

**ЦЕНТР КОЛЛЕКТИВНОГО ПОЛЬЗОВАНИЯ
РФЯЦ-ВНИИЭФ «РАДИАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСПЫТАНИЯ»
RFNC-VNIEF MULTI-ACCESS CENTER «RADIATION STUDIES AND TESTS»**

*Н. В. Завьялов, С. В. Воронцов, А. А. Девяткин, В. С. Гордеев, Е. Ю. Тарасова,
В. Н. Щеглов, А. В. Грунин, С. А. Лазарев, Е. Н. Донской, А. Н. Залыалов, В. В. Гаганов,
Ф. К. Киселёв, О. С. Кротова, К. М. Музюкин*
*N. V. Zavyalov, S. V. Vorontsov, A. A. Devyatkin, V. S. Gordeev, E. Yu. Tarasova, V. N. Shcheglov,
A. V. Grunin, S. A. Lazarev, E. N. Donskoy, A. N. Zalyalov, V. V. Gaganov,
F. K. Kiselev, O. S. Krotova, K. M. Muzyukin*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,
пр. Мира, 37, Саров, Нижегородская область, 607188, Россия
Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute
of Experimental Physics (RFNC-NIEF)

В работе рассмотрена испытательная база Центра коллективного пользования радиационных исследований и испытаний Российского федерального ядерного центра – Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ). Рассмотрена методология проведения испытаний по моделированию дозовых ионизационных и структурных повреждений электронной компонентной базы и приборов космической техники от протонного и электронного излучения космического пространства, а также вторичного излучения, вызванного взаимодействием частиц космического пространства с конструкцией космического аппарата и атмосферой Земли.

The paper contemplates a test base of the Multi-Access Center for Radiation Studies and Tests of Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics (RFNC-VNIEF). Considered is a methodology for conducting tests on modeling of dose ionization and structural damages of electron component base and space technology devices by proton, electron space radiation, as well as by secondary radiation, caused by interaction between space particles and space craft structure as well as the Earth atmosphere.

Введение

Для тестирования режимов функционирования радиоэлектронной аппаратуры космической техники и работоспособности микросхем в условиях действия частиц космического пространства широко используются установки РФЯЦ-ВНИИЭФ. Использование установок осуществляется в режиме Центра коллективного пользования «Радиационные исследования и испытания – ВНИИЭФ». Сокращённое название – ЦКП «РИИ-ВНИИЭФ». Центр функционирует в интересах предприятий Роскосмоса, министерства образования и науки и министерства промышленности и торговли.

Деятельность ЦКП «РИИ-ВНИИЭФ» осуществляется в соответствии с положением о ЦКП «РИИ-ВНИИЭФ», а также «Регламентом взаимо-

действия при предоставлении услуг ЦКП «РИИ-ВНИИЭФ» в соответствии с годовым координационным планом работы.

Развитие специализированных установок РФЯЦ-ВНИИЭФ для исследований физики радиационных взаимодействий частиц и излучений космического пространства продолжается и в настоящее время.

Организационная структура ЦКП «РИИ-ВНИИЭФ»

ЦКП «РИИ-ВНИИЭФ» функционирует на базе структурного подразделения РФЯЦ-ВНИИЭФ. ЦКП «РИИ-ВНИИЭФ» возглавляет руководитель, который несет персональную ответственность за результаты деятельности ЦКП «РИИ-ВНИИЭФ»,

целевое использование испытательного и измерительного оборудования.

Основные задачи ЦКП «РИИ-ВНИИЭФ»

В результате воздействия ионизирующих излучений естественных радиационных поясов земли (ЕРПЗ) (протонного, электронного и генерируемого ими тормозного излучения) в применяемых в космической отрасли интегральных схемах возникают дозовые эффекты, приводящие к деградации характеристик микросхем – радиационное повреждение материалов и изменение их функциональных параметров.

Задачи ЦКП:

- проведение радиационной испытаний микросхем, приборов и аппаратуры космической техники по дозовым эффектам;
- разработка, сопровождение и совершенствование методологии проведения испытаний (исследований), формирование предложений по совершенствованию методической и экспериментально-испытательной базы, в том числе методического, аппаратного и программного обеспечения, применяемого при обработке экспериментальной информации;
- метрологическое сопровождение испытаний, включая аттестацию измерительного и испытательного оборудования;
- повышение эффективности использования приборов и научного оборудования ЦКП «РИИ-ВНИИЭФ», участие в развитии новых методов исследований и интерпретации их результатов.

Методология ЦКП «РИИ-ВНИИЭФ»

Методология испытаний основана на:

- детализации характеристик полей ионизирующего излучения космического пространства;
- определении основных радиационных эффектов и контролируемых параметров электронной компонентной базы (ЭКБ) и аппаратуры;
- эквивалентном воспроизведении дозовых ионизационных и структурных повреждений в радиационно-чувствительных элементах;
- переносе результатов на заданные характеристики излучения космического пространства;
- формировании заключения о стойкости.

В целях обеспечения моделирования эквивалентных радиационных нагрузок в чувствитель-

ных областях ЭКБ, приборах и радиоэлектронной аппаратуре проводятся расчеты ионизационного действия проникающей радиации на данные элементы и корпуса сложных технических систем по методикам:

- «Триада» – методика и программа решения методом Монте-Карло линейных задач совместного переноса гамма-излучения и электронов в цилиндрической геометрии (от 0,1 кэВ до 1 ГэВ) [1]
- «С-007» – методика и программа решения методом Монте-Карло линейных задач совместного переноса нейтронов, гамма-излучения, электронов и позитронов в сложной трехмерной геометрии (от 1 кэВ до 100 МэВ) [2]

Схематично процесс проведения расчетов представлен на рис. 1.

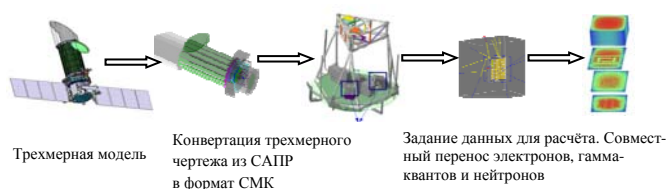


Рис. 1. Визуализация процесса расчета радиационных дозовых нагрузок

Экспериментально-испытательная база ЦКП «РИИ-ВНИИЭФ»

Для моделирования воздействия ионизирующего излучения электронов, протонов и тормозного излучения космического пространства (КП) по дозовым эффектам в состав испытательного оборудования ЦКП «РИИ-ВНИИЭФ» входят:

А. Линейный резонансный ускоритель электронов ЛУ-7-2 [3]

Ускоритель ЛУ-7-2 предназначен для генерации электронного и тормозного излучения в течение длительного времени в широком диапазоне мощности экспозиционной дозы тормозного излучения: от $0,1 \text{ Р} \cdot \text{с}^{-1}$ до $250 \text{ Р} \cdot \text{с}^{-1}$, на площади 800 см^2 с неоднородностью не хуже 30%. Энергия ускоряемых электронов – 6,5 МэВ.

Расстояние, на котором устанавливается контрольно-измерительная аппаратура (длина кабелей) – 25 м. Режим работы ускорителя круглосуточный с перерывами на обслуживание. Общий вид ускорителя показан на рис. 2.

Б. Линейный резонансный ускоритель электронов ЛУ-10-20 [4]

Ускоритель ЛУ-10-20 предназначен для моделирования эффектов дозового воздействия ионизирующего излучения космического пространства. Характеристики ускорителя ЛУ-10-20: энергия ускоренных электронов (регулируемая) – 5÷9 МэВ; длительность импульсов – 3,5 мкс; частота повторения импульсов – 10÷1000 Гц; мощность экспозиционной дозы тормозного излучения на расстоянии 1 м от мишени на площади $\varnothing 0,2 \text{ м}^2$ с неоднородностью не хуже 30% – до 500 Р/с. Система развёртки электронного пучка и транспортировочная линия позволяют проводить ускоренные испытания с площадью облучения до 1 м^2 .

Расстояние, на котором устанавливается контрольно-измерительная аппаратура (длина кабелей) – 30 м. Режим работы ускорителя круглосуточный с перерывами на обслуживание. Общий вид ускорителя показан на рис. 3.



Рис. 2. Общий вид ускорителя ЛУ-7-2



Рис. 3. Общий вид ускорителя ЛУ-10-20

В. Установка рентгеновская статическая (УРС)

УРС предназначена для изучения дозовых эффектов при радиационных исследованиях и испытаниях.

Дозовое поле формируется с помощью трех излучателей, независимо перемещаемых в пространстве. Силовая часть установки создана на базе серийных рентгеновских аппаратов РАП-300 и РУП-300. Энергия квантов рентгеновского излучения – 5÷120 кэВ; номинальный ток трубок 10...13 мА; угловая расходимость пучка каждого излучателя – 40°; максимальная мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения – 15 Р·с⁻¹.

Излучатели и генераторы напряжения размещены на двух стендах с габаритами 3×2,9×1 м³ и 2×1,6×1 м³. Время непрерывной работы 24 часа. Расстояние, на котором устанавливается контрольно-измерительная аппаратура – 20 м.

Общий вид установки приведен на рис. 4.

Г. Нейтронный генератор НГ-150М [5]

Установка предназначена для моделирования структурных повреждений в ЭКБ от протонов и атмосферных нейтронов. Режим работы статический с энергией нейтронов 14 МэВ. Плотность потока нейтронов $\phi = 1 \cdot 10^9 \text{ н} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Данная установка является эталоном II разряда для воспроизведения единиц плотности потока и флюенса нейтронов. Расстояние, на котором устанавливается контрольно-измерительная аппаратура – 5 м. Внешний вид установки показан на рис. 5.



Рис. 4. Общий вид установки УРС



Рис. 5. Общий вид генератора НГ-150М

Д. Ядерный реактор БР-1М [6]

БР-1М – реактор с металлической активной зоной. Материал активной зоны – сплав высокообогащенного урана с молибденом. Внешний вид установки показан на рисунке 6.

Средняя энергия спектра нейтронного излучения в центральном канале – 1,26 МэВ, на поверхности активной зоны (АЗ) – 1,29 МэВ. Доля нейтронов с энергией $E > 0,1 \text{ МэВ}$ в спектре утечки и в центральном канале – 95,5%. Средняя энергия спектра γ -излучения в центральном канале – 1,10 МэВ, на поверхности – 1,25 МэВ.

В настоящее время в ЦКП, кроме БР-1М [6] функционируют ещё 2 ядерных реактора: БР-К1 [6], ВИР-2М [6]. Данные установки различны по конструкции, составу топлива и своим основным параметрам. Установки оснащены различными экспериментальными устройствами, позволяющими изменять соотношение нейтронной и гамма-составляющих проникающих излучений для целей расширения экспериментальных возможностей.

Е. Ядерный реактор БР-К1 [6]

Реактор представляет собой многоцелевую ядерно-физическую установку, предназначенную как для калибровок детекторов в опорных полях нейтронов (МОП-К2), пространственно совмещенных с аттестованным источником γ -излучения,

так и для проведения облучений ЭКБ и приборов космической техники. Общий вид реактора представлен на рис. 7. Для помещения исследуемых объектов на позицию облучения используется контейнер горизонтальной загрузки (КГЗ), который закреплен на стенде реактора. Этот стенд обеспечивает загрузку контейнера в активную зону реактора и его удаление на расстояние ~6 метров от поверхности АЗ. Конфигурации КГЗ в двух практически значимых вариантах: пустой КГЗ (КГЗ-П) и с п-γ конвертором (КГЗ-НГК). Конвертер используется для трансформации нейтронного излучения реактора и представляет собой шестигранный «стакан». Параметры: полость для облучения $\varnothing 308 \times 360$ мм.



Рис. 6. Общий вид реактора БР-1М



Рис. 7. Общий вид реактора БР-К1

Ж. Водный реактор ВИР-2М [6]

Вид планировки здания с установкой ВИР-2М, а также её экспериментальные каналы в корпусе реактора показаны на рис. 8, 9.

Облучение возможно в центральном канале (ЦК) диаметром 142 мм и полусферическом канале (ПСК) радиусом 300 мм, а также в любой точке нижнего зала размером $10 \times 10 \times 2,5$ м в поле излучения ПСК. Средняя энергия нейтронов в экспериментальных каналах – 0,7 МэВ, γ -квантов-1,5 МэВ. Возможна длительная работа на статической мощности.

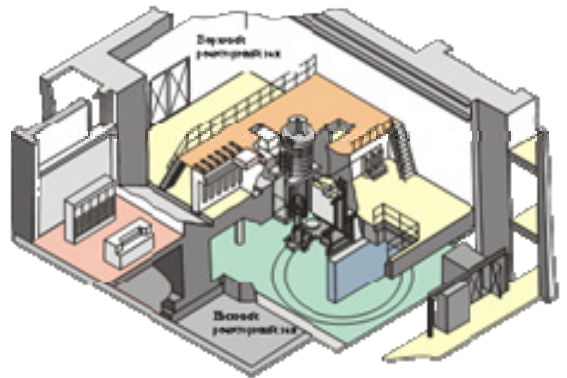


Рис. 8. Вид планировки здания с реактором ВИР-2М

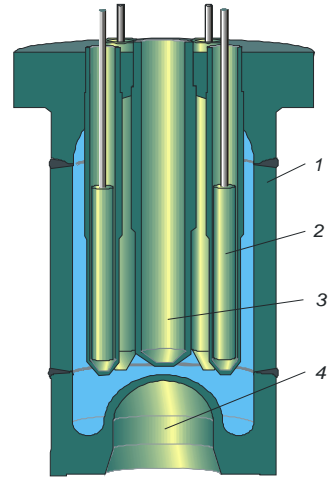


Рис. 9. Экспериментальные каналы реактора ВИР-2М: 1 – корпус активной зоны; 2 – стержень управления реактивностью; 3 – центральный экспериментальный канал, диаметр 142 мм; 4 – полусферический экспериментальный канал, диаметр 300 мм

Параметры полей излучения при работе установок БР-1М, БР-К1, ВИР-2М в статическом режиме представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Характеристики излучения при 3 часовом облучении в статическом режиме до флюенса нейтронов 10^{10} см^{-2}

Установка	Размер зоны облучения в мм	Доза, мощность дозы гамма излучения	
		Р	Р·с ⁻¹
БР-1М ЦК	$\varnothing 94 \times 180$	3,7	$3,4 \cdot 10^{-4}$
Поверхность АЗ	200×200	2,9	$2,7 \cdot 10^{-4}$
БР-К1 КГЗ-П	$\varnothing 310 \times 360$	$1,5 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$
ВИР-2М ПСК	$\varnothing 300 \times 300$	$1,0 \cdot 10^1$	$9,3 \cdot 10^{-4}$

Таблица 2

Характеристики излучения при 30 часовом облучении в статическом режиме до флюенса нейтронов $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$

Установка	Размер зоны облучения, мм	Доза, мощность дозы гамма излучения	
		Р	Р·с ⁻¹
БР-1М ЦК	Ø94×180	$1,9 \cdot 10^4$	$1,7 \cdot 10^{-1}$
Поверхность АЗ	200×200	$3,6 \cdot 10^3$	$3,3 \cdot 10^{-2}$
БР-К1 КГЗ-П	Ø310×360	$7,4 \cdot 10^2$	$7,0 \cdot 10^{-3}$
ВИР-2М ПСК	Ø300×300	$5,0 \cdot 10^4$	$4,6 \cdot 10^{-1}$

Дозиметры гамма излучения перед применением их в опытах калибруются в поле гамма-излучения источника Co^{60} . Передача размера единицы мощности экспозиционной дозы производится от установки «Эталон 3» из состава вторичного рабочего эталона экспозиционной дозы ВЭТ 8-12-91 в соответствии с поверочными схемами. Паспортное значение начальной активности источника, известное с погрешностью 10%, при доверительной вероятности 0,95, на 27.07.1989 г. составляет 432 Ки. [7] Общий вид установки Эталон-3 показан на рис. 10.



Рис. 10. Общий вид установки Эталон-3

Методическое оснащение ЦКП «РИИ-ВНИИЭФ»

Установки ЛУ-7-2, ЛУ-10-20, УРС, БР-1М, ВИР-2М, БР-К1 аттестованы в качестве испытательного оборудования для проведения испытаний стойкости к воздействию ионизирующих излучений космического пространства. Аттестация проведена в соответствии с требованиями ГОСТ Р 8.568-97 аттестационной комиссией.

В соответствии с действующими нормативными документами в области обеспечения единства измерений, ЦКП «РИИ-ВНИИЭФ» оснащен

методиками и средствами измерений характеристик полей ионизирующих излучений применяемых установок во всём диапазоне их возможных значений. Методическое обеспечение моделирующих установок и комплексов ЦКП «РИИ-ВНИИЭФ» включает в себя комплекты детекторов, измерительных кабельных линий, современной регистрирующей аппаратуры и программного обеспечения для проведения измерений характеристик излучений в широком диапазоне значений.

Для измерений радиационной реакции испытуемых объектов рабочие места хорошо оснащены измерительными средствами современного уровня. Предпочтение отдано программно-аппаратным комплексам на базе интеллектуальных крейтов. Использование такого оборудования позволяет оптимизировать процесс испытаний ЭКБ, включая автоматизацию управления экспериментом, проводить эксперименты одновременно с большим количеством исследуемых образцов и изучать большое количество функциональных блоков в каждом образце.

Примеры испытаний

В качестве примера приведены результаты испытаний нескольких микросхем:

- 1) Испытания интегральных микросхем по дозовым эффектам, рис. 11–13.



Рис. 11. Испытания микросборки с функцией реле

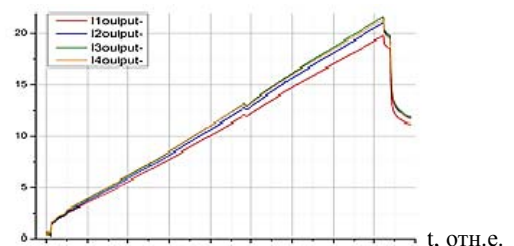


Рис. 12. Рост тока потребления ИМС

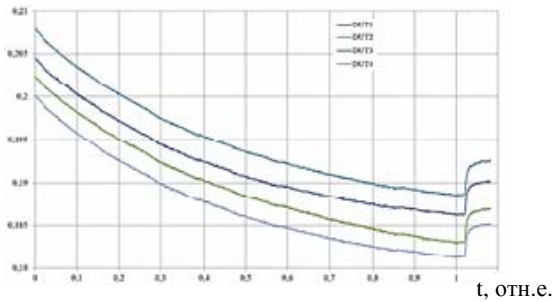


Рис. 13. Снижение тока потребления ИМС

2) Моделирование атмосферных нейтронов с использованием нейтронного генератора, рис. 14, 15.

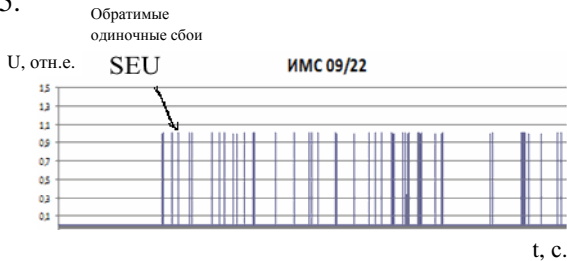


Рис. 14. Испытания ОЗУ

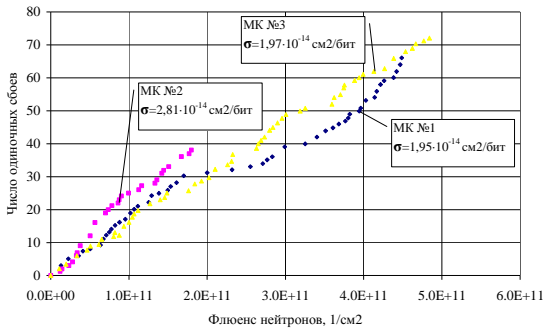


Рис. 15. Накопление ошибок в памяти ОЗУ в процессе облучения в зависимости от флюенса нейтронов

Заключение

ЦКП «РИИ-ВНИИЭФ» обладает квалифицированным персоналом, типовыми методиками проведения испытаний стойкости к воздействию ионизирующих излучений космического пространства (ИИ КП), аттестованными установками.

ЦКП «РИИ-ВНИИЭФ» обеспечивает моделирование воздействия протонного, электронного и генерируемого ими тормозного излучений по структурным и ионизационным эффектам от воздействия ИИ КП.

Проведение испытаний и исследований в ЦКП РИИ-ВНИИЭФ осуществляется на основании заключенного договора (заключается от имени РФЯЦ-ВНИИЭФ).

ЦКП «РИИ-ВНИИЭФ» обеспечивает объек-

тивность, достоверность, точность и воспроизводимость результатов испытаний. ЦКП соответствует требованиям ГОСТ Р ИСО/МЭК 17025-2009.

Для проведения радиационных исследований и испытаний в ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» имеются лицензия Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека № 77.99.15.002.Л.000056.03.10 от 05.03.12 на осуществление деятельности в области использования источников ионизирующего излучения.

Список литературы

1. Грунин А. В., Шмаров А. Е. Программирование монте-карловских задач с визуализацией процесса расчета. VII Межотраслевая конференция по радиационной стойкости. Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2006. – С. 53–59.

2. Житник А. К., Донской Е. Н., Огнев С. П., Горбунов А. В. и др. Методика С-007 решения методом Монте-Карло связанных линейных уравнений переноса нейтронов, гамма-квантов, электронов и позитронов. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2011. Вып. 1. С.17–24.

3. Шориков И. В., Завьялов Н. В., Хохлов Ю. А. и др. Малогабаритный линейный ускоритель электронов для гаммаграфии крупногабаритных объектов. // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Научно-исследовательское издание. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, выпуск 3, 2002. – С.142.

4. Завьялов Н. В., Тельнов А. В., Хохлов Ю. А. и др. Промышленный линейный ускоритель электронов ЛУ-10-20 // Материалы XV Всесоюзного семинара по линейным ускорителям заряженных частиц. – ВАНТ. Сер. Ядерно-физические исследования. – Вып. 2,3 (29, 30), 1997.

5. Abramovich S.N., Nefedov Y.Y., Semenov V.I., et al. Benchmark Experiments on Measurement of Neutron and Gamma-Ray Leakage Spectra and Yields from Three Vanadium Spheres // Fusion Engineering and Design, 2001, vol.58-59, P.601-606.

6. 65 лет ВНИИЭФ. Физика и техника высоких плотностей энергии: Научное издание. – В 2-х выпусках. Выпуск 1. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2011. – С.140.

7. А. В. Грунин, Е. Н. Донской, А. Н. Залялов и др. Экспериментальное и расчетное определение дозовых характеристик эталонного источника гамма излучения // Атомная энергия, т.107, вып. 5, 2009, с.285–288.