

## ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук С.Б. Сакуты на диссертацию Чирской Натальи Павловны «Математическое моделирование взаимодействия космических излучений с гетерогенными микроструктурами», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.04.20 — физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника и 01.04.16 — физика атомного ядра и элементарных частиц.

Освоение околоземного пространства потребовало создания специальных космических аппаратов с различными приборами, управляемыми сложнейшей электроникой. Однако космос представляет для них довольно агрессивную среду. Космические аппараты подвергаются воздействию потоков заряженных частиц радиационного пояса Земли и космических лучей, что приводит к преждевременному выходу их из строя. Именно воздействием космической радиации объясняется до половины случаев отказа бортового оборудования, как правильно отмечено в диссертации. Это приводит к снижению сроков активного существования аппаратов, а значит и к удорожанию космических исследований. Поэтому очень важно оценить все последствия негативного воздействия радиации и создать необходимую защиту. Конечно, для достижения указанной цели можно проводить лабораторные эксперименты. Но в них нельзя в полной мере учесть все многообразие свойств космической радиации, а натурные испытания очень дороги, и они часто не в состоянии за достаточно короткое время выявить эффекты от длительного пребывания аппаратов в космическом пространстве. К счастью, в настоящее время в связи с большим прогрессом вычислительной техники и появлением суперкомпьютеров становится возможным проведение расчетов, основанных на математическом моделировании влияния различных компонентов радиации на материалы, используемые в космической технике, что позволяет найти пути улучшения защиты космических аппаратов и прогнозировать сроки их активного существования. Поэтому диссертационная работа Н.П. Чирской, посвященная исследованию взаимодействия излучений с материалами методом математического моделирования, очень актуальна.

При выполнении работы Чирская Н.П. показала прекрасное знание имеющейся научной литературы, список которой очень велик. В первом разделе диссертации дано подробное описание свойств космической радиации как внутри, так и за пределами магнитосферы Земли, рассмотрены принципы математического моделирования радиационного воздействия на материалы в рамках лучевых и стохастических моделей, детально проанализированы особенности конкретных вычислительных программ



(RDOSE, SHIELDOSE, GEANT3, GEANT4, MULASSIS, SRIM и др.), их достоинства и недостатки. Диссертантом убедительно показано, что программные комплексы GEANT сегодня являются одними из самых точных инструментов для решения задач, связанных с радиационным воздействием на материалы в широком диапазоне энергий, и, особенно, для объектов микроэлектроники, позволяя проводить расчеты распределения поглощенной энергии с пространственным разрешением нанометрового диапазона.

Хорошо владея математическим моделированием в рамках метода Монте-Карло, реализованного в современных вычислительных программах, Н.П. Чирская объединила в едином подходе, казалось бы, совершенно разнородные проблемы, это:

- 1) проблемы радиационно-защитных свойств различных материалов, используемых в космической технике;
  - 2) проблема электризации и условий возникновения электрического пробоя в диэлектриках под действием потока электронов;
  - 3) проблемы метрологии телескопических спектрометров и калориметров, используемых в космических исследованиях для мониторинга радиации;
  - 4) проблемы эрозии полимерных материалов под действием потока атомарного кислорода, входящего в состав холодной ионосферной плазмы.
- Такой комплексный подход к решению различных задач является хорошей иллюстрацией силы и возможностей метода, использованного в диссертационной работе.

Центральное место в диссертации занимают расчеты радиационно-защитных свойств современных материалов космической техники, включающих композитные и многослойные экраны, а также сотовые панели. Показано, что увеличение содержания в композитном материале легких элементов приводит к улучшению его защитных свойств. Установлено, что степень ослабления радиации в двух- и трехслойных структурах зависит от последовательности слоев, тогда как при большем числе слоев она определяется усредненными параметрами вещества экрана. Особо надо отметить исследование радиационно-защитных свойств сотовых панелей, которое было выполнено впервые. Установлено, что в ослаблении первичного потока электронов определяющую роль играют процессы многократного рассеяния на стенках сотовой структуры.

Третий раздел диссертации содержит расчеты величин электрического заряда, который может накапливаться в элементах космических аппаратов под действием электронов радиационного пояса Земли. Важным результатом является обнаружение эффекта формирования биполярных электрических зарядов в тонких многослойных структурах, обусловленного утечкой  $\delta$ -электронов, что может привести к росту вероятности электрического пробоя. Проведен анализ условий его возникновения и даны рекомендации, как избежать негативных последствий.

Значительное место в диссертации занимают проблемы точности метрологических характеристик телескопических систем для регистрации заряженных частиц и калориметров для измерения поглощенной дозы. Н.П.



Чирской была разработана и реализована новая методика, основанная на моделировании взаимодействия космических частиц с материалом детекторов. При определении эффективности регистрации электронов предложенная методика имеет преимущество по сравнению с обычным аналитическим методом.

Другим важным результатом диссертационной работы является создание в рамках метода Монте-Карло алгоритма расчета эрозии полимерных материалов под действием потока атомарного кислорода, присутствующего в ионосфере Земли. Такие расчеты приобретают большое значение, так как полимеры находят широкое применение в ракетно-космической технике. Численные параметры модели были определены на основе экспериментальных данных, полученных в НИИЯФ МГУ на специальном ускорителе, дающем потоки кислорода с энергиями в диапазоне 5-80 эВ. Расчеты проводились как для полимеров с дефектом в защитном покрытии, так и для полимерных композитов с введением в его поверхностный слой микрочастиц наполнителя для большей устойчивости полимера к эрозии. Было показано, что защитные свойства наполнителя улучшаются с уменьшением размера микрочастиц и более равномерным их распределением.

Полученные результаты имеют большое научное и практическое значение. Их достоверность вытекает из использования в расчетах хорошо апробированных программных комплексов, их согласием с экспериментальными данными, а также с уже признанными результатами расчетов других авторов.

Практическая ценность работы состоит в возможном использовании полученных данных при разработке новых материалов и элементов защиты аппаратов от космической радиации.

Из недостатков работы можно отметить следующие:

1. В подписи к рисунку 2.16 (стр. 70) не указаны толщины внешних пластин сотовой панели, для которой были выполнены расчеты.
2. В таблице 2.3 (стр. 71) не приводятся размеры ячейки, дана только ее глубина.
3. На рисунках 3.6-3.8 (стр. 82) не объясняется, чем различаются приведенные там три варианта расчетов. Кроме того, не указано, при каком потоке электронов получены зависимости электризации элементов изоляции кабеля от энергии электронов.

Сделанные критические замечания, однако, не ставят под сомнение конечные результаты и выводы работы и не изменяют ее общей положительной оценки.

В целом диссертационная работа представляет собой завершённый научный труд, а полученные результаты могут служить хорошей основой для дальнейших исследований.

Диссертация написана ясным языком. Все материалы опубликованы в виде научных статей и докладов на международных конференциях. Автореферат достаточно полно и правильно отражает содержание диссертации.

Диссертация полностью удовлетворяет требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением №74 Правительства Российской Федерации от 30 января 2002 г. в редакции Постановления №842 Правительства РФ от 24.09.2013 г., предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Считаю, что Чирская Наталья Павловна по уровню квалификации достойна присуждения ей искомой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника и 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

Ведущий научный сотрудник  
НИЦ «Курчатовский институт»  
Доктор физико-математических наук  
Тел. 8 499 1969309, e-mail: [sbsakuta@mail.ru](mailto:sbsakuta@mail.ru)

С.Б. Сакута

Подпись Сакуты Станислава Борисовича  
заверяю

Заместитель директора по научной работе –  
главный ученый секретарь  
НИЦ «Курчатовский институт»



В.И. Ильгисонис

«12» января 2015