риск возникновения электрического разряда между диэлектрической изоляцией и металлической поверхностью КА [3]. Критическим диапазоном значений поглощенной дозы для конструкционных материалов считается  $10^5$ – $10^{10}$  Гр [1].

При воздействии на функциональные материалы систем электроснабжения и управления наиболее критичны сбои в интегральных схемах и полупроводниковых элементах электроники. Высокоскоростные частицы космической радиации способны вызвать как обратимые одиночные сбои в работе бортовой электроники, так и жесткие сбои в виде прожигания элементов по большим напряжениям или эффекта «защелки», после которых поврежденные элементы восстановить нельзя. Полупроводниковые приборы в составе электроники КА имеют наименьшую радиационную стойкость – критическими являются значения поглощенной дозы порядка  $10^4$  Гр. [1].

Все современные способы защиты КА от действия космической радиации можно разделить на три класса по признаку их взаимодействия с частицами в космическом пространстве – класс активной защиты, класс пассивной защиты и класс нетехнических способов защиты.

Пассивная защита основана на непосредственном взаимодействии частиц и специального экранирующего материала с целью снижения энергии частиц или их поглощения. Для экранирования чаще всего используют алюминиевые сплавы, которые характеризуются легкостью и технологичностью [4]. Конструктивно такой экран представляет собой сотовую конструкцию, ограниченную двумя пластинами (рис. 1) [1, 5].

Особенностью торможения в пассивных экранах является то, что потери энергии определяются сразу несколькими процессами: потерями на ионизацию (для протонов и тяжелых частиц с энергией от  $10^4$  до  $10^8$  эВ), упругими столкновениями частиц с кристаллической решеткой материала (менее  $10^4$  эВ), испусканием тормозного излучения и ядерными реакциями (более  $10^8$  эВ) [1]. Согласно современным исследованиям, увеличение

атомного элемента материала увеличивает потери энергии электронами и протонами при прохождении сквозь этот материал, но при этом увеличивается и выход тормозного излучения [6]. Отсюда следует, что для обеспечения надежной защиты необходимо применять многослойные композиционные материалы, которые содержали бы элементы как с малыми (от 1 до 13) так и с большими атомными номерами (от 29). В качестве критериев эффективности экранирования могут служить различные показатели, но основными являются плотность материала, коэффициент ослабления потока (или отношения коэффициента ослабления материала к соответствующему коэффициенту у алюминия) [5], линейные потери энергии [1, 7], поглощенная доза излучения [4].

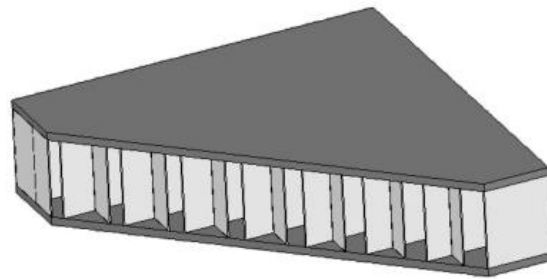


Рис. 1. Модель сотового защитного экрана [1]

В научных работах предложены экраны из полимерного композита с наполнителем из микросфер, заполненных водородом и бором [8]. Так как структурно материал содержит только легкие элементы, его коэффициент ослабления при равной толщине примерно в 1,2 раза ниже, чем у алюминия, но он генерирует меньше тормозного излучения и обеспечивает приемлемый уровень защиты (коэффициент ослабления 2,5) при вдвое меньшей массе. Аналогичные результаты показывает гетерогенный экран из полимерной матрицы с наполнителями из карбида и нитрида бора [5]. Однако эффективность такого экрана сильно зависит от равномерности распределения частиц в материале, что вызывает дополнительные затраты на производстве. Более простой способ использования экранирования элементами с малым атомным номером является экранирование водой [7]. Мощность эквивалентной дозы при использовании слоя воды меньше, чем при использовании слоя алюминия той же массы. Однако такой вариант менее эффективен, чем композиционные экраны из-за особенностей нахождения жидкостей в безвоздушном пространстве.

Одним из наиболее эффективных экранов является многослойный экран с внешним слоем из стеклоткани Т-10, промежуточным – из тетраборада натрия и внутренним из никеля [6]. По результатам анализа погло-

шенная доза при облучении гетерогенного оказалась в 2 раза ниже, чем при использовании алюминия одинаковой толщины. Масса гетерогенного экрана оказалась в среднем в 1,25 раза ниже, чем у алюминиевого экрана.

Однако помимо общего экранирования отсеков КА или всего занимаемого им объема, необходимо предусмотреть локальную защиту для наиболее важных элементов радиоэлектронной аппаратуры КА. Примером служат малогабаритные экраны из алюминиевых подложек 40x40x0,4 мм с покрытиями из висмута толщинами 972–2640 нм [9]. При наиболее эффективной толщине экрана 1,7 г/см<sup>2</sup> коэффициент ослабления имеет значение 130, что сопоставимо с аналогичными параметрами общей защиты. Экраны на основе материалов W-Cu с толщиной 1,5 мм способны снижать нагрузку на аппаратуру от электронов до 150 раз, а от протонов до 6 раз [10].

Возможности пассивного экранирования ограничены значениями физических констант, характеризующих процесс прохождения элементарных частиц через вещество. Возможной альтернативой является использование активной защиты. В настоящее время это направление представлено теоретическими исследованиями электростатических и электромагнитных экранов. Активные экраны обладают целым рядом преимуществ: низкий уровень генерации вторичного излучения, низкий суммарный вес и экономическая выгода за счет возможности многократного использования и отключения на относительно безопасных участках [11]. Создание таких экранов сопряжено со сложными инженерными задачами и примеров успешного внедрения в КА пока не существует.

В основу работы электростатических экранов положен принцип отклонения потока заряженных частиц экранами-электродами, имеющими потенциал относительно окружающего пространства и энергию порядка 2 ГэВ [12]. Моделью такого экрана является сферический или цилиндрический конденсатор. Экран при этом может быть одиночным, для отражения наиболее опасных тяжелых положительно заряженных частиц, так и парным для отражения частиц с противоположными знаками зарядов. Создание высокой разности потенциалов является решаемой инженерной задачей в рамках космических миссий, но для получения экономической эффективности напряжение может быть снижено, что приведет к проникновению части заряженных частиц, падающих под определенным углом и с определенных направлений, сквозь поле в защищаемый объем. Проектная методика расчета таких экранов приведена в работе [11], но нуждается в экспериментальном подтверждении. Серьезной проблемой является силовое взаимодействие между экранами. Внедрение подкрепляющих элементов изменит пространственное распределение электрического поля, что можно оценить компьютерным моделированием. Наличие активных экра-

нов в целом снижает надежность космических миссий из-за возможности отказа отдельных экранов или систем их зарядки.

Создание сферических экранов [13, 14] сопряжено с рядом технологических трудностей, поэтому более эффективна идея создания цилиндрических или цилиндрически-сферических экранов. В работе [15] предложен вариант создания электростатической защиты из двух экранов, механизмом их раскрытия, зарядного отсека и выдвижной штанги. Для этой конструкции был проведен расчет основных функциональных параметров, но проблемы конструктивного исполнения механизма раскрытия, стыковки частей раскрывающегося экрана и его эффективности еще не решены (рис. 2).

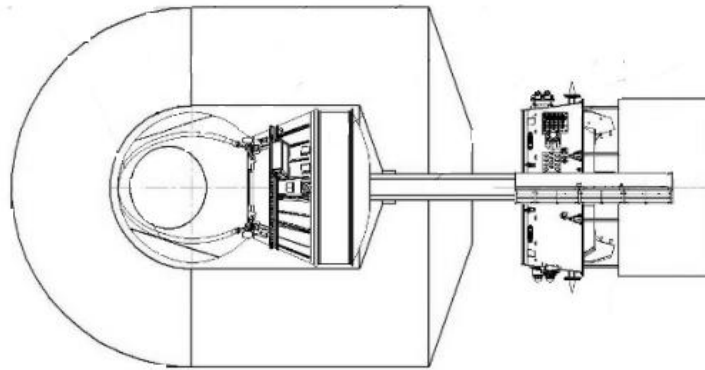


Рис. 2. Схема КА с электростатическим экраном [15]

Взаимодействие двух цилиндрических экранов можно компенсировать их вращением с линейными скоростями около 380 м/с и 38 м/с для внешнего и внутреннего экранов соответственно [12]. Опасность при использовании такого экрана возникает при попадании твердых макроскопических частиц в пространство между обкладками. При этом может произойти пробой и сформироваться поток плазмы, ускоренно движущийся к одному из экранов.

Активная электромагнитная защита отклоняет частицы силой Лоренца, действующей на частицы в магнитном поле, создаваемым на борту КА. Создание в космическом пространстве постоянного магнитного поля индукцией порядка 5 Тл [12] является возможным только при использовании сверхпроводящих систем. Массово-габаритные характеристики всей сопутствующей таким системам оборудования (криогенное оборудование, силовые элементы, воспринимающие ponderomotorные силы) делает такую систему малоприменимой для малых автоматических КА, но может стать основой безопасности обитаемых космических станций. Масса такой защиты при габаритах около 8 м может составлять около 540 т (рис. 3) [12].

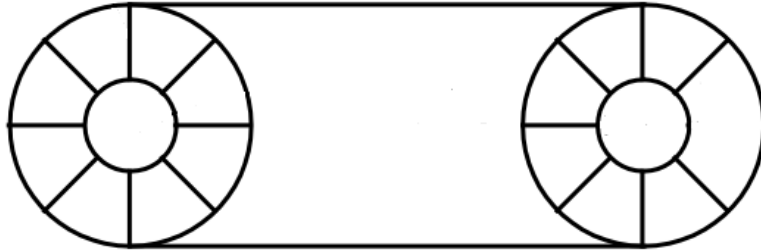


Рис. 3. Схема конструкции электромагнитной защиты [12]

Два основных конструктивных облика такого способа защиты это 1) два сверхпроводящих соленоида разного радиуса со встречными токами 2) две цилиндрических трубчатых коаксиальных проводника со встречными токами. В рамках автоматических миссий применение электромагнитных значительно уступает альтернативным способам по массово-габаритным характеристикам, несмотря на прорыв в области создания высокотемпературных проводников.

Нетехнические методы предусматривают проектирование траектории полета КА, характеризующихся минимумом возможного радиационного воздействия. Эта методика основана на исследовании солнечной активности, характеристик РПЗ, но в силу все расширяющегося спектра исследовательских задач и телекоммуникационных потребностей постепенно утрачивает свой смысл и уступает более универсальным конструктивным методам защиты.

Выводы: в настоящее время надежной основой радиационной безопасности на борту КА являются многослойные композиционные экраны. Их использование оправдано как функциональными, так и экономическими характеристиками. Однако перспектива развития электростатической защиты имеет все шансы превзойти эти параметры после основательной проработки конструктивных решений. Главной задачей нынешнего этапа создания систем активной защиты является проектирование, изготовление и опытное использование в космических условиях первичных образцов активных электростатических экранов.

#### Библиографический список

1. Новиков, Л.С. Радиационные воздействия на материалы космических аппаратов: учебное пособие / Л.С. Новиков. – М.: Университетская книга, 2010.
2. Космические аппараты / В.Н. Бобков, В.В. Васильев, Э.К. Демченко и др.; Под общ. ред. К.П. Феоктистова. – М.: Воениздат, 1983.
3. Акишин, А.И. Электроразрядные сбои в космических аппаратах в зоне космических излучений / А.И. Акишин // Перспективные материалы. – 2010. – № 2. – С. 27–32.

4. Композиционный материал для защиты радиоэлектронной аппаратуры от ионизирующего излучения / Е.А. Джур, А.Ф. Санин, С.А. Божко и др. // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2013. – № 6 (52). – С. 126–131.

5. Математическое моделирование характеристик гетерогенных радиационно-защитных экранов космических аппаратов / Н.П. Чирская, Е.Н. Воронина, В.Н. Милеев и др. // Перспективные материалы. – 2011. – № S13. – С. 948–957.

6. Гетерогенный радиационно-защитный экран для космических аппаратов / С.В. Телегин, В.Н. Саунин, О.Н. Драганюк, М.Н. Драганюк // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2015. – Т. 16, № 4. – С. 969–974.

7. Оценка ослабления дозы в отсеке космического аппарата при использовании воды как дополнительной защиты / Т. Сато, К. Ниита, В.А. Шуршаков и др. // Космические исследования. – 2011. – Т. 49, № 4. – С. 329–334.

8. Полимерные композиты для создания высокоэффективных систем радиационной защиты космических аппаратов // Н.П. Чирская, Е.Н. Воронина, В.Н. Милеев и др. // Физика и химия обработки материалов. – 2011. – № 4. – С. 20–24.

9. Радиационные экраны для полупроводниковых приборов на основе электролитически осажденных покрытий В<sub>i</sub> и эффективность их защиты от электронного излучения / Д.И. Тишкевич, С.С. Грабчиков, С.Б. Ластовский и др. // ВИТТ-2017. Метериалы 12-й Международной конференции. – 2017. – С. 72–74.

10. Грабчиков, С.С. Защита ракетно-космической аппаратуры от электромагнитных и радиационных излучений / С.С. Грабчиков // Наука и инновации. – 2016. – Т. 4. – № 158. – С. 17–12.

11. Труханов, К.А. Активная защита космических кораблей / К.А. Труханов, Т.Я. Рябова, Д.Х. Морозов. – М.: Атомиздат, 1970.

12. Ребеко, А.Г. Защита людей и космических аппаратов в космосе / А.Г. Ребеко // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2016. – Вып. 5.

13. Гарафутдинов, А.А. Электростатическая защита космических кораблей, планет, спутников планет и других космических объектов от радиационного космического излучения / А.А. Гарафутдинов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2015. – № 1. – С. 11–14.

14. Ребеко, А.Г. Способ защиты от заряженных частиц космической радиации / А.Г. Ребеко. – Пат. № 2406661 Российская Федерация. – 2010. – Бюл. № 35. – 7 с.

15. Нагиев, А.В. Проектирование космического аппарата научно-исследовательского назначения с защитным электростатическим экраном / А.В. Нагиев // Сборник трудов XIX Всероссийского семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов. – Самара, 2017. – С. 130–133.

[К содержанию](#)