

УДК 621.039.553: 539.121.83

В. И. БЕСПАЛОВ, В. М. ЗЫКОВ, В. В. КАШКОВСКИЙ, Ю. А. СОЛОВЬЕВ

Фото К. К.

ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НА УСКОРИТЕЛЯХ ВАРИАЦИЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ И ПОТОКА ЭЛЕКТРОНОВ РАДИАЦИОННЫХ ПОЯСОВ ЗЕМЛИ

Рассмотрены методы лабораторного моделирования спектрально-угловых распределений электронного излучения радиационных поясов Земли в элементах бортовой аппаратуры космического аппарата на основе использования линейного ускорителя электронов и бетатрона. Методика моделирования основана на комбинации численного эксперимента (метод Монте-Карло) и физического измерения параметров поля электронного излучения. Входными данными для моделирования являются: тип орбиты, геометрия и состав материалов оболочки космического аппарата, параметры первичного пучка ускорителя электронов. Используется мишень специальной конструкции или автоматическая система управления энергией ускоренных электронов в каждом цикле ускорения бетатрона. Методы обеспечивают низкий фон тормозного излучения и высокую эффективность использования электронного пучка: до (2–3)% для линейного ускорителя ЭЛУ-4 и до 10% – для бетатрона МИБ-6Э.

1. Введение

Радиационное заряжение диэлектрических материалов и последующее изменение характеристик материалов электронных приборов бортовой аппаратуры космических аппаратов (БА КА) влечет отказы и сбои в функционировании аппаратуры и ограничивает ресурс работы КА. В 90-е гг. значительное количество отказов КА связи, движущихся по геостационарной орбите, было связано с аномальным заряжением внутренних диэлектриков [1]. Причиной этих аномалий являются процессы на Солнце, вызывающие увеличение спектральной жесткости электронной компоненты радиационных поясов Земли. Результаты по измерению аномальной вариации спектральной плотности электронов для натурных условий на геостационарной орбите приведены в работе [2]. Примеры аномальных вариаций плотности потока электронов с энергией более 2 МэВ для геостационарной орбиты, которые коррелируют с отказами БА, приведены в [1]. Характерная длительность аномальных вариаций составляет от нескольких часов до нескольких суток при увеличении плотности потока в максимуме почти на порядок.

Для установления причин и вероятностных характеристик отказов проводят лабораторные испытания с моделированием натурной радиационной обстановки и последующей экстраполяцией полученных результатов на условия космической среды. Лабораторное моделирование спектрально-угловых характеристик ионизирующего излучения по сути является обратной задачей по отношению к задаче определения характеристик ионизирующего излучения в элементах БА КА в натурной радиационной обстановке по данным этой обстановки. Но обратная задача не имеет однозначного решения, поскольку может быть решена на основе различных типов источников ионизирующего излучения. При решении этой задачи необходимо по характеристикам ионизирующего излучения непосредственно в космическом пространстве, за оболочкой КА или в элементах БА КА выбрать параметры моделирующей установки – излучателя и устройства формирования поля излучения. При моделировании с применением уже имеющегося излучателя подбор параметров сводится к разработке методики управления выходными параметрами излучателя и разработке устройства формирования поля излучения.

В большинстве случаев основной составляющей ионизирующего излучения на борту КА является электронное излучение, обусловленное электронной компонентой радиационных поясов Земли. Поскольку рентгеновские и радионуклидные излучатели не дают требуемую величину верхней границы энергетического спектра электронов, то единственным излучателем, обеспечивающим адекватное воспроизведение в лабораторных условиях высокоэнергетической компоненты электронов ЕРПЗ (естественных радиационных поясов Земли), является ускоритель электронов.

Целью данной работы является разработка метода, аппаратуры и программного обеспечения для лабораторного моделирования вариаций плотности потока и спектральной плотности высокоэнергетической электронной компоненты ЕРПЗ, в том числе за конструкционной защитой КА. Особое внимание уделено лабораторному моделированию электронных полей на малогабаритном бетатроне с максимальной энергией электронов до 6 МэВ. Бетатрон обеспечивает уникальную возможность независимого управления энергией и интенсивностью электронного излучения в каждом импульсе излучения по заданной программе. Он может работать круглосуточно под управлением микропроцессора, обеспечивая требуемые вариации энергетического спектра и плотности потока электронов. Рассмотрены следующие вопросы:

- определение спектральных характеристик электронного излучения методом Монте-Карло в элементах БА в натурных условиях с учетом конструкционной защиты КА;

- методика и оборудование для лабораторного моделирования высокозенергетической компоненты натурного спектра электронов с использованием линейного ускорителя и бетатрона;
- возможности бетатрона для моделирования вариаций плотности потока и спектральной плотности высокозенергетической электронной компоненты ЕРПЗ (в том числе за конструкционной защищенной КА), причем вариации параметров электронного излучения могут быть связаны как с движением КА по орбите через радиационные пояса, так и с отдельными вспышками на Солнце.

2. Методика моделирования

Задача моделирования сводится к правильному выбору и управлению энергией ускоренных электронов, выбору параметров поглотителей-рассеивателей, обеспечивающих необходимые спектрально-угловые характеристики электронов в поле облучения, а также к выбору способа получения поля излучения с необходимым поперечным размером. Размеры поля облучения достигаются или за счет рассеяния электронов в фольгах или за счет магнитной развертки электронного пучка, выведенного из ускорителя. Поддержание условий, обеспечивающих заданные спектрально-угловые характеристики поля излучения, достигается на основе применения системы контрольно-измерительных устройств, контролирующих параметры пучка ускоренных электронов и работу ускорителя электронов.

Исходными данными для моделирования спектра электронов в элементах БА КА являются: характеристики натурной радиационной обстановки; конструктивные особенности КА, обеспечивающие его радиационную защиту; конструктивные модели элементов БА, учитывающие структуру, геометрические размеры, а также плотность и химический состав всех компонент. В процессе моделирования, исходя из типа орбиты КА, определяют характеристики натурных полей электронного излучения и их изменение во времени. При моделировании усредненных радиационных условий эти характеристики могут быть представлены в виде математических выражений, не зависящих от времени. Далее на основании конструкторско-технологической документации строится расчетная модель элемента БА для проведения на ней расчетов методом Монте-Карло. Численным моделированием переноса излучения рассчитываются спектрально-угловые характеристики излучения и мощность дозы в элементе БА или в радиационно-чувствительном объеме этого элемента в натурных условиях. Далее на основе экспериментально определенных характеристик электронного пучка ускорителя и их зависимости от режима работы ускорителя методом численного моделирования рассчитываются характеристики устройства формирования поля излучения (конвертера), обеспечивающие требуемое спектрально-угловое распределение электронов в облучаемом элементе БА, и определяется необходимый режим работы ускорителя. В заключение проводится тестовый эксперимент для подтверждения правильности работы программы расчета, выбора параметров устройства формирования и режима работы ускорителя электронов.

2.1. Модель натурной обстановки

Стандартизованные данные по плотностям потока электронов естественных радиационных поясов Земли для периодов минимума и максимума солнечной активности систематизированы в [3]. Основные справочные сведения представлены также в [4]. Угловое распределение электронов при этом является изотропным. При моделировании усредненных характеристик натурной обстановки, обусловленной электронами радиационных поясов Земли, усредненный интегральный спектр в области энергий 0,2 – 4 МэВ может быть описан в виде

$$F(>E) = C_1 \cdot \exp(-E/C_2),$$

где C_1 – коэффициент, характеризующий плотность потока электронов; $C_2 = (0,29 - 0,42)$ МэВ – коэффициент, характеризующий жесткость спектра и зависящий от типа орбиты КА.

Для учета изменения потоков электронов во времени как вследствие движения КА относительно Земли, так и вследствие солнечной активности разработаны компьютерные программы. Примером является разработанная в НИИ интроскопии программа для расчета плотности потоков электронов и протонов по энергетическим интервалам как функция типа орбиты, времени полета и фазы цикла солнечной активности. Программа выполняет считывание начальных данных по пространственному распределению протонов и электронов в (L, B) -координатах для годов солнечного максимума и минимума и экстраполирует данные на текущее время, исходя из цикла в 11,1 года. Далее орбитальные координаты преобразуются в солнечно-магнитные с вычислением модуля вектора напряженности магнитного поля (B -координата), по расстоянию силовой линии от поверхности Земли вычисляется L -координата и, наконец, интерполируются значения потоков в энергетических интервалах по данным в памяти ЭВМ.

2.2. Расчетные модели элементов БА и конструкционной защиты КА

Расчетная модель элемента в составе БА КА представляет собой объемную структуру, которая представлена в некоторой системе координат с обязательным выделением областей, различающихся по плотности и химическому составу материала. В соответствии с особенностями геометрического блока используемой нами программы расчета методом Монте-Карло реальная геометрия элемента БА заменялась эквивалентной моделью с цилиндрической симметрией, но с сохранением конструктивных особенностей и реальных размеров. При этом отличие результатов расчета для более точной модели не превышало установленную погрешность. На рис.1 приведен пример использованной нами расчетной модели кремниевой КМОП интегральной микросхемы (ИМС). Для численного моделирования переноса излучения в элементе БА или в радиационно-чувствительном объеме этого элемента в натурных условиях требуется расчетная модель конструкционной радиационной защиты КА. Эта модель выполняется на основе конструкторской документации на КА и также должна учитывать особенности геометрического блока имеющейся программы расчета методом Монте-Карло. Из-за большой суммарной массовой толщины КА по сравнению с пробегом среднестатистического электрона радиационных поясов в материале КА, часть расчетов конструкционной защиты КА может быть выполнена в плоской геометрии. На рис.2 приведен пример геометрии расчета для натурных условий.

2.3. Экспериментальное определение характеристик первичного электронного пучка ускорителя

Экспериментальное определение характеристик электронного пучка ускорителя и их зависимость от режима работы ускорителя осуществляются на основе системы контрольно-измерительных устройств, которые обеспечивают измерение плотности потока электронов, равномерности радиального распределения электронов в пучке, энергетического спектра электронов. В качестве измерительных устройств могут применяться цилиндр Фарадея, ионизационная камера, магнитный спектрометр, секционированный цилиндр Фарадея. Обязательным является анализ всех факторов, влияющих на погрешность измерений, и оценка относительной погрешности всех измеряемых параметров. Измеренные характеристики электронного излучения ускорителя используются затем в виде исходных данных при численном моделировании характеристик устройства формирования и определении необходимого режима работы ускорителя.

2.4. Расчет устройства формирования поля электронов и идентификация спектров электронов

Важнейшим свойством моделирующей установки является способность воспроизводить в элементах БА в процессе испытаний те же физические процессы, что и в натурных условиях эксплуатации. Поскольку протекание процессов, стимулированных радиационным воздействием, в значительной мере определяется характеристиками поля излучения, то часто эффективность испытательной моделирующей установки определяется с той точностью, с которой она воспроизводит в элементах аппарата те спектрально-угловые характеристики поля излучения, которые имеют место в натурных условиях на борту КА, движущегося по заданной орбите.

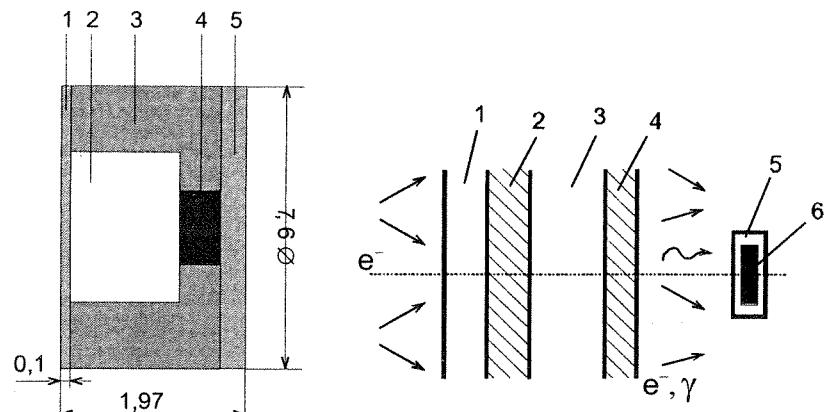


Рис.1

Рис.2

Рис.1. Геометрия расчета ИМС с корпусом ОС401.14-5: 1 – передняя крышка; 2 – азот; 3 – керамика; 4 – кремний; 5 – задняя крышка

Рис.2. Геометрия расчета потоковых спектров электронов в ИМС в натурных условиях: 1 – экранно-вакуумная изоляция; 2 – стенка гермоконтейнера; 3 – азот; 4 – стена воздуховода; 5 – корпус ИМС; 6 – кристалл Si

В процессе расчета характеристик конвертера производится идентификация лабораторных и натурных условий сравнением токовых или потоковых спектров электронов соответственно за оболочкой КА или в элементе БА в лабораторных и натурных условиях. При расчете спектра в натурных условиях используются разработанные ранее модели натурной обстановки, конструкционной защиты и модель элемента БА. Расчет ведется методом Монте-Карло с использованием банка данных по сечениям взаимодействия. Для правильного учета излучения, попадающего в рассматриваемый элемент БА через боковые стенки, поперечные размеры источника излучения выбираются при расчете существенно большие поперечных размеров элемента БА. При моделировании траекторий электронов необходим учет упругих столкновений электронов, ионизационных столкновений, генерации тормозного излучения, отличий в потерях электронов и позитронов, аннигиляции электронов и позитронов. Минимальная энергия, до которой строятся траектории электронов и позитронов, обычно не выше 10 кэВ. При моделировании переноса фотонов учитываются эффект Комптона, фотоэффект и эффект образования электронно-позитронных пар. Минимальная энергия фотонов берется не более 1 кэВ. Статистическая точность порядка 10–15% достигается при моделировании 20–25 тысяч историй.

При моделировании потокового спектра электронов за конвертером или в элементе БА для лабораторных условий учитывается, что пучок электронов от ускорителя с соответствующим энергетическим и угловым распределением падает на однородный или гетерогенный конвертер, за которым помещается элемент БА. Конвертер, помимо трансформации энергетического спектра электронов в область низких энергий, обеспечивает за счет рассеяния электронов необходимое их угловое распределение. С целью достижения идентичности энергетических и угловых характеристик для моделируемого и натурного спектров электронов варьируются параметры конвертера и первичного пучка электронов.

Рассчитанные методом Монте-Карло спектры электронов для натурных и лабораторных условий получаются в виде таблиц (гистограмм) при неизвестных параметрах обоих распределений. Поэтому должна проводиться проверка того, что эти спектры принадлежат одной функции распределения, например, на основе непараметрического критерия однородности двух выборок Колмогорова–Смирнова [5, 6]. Для оценки согласованности полученного и заданного энергетических распределений можно также использовать критерий согласия Пирсона [6]. Расчеты заканчиваются выбором параметров конвертера и режима работы ускорителя электронов.

2.5. Тестовый эксперимент

Для подтверждения правильности выбора устройства формирования и режима работы ускорителя электронов проводится тестовый эксперимент. При этом могут измеряться как дифференциальные (например, энергетический спектр), так и интегральные (доза или мощность дозы) характеристики сформированного поля электронного излучения как за конвертером, так и внутри него. При измерении интегральных характеристик, для обеспечения режима многоточечных измерений, тестовый эксперимент может быть спланирован, как измерение характеристики поля излучения при вариации параметров конвертера или как измерение дозы ионизационной камерой в зависимости от расстояния до конвертера. Вариация размеров конвертера может быть выполнена за счет введения дополнительных поглотителей перед конвертером.

Тестовый эксперимент удобнее проводить на основе сравнения двух выборок для характеристик поля излучения, полученных, с одной стороны, в численном эксперименте, выполненном методом Монте-Карло, и, с другой стороны, путем экспериментального определения этих же самых характеристик. Сравнение полученных выборок результатов тестового эксперимента может быть выполнено с использованием обсуждавшихся ранее критериев согласия. При численном моделировании тестового эксперимента расчеты ведутся на основе той программы, которая была использована ранее для определения параметров устройства формирования поля излучения и режима работы ускорителя электронов. В расчет дополнительно закладывается модель используемого детектора излучения, например, ионизационной камеры или магнитного спектрометра. Для уменьшения влияния имеющегося в помещении рассеянного излучения можно использовать встроенную в конвертер ионизационную камеру. Встроенная ионизационная камера заранее закладывается в геометрический блок программы расчета параметров конвертера.

3. Общие принципы моделирования полей на ускорителях электронов

Методы моделирования могут подразделяться в зависимости от используемых средств моделирования:

- моделирование на основе однородных или гетерогенных рассеивающих экранов-конвертеров (пассивные средства);

– моделирование с применением управления энергией ускоренных в ускорителе электронов (активные средства);

– моделирование с применением комбинации пассивных и активных средств.

Моделирование с применением пассивных средств является основным для тех ускорителей электронов, в которых затруднено оперативное управление энергией ускоренных электронов. Примером такого ускорителя является линейный ускоритель электронов. Моделирование с применением активных средств, а также комбинации активных и пассивных средств возможно для ускорителей, у которых энергия электронов может оперативно изменяться по заданной программе. Примером такого ускорителя является бетатрон, в котором энергия ускоренных электронов может управляемым образом изменяться в каждом импульсе излучения. Большшим преимуществом активного метода является возможность моделирования во времени не только вариаций плотности потока электронов, но также вариаций энергетического спектра электронов.

По отношению к способу формирования поперечных размеров поля электронного излучения методы моделирования также можно подразделить на пассивные и активные. В пассивных методах для формирования необходимых поперечных размеров поля используется способ рассеивающих фольг, включая фольгу выходного окна ускорителя электронов. В активных методах для формирования используется магнитная развертка пучка электронов. Кроме того, способы моделирования различаются по вкладу первичных электронов пучка в поток электронов в поле облучения. Формирование спектра электронов можно осуществить только за счет вторичных электронов, рожденных тормозным излучением первичных электронов пучка. В этом случае суммарный поток электронов складывается из потока вторичных электронов, выходящих из конвертера, и потока электронов, рожденных тормозным излучением в облучаемом объекте. Недостатком использования тормозного излучения является низкая эффективность использования первичного электронного пучка.

Низкий фон тормозного излучения при высокой эффективности использования первичных электронов пучка достигается применением рассеивающих экранов-конвертеров типа "жалюзи" [7]. Применение этих конвертеров для формирования спектра электронов позволяет эффективно моделировать спектр электронов за счет электронов отраженных от наклонных пластин жалюзи. Еще более эффективно моделирование с комбинацией пассивных и активных средств.

Ниже приведены примеры лабораторного моделирования электронной компоненты естественных радиационных поясов Земли, выполненные за последние годы в НИИ интроскопии Томского политехнического университета. Некоторые из полученных результатов были доложены на ряде конференций [8–11].

3.1. Моделирование энергетических распределений электронов ЕРПЗ на ускорителях

Для описания интегрального спектра электронного излучения в натурных условиях использовалось выражение (1), а угловое распределение электронов полагалось изотропным. Расчеты потоковых спектров электронов в ИМС проводились с учетом реальной конструкции корпусов микросхем (корпус типа ОС401.14-5 и корпус типа 402.16). В соответствии с особенностями геометрического блока используемой программы Монте-Карло реальная прямоугольная геометрия микросхем заменялась модельной геометрией с аксиальной симметрией. При расчете сохранялись конструктивные особенности, реальные размеры и материалы элементов микросхем. Полученные расчетные выборочные распределения электронов аппроксимировались с помощью системы функций плотности Пирсона [12]. Значения параметров этих функций определены методом моментов путем приравнивания соответствующих первых четырех моментов распределений плотности вероятностей, полученных в расчете и при аппроксимации.

3.2. Моделирование электронных спектров на основе тормозного излучения

Форма спектра электронного излучения в натурных условиях на борту КА определяется наличием хотя бы одного защитного экрана (например, стенка гермоконтейнера КА) и имеет максимум в диапазоне от 0,2 до 0,8 МэВ в зависимости от параметров суммарного защитного экрана. Это происходит потому, что по мере ослабления первичного излучения спектр электронов становится более жестким, то есть его высокоэнергетическая часть претерпевает меньшие изменения, чем низкоэнергетическая. Высокая энергия электронов в ускорителях позволяет более полно моделировать высокоэнергетическую часть спектра электронов ЕРПЗ. Однако решение этой задачи не может быть достигнуто простым пропусканием выведенного из ускорителя пучка электронов через плоские однородные или

гетерогенные экраны. Натурный и лабораторный спектры при этом имеют противоположную асимметрию.

Если ускоритель имеет необходимый запас по току пучка ускоренных электронов, то задача моделирования спектра в заданной части объекта (например, интегральной микросхемы) может быть решена путем использования тормозного излучения. Действительно, форма спектра тормозного излучения от источников моноэнергетических электронов за различными барьерами (см., например, [14]) имеет тот же тип асимметрии, что форма спектра электронов за конструкционной защитой КА. Можно ожидать, что спектр вторичных электронов, рожденных фотонами тормозного излучения в материале поглотителя, также будет близок к исходному спектру. Как показали расчеты на основе программы [15], удовлетворительный результат достигается при использовании конвертера в виде гетерогенного барьера, состоящего из тонкого слоя вещества с большим атомным номером Z и расположенным за ним слоем вещества соответственно с малым и большим Z .

В наших расчетах в качестве элемента БА фигурировала микросхема КМОП-технологии. Спектр электронов определялся в кремниевом кристалле этой микросхемы и складывался из электронов, вылетающих из материала, стоящего перед конвертером (например, гетерогенного барьера Pb-Al), и электронов, рожденных тормозным излучением в материалах самой микросхемы. Первичный спектр электронов ускорителя ЭЛУ-4 был измерен с помощью магнитного спектрометра, а для натурного спектра использовалось выражение (1) при $C_2 = 0,29$ МэВ.

Протяженность высокоэнергетической части спектра

можно регулировать увеличением энергии пучка электронов ускорителя.

В каждом конкретном практическом случае, в соответствии со степенью жесткости моделируемого спектра, необходимую его форму можно подобрать путем изменения начальной энергии пучка электронов и толщины слоев конвертера. На рис.3 изображен потоковый спектр электронов в кремниевом кристалле микросхемы с корпусом типа 402.16, находящемся на расстоянии 14 мм за конвертером свинец–плексиглас–свинец, расположенным в пучке ускорителя ЭЛУ-4 со средней энергией электронов 4 МэВ в сравнении с электронным спектром в этой же микросхеме в натурных условиях. Расчеты показали, что эффективность использования первичного пучка значительно выше, когда сначала формируется электронный пучок, обеспечивающий однородное поле облучения с необходимымиоперечными размерами, а затем в поле облучения помещается гетерогенная мишень-конвертер.

Из расчетов следует, что потоку электронов в 1 электрон·см⁻²·с⁻¹, падающему на разработанный гетерогенный барьер-конвертер, соответствует мощность дозы $3,4 \cdot 10^{-11}$ рад·с⁻¹ в кремниевой микросхеме с корпусом типа 402.16. Таким образом, для потока электронов порядка 10^{11} см⁻²·с⁻¹, при котором еще отсутствует значительный радиационный нагрев, мощность дозы для ускорителя ЭЛУ-4 составит $1,2 \cdot 10^4$ рад/ч. Для сравнения в натурных условиях при защитном экране из 2 мм сплава МА2-1 мощность дозы для этой же микросхемы составит $7,7 \cdot 10^{-3}$ рад/ч или $2,4 \cdot 10^5$ рад/год.

Для воспроизведения вариаций плотности спектрального распределения в высокоэнергетической области спектра электронов, полученного на основе тормозного излучения, необходимо управлять энергией ускоренных электронов, а иногда и параметрами конвертера. Это связано со значительными трудностями.

4. Моделирование с применением специальных рассеивающих экранов.

Нами проведено исследование эффективности конвертера типа "жалюзи" для формирования электронного спектра, близкого натуральному, из электронного пучка линейного ускорителя ЭЛУ-4. Было исследовано несколько модификаций конвертера типа "жалюзи". В простейшем случае конвертер представлял собой набор коаксиальных цилиндров различных радиусов, вложенных друг в друга и разрезанных под некоторым углом относительно оси цилиндров. Первичный моноэнергетический пучок электронов падает на его левый торец и, рассеявшиеся в стенках цилиндров, выходит в воздух, имея некоторое энергетическое и угловое распределение. Изменять форму этого распределения можно вариацией параметров конвертера (длину цилиндров, толщину и материал стенок цилиндров, толщину воздушного зазора между цилиндрами и угол наклона).

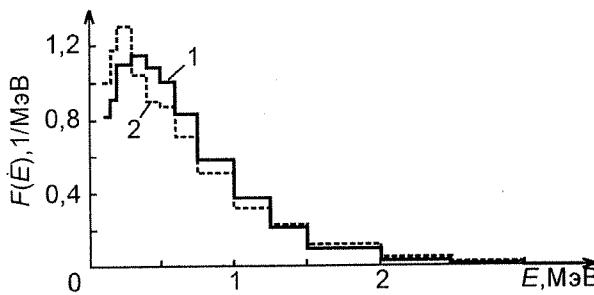


Рис. 3. Потоковые спектры в ИМС от разных источников:
1 – от натурного спектра; 2 – от ЛУЭ-4 с $E_{ср} = 4$ МэВ

Наличие воздушного зазора между цилиндрами увеличивает коэффициент пропускания низкоэнергетической компоненты излучения, которая имеет широкое угловое распределение и достаточно легко попадает в воздушные каналы. Это сдвигает максимум спектра излучения в область низких энергий. Высокоэнергетическая компонента излучения распространяется преимущественно в прямом направлении и ее ослабление определяется суммарной толщиной стенок цилиндров. Для уменьшения тормозного излучения в качестве материала стенок цилиндров рассматривались алюминий и титан.

Воздушный зазор между цилиндрами изменялся от 5 до 10 мм, а угол разреза – от 45 до 60°. На рис.4 приведен пример полученного энергетического распределения электронов за конвертером, цилиндры которого изготовлены из титана с толщиной стенки 1 мм при воздушном зазоре между стенками в 1 мм и угле разреза 45°. В качестве первичного пучка использовался электронный пучок линейного ускорителя со средней энергией 3,46 МэВ. Коэффициент использования первичного пучка достигает при этом нескольких процентов.

На основе магний–алюминиевого сплава для ускорителя ЭЛУ-4 было сконструировано устройство типа "жалюзи", которое при низком фоне тормозного излучения моделирует энергетический спектр электронов за конструкционной защитой КА, обеспечивая приемлемую однородность поля излучения при поперечных размерах до 1 метра. При моделировании на линейном ускорителе ЭЛУ-4 высокоэнергетической части спектра электронов ЕРПЗ ($E > 0,6$ МэВ) на площади (20×20) см² максимальная плотность потока электронов за конвертером достигает $9,4 \cdot 10^{10}$ см⁻²·с⁻¹.

5. Моделирование электронов ЕРПЗ на бетатроне с управлением энергией электронов в каждом импульсе излучения

Моделирование натурного спектра на бетатроне заключается в программируемом выводе из ускорителя циклической последовательности из временных групп импульсов электронов определенной энергии и формировании требуемого спектра за барьером из легкого вещества путем комбинирования этих групп импульсов. Определяя на основе метода Монте-Карло спектрально-угловые характеристики электронов за барьером из легкого материала для пучков бетатрона с различной начальной дискретной энергией и комбинируя их путем суммирования с различными весовыми отношениями, можно интегрально за период циклической последовательности получить в заданной области пространства за барьером требуемые спектрально-угловые характеристики электронов.

Энергия электронов, выводимых из бетатрона, определяется временем их ускорения после момента инжекции до момента вывода путем возмущения магнитного поля. Выводимые электроны обладают малым энергетическим разбросом и выходят из ускорительной камеры в краевое поле бетатрона и далее по траекториям, которые не зависят от устройства вывода [16]. Азимутальное распределение электронного пучка на выходе из бетатрона слабо зависит от энергии ускоренных электронов. Управление энергией выводимого электронного пучка заключается в изменении времени задержки между нарушением управляющего поля секторным возмущающим полем и моментом инжекции. Простота управления выводом электронов из камеры бетатрона, возможность регулировки их энергии и постоянство геометрических параметров электронных пучков с разными энергиями позволяет эффективно осуществить моделирование спектра электронов с заданными параметрами. Основной недостаток выведенного из бетатрона электронного пучка заключается в том, что плотность потока частиц по сечению пучка весьма неоднородна [17]. Неоднородность пучка обусловлена физикой процесса вывода. Поле облучения с достаточно высокой степенью однородности достигается благодаря специальной системе формирования.

Расчеты показали, что для моделирования натурного спектра за оболочкой КА достаточна совокупность групп электронов, выводимых из бетатрона с дискретными энергиями от 1,4 до 6 МэВ. Количество дискретных каналов по энергии при этом не превосходит 12–15. Число импульсов излучения по каждому дискретному каналу колеблется от 1 до 3000, а в более упрощенном случае – от 1 до 500.

Для реализации этого подхода была разработана система автоматического регулирования энергетического спектра частиц на основе многопозиционного триггера. Переключение каждой ячейки триггера приводит к изменению времени задержки импульса возмущающего поля относительно мо-

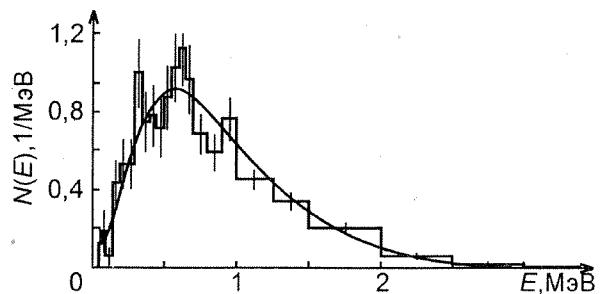


Рис.4. Токовый спектр электронов: гистограмма – расчет за конвертером типа жалюзи; кривая – натурный спектр $C_2 = 0,415$

мента инжекции электронов в ускоритель и, тем самым, обеспечивает вывод электронов определенной энергии из бетатрона. Интервал времени между переключением ячеек триггера регулируется запоминающим устройством и обеспечивает необходимый вклад частиц той или иной энергии в суммарный спектр. Время переключения каналов регулируется от 10 мс до 30 с, что позволяет получать в одном цикле от 1 до 3000 импульсов выведенных электронов на каждом канале при работе ускорителя в режиме 100 Гц. Циклическое переключение ячеек триггера обеспечивает квазинепрерывность суммарного спектра во времени.

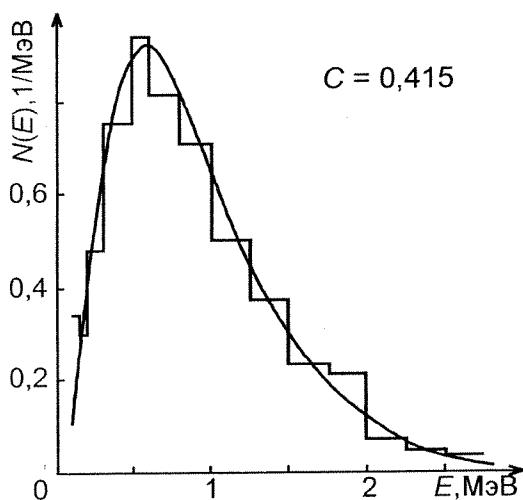


Рис.5. Спектры электронов за Al-барьером толщиной 4.2 мм: сплошная кривая – натурный спектр; гистограмма – смоделированный спектр

перимента производилось сравнение расчетного и экспериментального распределения мощности поглощенной дозы в специальном гетерогенном поглотителе от моноэнергетического и смоделированного пучков бетатрона. Кроме того, были выполнены эксперименты с вариацией толщины алюминиевого рассеивателя. Измерения проводили с помощью прутковой ионизационной камеры VA-K-252.1 дозиметра VA-J-18. Сравнение результатов экспериментов и расчетов показывает их согласие в пределах 8%. Таким образом, результаты тестового эксперимента однозначно подтвердили идентичность моделируемого на бетатроне спектра спектру, полученному расчетом методом Монте-Карло и использованному в качестве основы для программирования работы устройства управления спектром электронов.

Разработанный способ моделирования спектра на основе электронного пучка бетатрона обладает низким фоном тормозного излучения и обеспечивает высокую эффективность использования электронного пучка (до 10%). В рассмотренном выше варианте требуемая спектральная плотность электронного излучения формируется интегрально за время 6 с. За последующие 6 с может быть сформирован поток электронов с другой желаемой спектральной плотностью распределения при сохранении того же углового распределения – близкого к полуизотропному. Поэтому этим способом можно эффективно моделировать вариации спектральной плотности электронного излучения.

6. Оценка возможностей бетатрона для моделирования вариаций характеристик электронных пучков

Бетатрон обеспечивает уникальную возможность независимого управления энергией и интенсивностью электронного излучения в каждом импульсе излучения по заданной программе. Он может работать круглосуточно под управлением микропроцессора, обеспечивая требуемые вариации энергетического спектра и плотности потока электронов. Конкретные результаты моделирования вариаций спектральной плотности и плотности потока электронного излучения зависят от типа бетатрона (малогабаритный импульсный, сильноточный и т.п.). Приведенные ниже оценки относятся к малогабаритному импульсному бетатрону разработки НИИ интроскопии Томского политехнического университета. Такой бетатрон на максимальную энергию электронов 4,5–6 МэВ при потребляемой мощности 2–3 кВт вполне может быть использован для моделирования высокоэнергетической ($E > 0,8$ МэВ) электронной компоненты ЕРПЗ.

Практическое моделирование спектра электронов, на основе предварительно сделанных расчетов методом Монте-Карло, было осуществлено за мишенью из алюминия толщиной 4,2 мм на малогабаритном импульсном бетатроне МИБ-6Э с выводом пучка. В соответствии с расчетными рекомендациями бетатрон был настроен на вывод электронов с фиксированными энергиями: 2,6, 2,8, 3,0, 3,2, 3,4, 3,8, 4,0, 4,2 МэВ. Различие в интенсивности частиц разной энергии на выходе из камеры бетатрона составляет не более 10–15%. Результат моделирования параметров спектра электронов бетатрона за алюминиевым рассеивателем приведен на рис.5 в сравнении с распределением натурного спектра на борту КА. Полное время переключения 11 каналов энергии за один цикл составило около 6 с. За это время интегрально формируется требуемое спектрально-угловое распределение электронов.

Чтобы удостовериться, что смоделированный экспериментально спектр электронов совпадает с расчетным и соответствует натуральному спектру, был выполнен специальный тестовый эксперимент. В процессе тестового эксперимента производилось сравнение расчетного и экспериментального распределения мощности поглощенной дозы в специальном гетерогенном поглотителе от моноэнергетического и смоделированного пучков бетатрона. Кроме того, были выполнены эксперименты с вариацией толщины алюминиевого рассеивателя. Измерения проводили с помощью прутковой ионизационной камеры VA-K-252.1 дозиметра VA-J-18. Сравнение результатов экспериментов и расчетов показывает их согласие в пределах 8%. Таким образом, результаты тестового эксперимента однозначно подтверждают идентичность моделируемого на бетатроне спектра спектру, полученному расчетом методом Монте-Карло и использованному в качестве основы для программирования работы устройства управления спектром электронов.

Бетатрон генерирует не менее чем $2 \cdot 10^9$ электронов за цикл ускорения при частоте импульсов 50, 100 или 200 Гц или $2 \cdot 10^{11}$ с⁻¹ при частоте 100 Гц. На таком бетатроне можно моделировать вариации параметров электронного излучения, которые связаны как с движением КА по орбите через радиационные пояса Земли, так и обусловленные отдельными мощными вспышками на Солнце. Поскольку эффективность преобразования исходного спектрально-углового распределения электронов на выходе из бетатрона в полуизотропное распределение с натуральными энергетическими характеристиками составляет не ниже 5%, то плотность потока электронов после моделирования достигает $1 \cdot 10^8$ см⁻²·с⁻¹ при площади облучения около 100 см². Такая величина плотности потока достаточна для решения большинства задач наземных испытаний элементов БА КА. Применение развертки электронного пучка позволит добиться более высокой эффективности трансформации при высокой однородности поля облучения. С достаточно высокой точностью реальные параметры электронного пучка (энергия и интенсивность) в каждом импульсе излучения могут быть проконтролированы, соответственно, по величине магнитного поля в момент вывода пучка из ускорительной камеры и по показаниям проходной импульсной ионизационной камеры. На основе этих данных можно вносить коррекцию в процесс формирования поля электронного излучения.

Вариации интенсивности излучения в каждом импульсе могут быть выполнены также без изменения энергии ускоренных электронов, если дозированным возмущением изменять число захваченных в ускорение электронов в начальной стадии ускорения. Этот процесс может быть автоматизирован и подчинен управлению по заданной программе.

В силу малогабаритности и транспортабельности бетатрона, его можно использовать в комбинации с другими источниками излучения для воспроизведения высокоэнергетической части космического спектра электронов. Следовательно, бетатрон может быть эффективным средством лабораторного моделирования вариаций высокоэнергетической компоненты электронов ЕРПЗ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wrenn G. L. // Journal of spacecraft and rockets – May–June 1995. – V.32 – № 3 – P.514–520.
2. Bond R. A., Latham P. M. Report "An analysis of internal charging-phenomena", prepared for ESA, Document No. TLPA/31942/Rep/1, 1994.
3. ГОСТ 25645.139-86. Пояса Земли радиационные естественные. Модель пространственно-энергетического распределения плотности потока электронов. – М.: Изд-во стандартов, 1986.
4. Авакян С. В., Вдовин А. И., Пустарников В. Ф. Ионизирующие и проникающие излучения в околосземном космическом пространстве: Справочник. – СПб: Гидрометеоиздат, 1994. – 501 с.
5. Холлендер М., Вульф Д. А. Непараметрические методы статистики. – М.: Финансы и статистика. – 1983. – 518 с.
6. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. – М.: ГИФМЛ, 1962; Справочник по прикладной статистике / Под ред. Э.Ллойда, У.Ледермана. – М.: Финансы и статистика, 1989. – Т.1. – 501 с.
7. Anderson D. L., Dahmus R. G. // Spacecraft and Rockets. – 1975. – V.4. – №.3.
8. Радиационная стойкость бортовой аппаратуры и элементов космических аппаратов: Материалы конференции / Под ред. В.М. Зыкова. – Томск, 1991. – С.33–34, 154–159, 168–171.
9. Bespalov V. I., Zuykov V. M. et al. The methodology of radiation testing of SC equipment elements and units with a service life of 10–15 years // Междунар. конф. "Проблемы взаимодействия ИСЗ с космической средой", Новосибирск, 15–19 июня 1992 г. – Иркутск, 1992. – С.117–118.
10. Беспалов В. И., Зыков В. М., Кашковский В. В. // Рос. конф. "Взаимодействие космических аппаратов с окружающей средой", Иркутск, 1–3 ноября 1995 г.: Программа и тез. докл. РАН СО. – Иркутск, 1995. – С.48–49.
11. Беспалов В. И., Зыков В. М., Кашковский В. В. // Сб.: IV Всерос. конф. по модификации свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц: Тез. докл. 13–17 мая 1996 г. – Томск, 1996. – С.196–198.
12. Поллард Дж. Справочник по вычислительным методам статистики / Пер. с англ. В.С. Занадворова; Под. ред. Е.М. Четыркина. – М.: Финансы и статистика, 1982. – 334 с.
13. Rester D. H., Derricks J. H. Electron transmission measurements for Al, Sn and Au targets at electron bombardment energies at 1.0 and 2.5 MeV // J. Appl. Phys. – 1971. – V.42. – P.714–721.
14. Беспалов В. И. Характеристики тормозного излучения за плоскими мишенями, облучаемыми электронами. – Томск, 1980. – Деп. в ВИНИТИ, № 1782-80.
15. Беспалов В. И. Расчеты методом Монте-Карло характеристик полей электронов и квантов в однородных и неоднородных поглотителях / Ред. журн. "Изв. вузов. Физика". – Томск, 1980. – Деп. в ВИНИТИ, № 3707-80.
16. Кашковский В. В., Чахлов В. Л., Пушин В. С. Система формирования электронного пучка, выводимого из малогабаритного бетатрона: Тез. докл. 6-го Всес. совещ. по прим. уск. зар. част. в нар. хоз., 11–13 октября 1988 г., Ленинград. – М.: ЦНИИАтоминформ, 1988. – С.288–289.
17. Кашковский В. В., Чахлов В. Л., Филимонов А. А., Касьянов В. А. Выравнивание плотности потока электронов по сечению выведенного пучка бетатрона МИБ-10Э // Восьмое совещание по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине, 16–28 сентября 1995 г., Санкт-Петербург: Тез. докл. – М.: ЦНИИАтоминформ, 1995. – С.127.