

РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ И ОБЪЕМНОГО ЗАРЯДА В ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В.В. Синолиц, Л.С. Новиков, В.Н. Милеев
Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ
E-mail: novikov@nsrd.sinp.msu.ru

Введение

Воздействие космической радиации на материалы и элементы оборудования космических аппаратов (КА) является одной из главных причин ухудшения эксплуатационных характеристик материалов и оборудования и, как следствие, – снижения надежности и сокращения сроков службы бортовых систем КА [1]. Наиболее важными с точки зрения воздействия на КА являются следующие составляющие космической радиации: электроны радиационных поясов Земли (РПЗ) с характерными энергиями $\sim 0,1$ – 10 МэВ, протоны РПЗ с энергиями $\sim 0,5$ – 50 МэВ и генерируемые во время интенсивных солнечных вспышек протоны солнечных космических лучей с энергиями ~ 1 – 1000 МэВ. Универсальной мерой радиационных воздействий является величина поглощенной дозы.

При создании современных и перспективных КА, проектируемых на сроки активного существования ~ 10 – 12 лет и имеющих обычно сложную компоновку и высокую степень насыщенности разнообразной служебной и научной аппаратурой, часто требуется знать с большой точностью пространственное распределение поглощенной дозы в элементах конструкции КА с учетом их взаимного экранирования. Эта задача особенно актуальна при анализе условий функционирования и прогнозировании радиационной стойкости элементов микроэлектроники.

Еще одним физическим механизмом воздействия космической радиации является накопление внедренного объемного заряда в диэлектрических материалах конструкции КА. Объемный заряд, образующийся в толще диэлектриков, создает сильные электрические поля, следствием чего является возникновение электрических разрядов, создающих интенсивные электромагнитные помехи и паразитные токи, а в некоторых случаях приводящих к разрушению диэлектрических материалов.

Для решения задач, связанных с расчетом трехмерного пространственного распределения поглощенной дозы и внедренного электрического заряда в элементах конструкции КА, используются различные математические модели, которые можно разделить на две группы. К первой группе относятся модели, в которых расчет величины поглощенной дозы или внедренного электрического заряда в любой точке внутри КА основывается на вычислении эквивалентной толщины защитного экрана для этой точки. С этой целью из выбранной точки проводятся лучи к элементарным площадкам, на которые при проведении расчетов разбивается поверхность модели КА. Далее вычисляются толщины защитных экранов по каждому лучу с учетом

конфигурации пересекаемых им элементов конструкции КА и физических свойств материалов этих элементов. Такие модели реализуются на современных персональных компьютерах средней производительности и могут использоваться в инженерных расчетах.

Вторая группа включает модели, базирующиеся на методах численного моделирования. Обычно в таких моделях используется различные варианты метода Монте-Карло. Модели этой группы обладают более широкими вычислительными возможностями, однако они достаточно сложны и применяются, как правило, в специализированных научных центрах.

В докладе дано описание разработанной в НИИЯФ МГУ модели RDOSE [2], использующей лучевой метод при расчете эквивалентной толщины защитного экрана для выбранного элемента конструкции и предназначенной для инженерных расчетов, представлены сведения о графическом интерфейсе, приведены характерные примеры результатов расчетов.

Модель RDOSE

Принципы расчета с помощью модели RDOSE иллюстрируются рис. 1. Геометрическая модель КА (схематически изображена в центре) состоит из совокупности блоков, некоторые из которых вложены в другие. Сложная трехмерная модель КА строится из набора базисных геометрических элементов, объединенных в иерархическую древовидную структуру. В качестве базисных элементов используются простые геометрические поверхности и их фрагменты: плоскость, диафрагма, цилиндр, эллипсоид, конус, тор. Для каждой поверхности КА задаются вид материала и его физические характеристики.

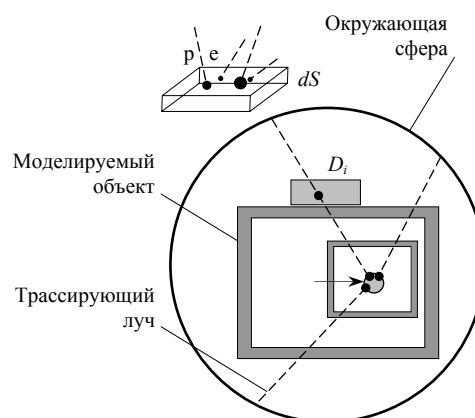


Рис. 1. Схема расчета поглощенной дозы

Вокруг модели КА строится сфера с равномерной сеткой точек, из которых на КА попадают потоки частиц. Из каждой такой точки в центре элементарной площадки dS в направлении точки расчета испускается луч, по пути которого вычисляется эквивалентная толщина защиты D_i с учетом угла встречи луча со всеми пересекаемыми деталями конструкции и свойств используемых материалов. На элементарных площадках окружающей сферы задаются энергетические спектры падающих заряженных частиц.

Вычисление суммарной дозы в рассматриваемой точке производится путем интегрирования по поверхности окружающей сферы. Алгоритм вычисления поглощенной дозы позволяет учитывать пространственно-временные вариации потоков частиц на каждую площадку dS .

Для построения трехмерной геометрической модели, задания исходных данных, управления вычислительными задачами и графического представления результатов был разработан универсальный интерактивный интерфейс пользователя [3]. Модули графического интерфейса реализованы на

базе библиотеки Gtk+, которая обеспечивает удобство взаимодействия и построение интерактивной среды. Для обеспечения взаимосвязи подпрограмм модуля с OpenGL используется пакет VTK, представляющий собой высокоуровневую объектно-ориентированную библиотеку визуализации научных данных.

Графический интерфейс и пакет программ для решения описанного выше круга физических задач предназначен для использования в среде операционной системы Linux, обеспечивающей высокую надежность и стабильность работы, сочетающуюся с возможностью создания многозадачных приложений и эффективным выводом графической информации средствами OpenGL.

На рис. 2 показано графическое окно интерфейса с изображением модели фрагмента КА, отражающей особенности его конфигурации, расположение элементов конструкции и блоков оборудования. Построенная модель содержит также информацию о физических свойствах материалов каждого элемента.

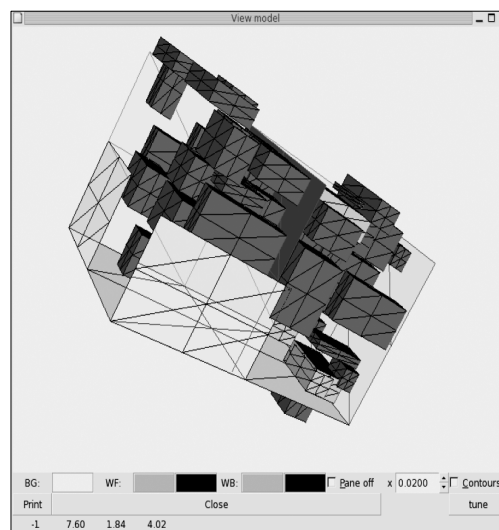


Рис. 2. Окно графического интерфейса

В качестве первого примера применения программного комплекса RDOSE приведем результаты расчета распределения поглощенной дозы внутри модуля КА, показанного на рис. 2. Прежде оценим вариации величины эквивалентной толщины защиты для разных лучей, проведенных из рассматриваемой точки к сферической поверхности. Результаты расчетов для некоторой точки, выбранной внутри модуля, приведены на рис. 3. Гистограмма на этом рисунке показывает относительное значение (в процентах) числа лучей N , соответствующих определенным значениям толщины эквивалентной защиты L_{eff} .

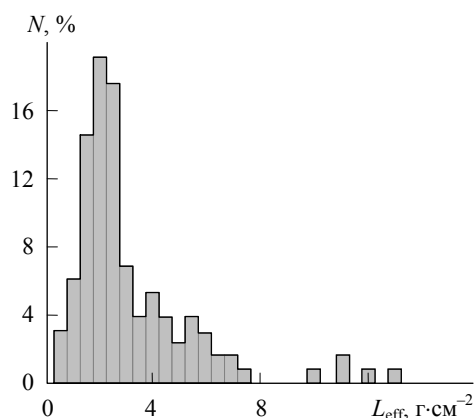


Рис. 3. Распределение толщины защиты по лучам

На рис. 4 приведены рассчитанные пространственные распределения поглощенной дозы для некоторых сечений модели КА. В нижней части обоих рисунков показаны изолинии величин дозы в рассматриваемых сечениях.

Рассмотренная методика позволяет провести оценки флюенса электронов для любого диэлектрического элемента внутри модуля с учетом экранирования этого элемента стенками модуля и другими элементами конструкции. Такие расчеты очень важны при оценке возможного возникновения электрических разрядов в блоках электронной аппаратуры КА за счет накопления объемного заряда.

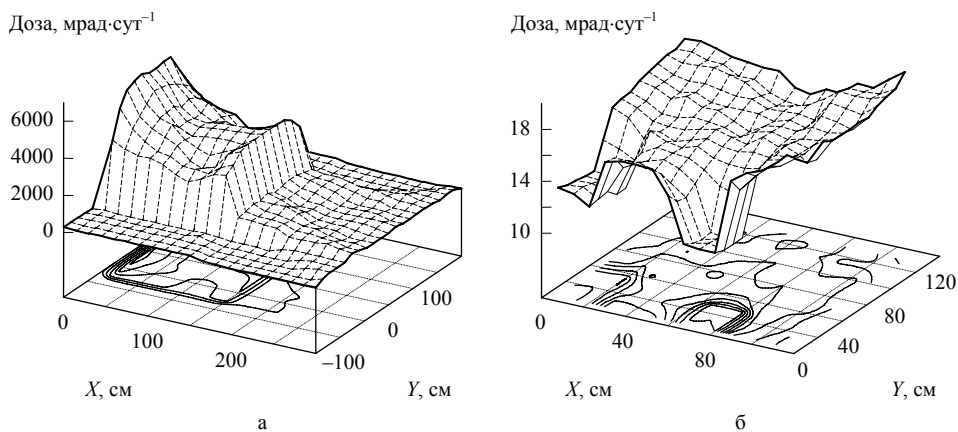


Рис. 4. Распределение суточной дозы космической радиации в сечениях внутри КА: а – для РПЗ; б – для орбиты МКС

На рис. 5а представлена геометрическая модель аппаратного контейнера КА, содержащего блоки электронного оборудования, номера которых указаны на рис.5б.

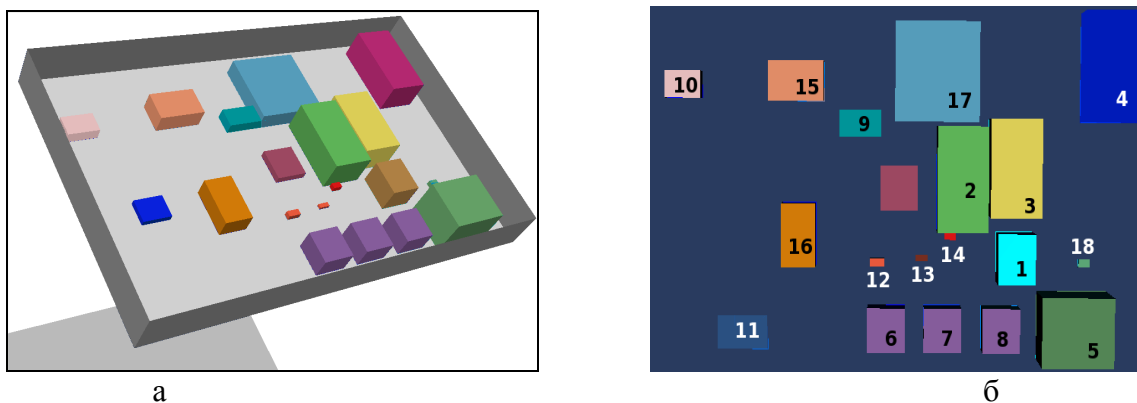


Рис. 5. Геометрическая модель контейнера КА (а) и нумерация блоков (б)

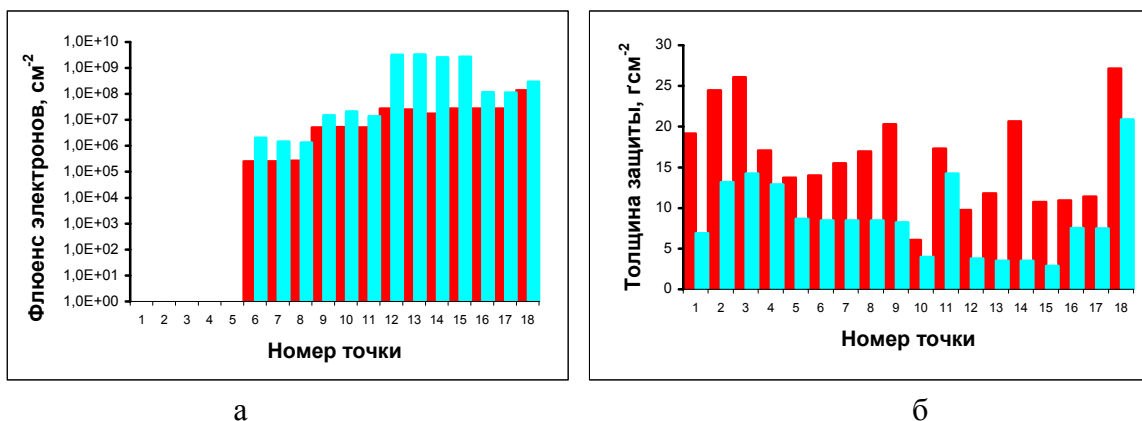


Рис. 6. Толщины защиты для точек в центре 18 блоков с учетом и без учета дополнительного экранирования: а – при заполнения блоков компаундом; б – без заполнения

На рис. 6а представлены результаты расчета эквивалентных толщин защиты для точек, расположенных в центре блоков аппаратуры, номера которых указаны на рис. 5б. Более высокие толщины защиты, показанные темным цветом, соответствуют реальному случаю экранирования, т.е. учету как взаимного экранирования блоков аппаратуры, так и экранирования, создаваемого крупногабаритными элементами конструкции. Меньшие

толщины защиты, показанные светлым цветом, получены без учета дополнительного экранирования блоков, т.е. они обеспечиваются только собственными корпусами (кожухами) блоков и веществом заполнения. Сопоставление этих двух гистограмм наглядно показывает вклад эффекта экранирования.

Критерием, по которому оценивается возможность возникновения электрических разрядов за счет накопления объемного заряда, является величина 10-часового флюенса электронов для рассматриваемого элемента аппаратуры. На рис. 6б приведены результаты расчета этой величины для ряда блоков рассматриваемой аппаратуры с учетом различных условий экранирования. Видно, что в зависимости от этих условий, величина флюенса для различных блоков может отличаться на несколько порядков.

Заключение

Проведенное исследование показало высокую эффективность программы RDOSE при ее использовании для расчета пространственного распределения поглощенной дозы и объемного заряда в элементах конструкции реальных КА сложной конфигурации с неоднородной структурой. Результаты расчетов позволяют оценить степень опасности радиационных воздействий на элементы бортового оборудования, функционирующие при различном экранировании от космических излучений, и выработать при необходимости практические рекомендации по их дополнительной защите.

1. Новые наукоемкие технологии в технике. Энциклопедия, тт. 16, 17. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. Под ред. Новикова Л.С. и Панасюка М.И. М.: ЭНЦИТЕХ, 2000.
2. А.А.Маклецов, В.Н.Милеев, Л.С.Новиков, В.В.Синолиц Космическая экология: моделирование радиационной обстановки на борту космических аппаратов. Инженерная экология, 1997, № 1, с. 39–51.
3. В.В.Синолиц Л.С.Новиков Графический интерфейс для моделирования взаимодействия космических аппаратов с окружающей средой. V Межвузовская научная школа молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине» (Москва, 22–23 ноября 2004 г.). Под редакцией проф. Ишханова Б.С. и проф. Новикова Л.С. М.: Изд-во УНЦ ДО МГУ, 2004, с. 117–124