

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ БАЗА УСТАНОВОК РФЯЦ-ВНИИТФ ДЛЯ РАДИАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПЫТАНИЙ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

Афанасьев В.Н., Братчиков В.Б., Гафаров А.М., Кураков Н.П., Кононенко В.Ю., Кормилицын А.И., Лаврентьев Б.Н., Леваков Б.Г., Магда Э.П., Моисеенко Э.В., Мокичев Г.В., Плохой В.В., Снопков А.А.

Приведены параметры режимов работы источников излучений: импульсные ядерные реакторы, генератор нейтронов энергии 14МэВ, импульсные источники тормозного и электронного излучений, изотопные источники гамма-излучения. Экспериментальная база обеспечивает проведение испытаний ИЭТ в соответствии с требованиями Госстандарта. Дано краткое описание методов дозиметрии сопровождения радиационных испытаний, пути развития экспериментальной базы

ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальная база установок, моделирующих воздействие ПФЯВ, создана во ВНИИТФ более двадцати лет назад. Результаты работ неоднократно докладывались на конференциях и семинарах, посвященных вопросам радиационного воздействия на электронную аппаратуру.

Представляемый доклад имеет своей задачей ознакомление участников конференции с современным состоянием экспериментальной базы установок и направлениями дальнейшего развития базы с целью совершенствования методов и повышения достоверности радиационных испытаний.

В настоящее время экспериментальная база ВНИИТФ оснащена следующими установками:

- импульсные реакторы: БАРС-5, ИГРИК, ЯГУАР, ЭБР-Л;
- импульсные ускорители: ИГУР-3, ЭМИР-2, ИПУЭ, РАПИД-М;
- изотопные источники излучения: ГАММАТОК-100, ИС-1;
- генератор нейтронов НГ-12И.

Во ВНИИТФ имеется оборудование для климатических и механических испытаний. Все установки находятся в рабочем состоянии; обеспечены квалифицированным персоналом, оснащены методиками локальной дозиметрии, многоканальными системами регистрации с выводом информации на ЭВМ.

Таким образом, экспериментальная база ВНИИТФ позволяет проводить исследования и испытания ИЭТ в широком диапазоне требований Госстандарта.

1. ИМПУЛЬСНЫЕ РЕАКТОРЫ**1.1. Основные характеристики импульсных реакторов**

Основные характеристики импульсных реакторов ВНИИТФ приведены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристика реактора	Реакторы			
	ИГРИК	ЭБР-Л	БАРС-5	ЯГУАР
Средняя энергия нейтронов, МэВ	0,8	0,65	1,3	0,92
Длительность импульса делений, мкс	2300	60	40	800
Размеры внутреннего в АЗ канала для облучений (диаметр-длина), см	∅31·50	∅12,5·30	∅6·18	∅12, сквозной
Флюенс нейтронов в канале, нейтр./см ²	1,2·10 ¹⁵	3·10 ¹⁴	10 ¹⁵	1,2·10 ¹⁵
Доза гамма-излучения в канале, Р	1,4·10 ⁶	-	2·10 ⁵	8,5·10 ⁵
Флюенс нейтронов у АЗ, нейтр./см ²	2·10 ¹⁴	3·10 ¹³	5·10 ¹⁴	2·10 ¹⁴
Доза гамма-излучения у АЗ, Р	10 ⁵	-	2·10 ⁴	7,5·10 ⁴

Реакторы БАРС-5, ЭБР-Л имеют активные зоны (АЗ) из металлического урана, реакторы ИГРИК и ЯГУАР АЗ в виде раствора уранилсульфата в воде [1-5,14].

Отличительной особенностью реакторов является:

- БАРС-5 состоит из двух АЗ, расстояние между которыми изменяется от 10 до 130 см.
- ИГРИК имеет экспериментальный канал объемом 35 л;
- конвертирующие вставки с различным набором материалов (графит, полиэтилен, бор-10 и т.д.), с помощью которых можно изменять спектральный состав нейтронов и соотношение состава излучения (n/γ отношение) до 1000 раз;
- варьирование длительности импульса нейтронов от ~ 2 мс до ~ 100 с.

Все реакторы имеют несколько режимов работы, в том числе статический, могут обеспечивать парные импульсы с интервалом между импульсами ~ 1 сек, имеют открытые АЗ, что позволяет

проводить одновременно испытания большого количества объектов, в том числе крупногабаритных.

Реактор БАРС-5 аттестован в Государственном комитете Российской Федерации по стандартизации и метрологии в качестве эталонного источника нейтронов II разряда в соответствии с ГОСТ 8.105–80.

На реакторе для измерений флюенсов и спектров нейтронов применяются стандартные методики с использованием активационных детекторов.

1.2. Дозиметрия реакторного излучения.

При радиационных испытаниях ИЭТ применяется методика РИД-Н, разработанная во ВНИИТФ. Методика утверждена в отрасли в качестве стандартной при испытаниях на нейтронную стойкость.

РИД-Н основана на линейной зависимости изменения величины, обратной коэффициенту усиления транзистора, от флюенса нейтронов и определяет эффективный (по дефектообразованию в кремнии) флюенс нейтронов (нэб/см²). Калибровка детекторов-транзисторов проводится в поле реактора БАРС-5, аттестованном как образцовый источник нейтронов ОИ-Р-16 [15]. Диапазон измерений ($5 \times 10^{12} \dots 10^{15}$) нэб/см².

Экспозиционная доза гамма-квантов на реакторах измеряется по изменению оптической плотности силикатных стекол, используемых в качестве детекторов в стандартизованной методике СГД-8 [16].

2. ИМПУЛЬСНЫЕ УСКОРИТЕЛИ ЭЛЕКТРОНОВ

Ускорители ИГУР-3 [6] и ЭМИР-2 [7] относятся к ускорителям прямого действия с индуктивным накопителем энергии и с коммутацией электрически взрывааемыми проводниками.

ЭМИР-2 представляет собой комплекс двух автономных импульсных ускорителей электронов и генератора ЭМИ и обеспечивает радиационное воздействие в виде либо последовательности двух импульсов излучения с регулируемым временным интервалом, либо импульса излучения «сложной» формы, содержащего «короткую» (≈ 50 нс) и «длинную» (≈ 1 мкс) составляющие, либо одновременного воздействия ЭМИ и импульса излучения одного из ускорителей. Минимальное расстояние между мишенями ускорителей при встречном облучении составляет ≈ 100 мм.

На ускорителях предусмотрена возможность выведения в атмосферу электронного пучка.

Ускоритель ИПУЭ [20] – это ускоритель прямого действия с индуктивным накопителем энергии, полупроводниковым прерывателем тока и металлодиэлектрическим катодом, работающий в частотном режиме (до 100Гц) [20]. Ускоритель отличается высокой степенью повторяемости параметров излучения как при работе с выведенным электронным пучком, так и в режиме генерации тормозного излучения (ТИ). Степень воспроизводимости дозовых параметров ТИ, достигнутая на этом ускорителе (4...6%), позволяет рассматривать его как прецизионный облучатель, соответствующий образцовым средствам измерений 1-го разряда Государственных поверочных средств по ГОСТ 8.034–82 (для средств измерений потока энергии рентгеновского излучения).

Ускоритель РАПИД-М [21] является ускорителем прямого действия, и формирование высоковольтного импульса происходит с помощью плазменного прерывателя тока. Габаритные размеры установки составляют $3 \times 1,5 \times 2$ м³. РАПИД-М используется для генерации импульсов СЖР излучения и для отработки конструкции новых узлов сильноточных ускорителей.

Характеристики ускорителей ИГУР-3, ЭМИР-М, ИПУЭ и РАПИД–М приведены в таблицах 2; 3; 4 и 5, соответственно.

Рабочие характеристики ускорителя ИГУР-3

Таблица 2

Ре- жим	Запасаемая энергия ГИН, кДж	Длительность импульса тормозного излучения, нс	Напряж. на ускорит. трубке <i>U</i> , МВ	Ток через ускорит. трубку, <i>I</i> , кА	Мощность дозы на аноде, Р/с	Мощность дозы на <i>R</i> = 1 м, Р/с	Доза на аноде, Р
1	300	25	5,8	55	$4 \cdot 10^{11}$ ($S=300$ см ²)	10^{10}	10^4
2	300	25	6	60	$7 \cdot 10^{12}$ ($S=1,5$ см ²)	$2 \cdot 10^9$	$1,8 \cdot 10^5$
3	300	80	5,8	80	$2,5 \cdot 10^{12}$ ($S=6$ см ²)	$3 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^5$
4	300	80	5,8	70	$4 \cdot 10^{11}$ ($S=300$ см ²)	$7 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^4$
5	300	до 4 мкс	1	30	10^{10}	10^7	-
Электронные пучки							
6	300	30-400 нс	до 6,0	до 30	-	-	-

Примечание. Максимальная плотность энергии по сечению пучка – 300 Дж/см²; полная энергия пучка – 10 кДж; средняя энергия электронов – 2,5 МэВ.

Проектные характеристики установки ЭМИР-2

Таблица 3

<i>Режим генерации последовательности 2-х импульсов тормозного излучения</i>	
1. Регулируемый временной интервал между импульсами, мс	0...10
2. Минимальное расстояние между мишенями УТ (встречное облучение), мм	100
3. Напряжение на каждой ускорительной трубке (в разных режимах), МВ	1,5 ... 6
4. Ток ускорительной трубки (в разных режимах), кА	10...100
5. Длительность импульсов излучения каждой УТ (в разных режимах), нс	2000...20
6. Мощность дозы ТИ вблизи мишени каждой УТ (в разных режимах), Р/с	$10^{10} \dots 2 \cdot 10^{12}$
7. Мощность дозы ТИ на расстоянии 1 метр от мишени каждой УТ, Р/с	$10^6 \dots 10^{10}$
<i>Режим «сложного» импульса</i>	
8. Длительность «короткой» / «длинной» составляющих импульса излучения, нс	20 / 2000
9. Отношение «короткой» / «длинной» составляющих импульса излучения	≈ 10
10. Максимальная мощность дозы ТИ «короткой» составляющей, Р/с	$2 \cdot 10^{12}$
<i>Режим ЭМИ</i>	
11. Напряженность электрической составляющей ЭМИ, кВ/м	≤ 300
12. Напряженность магнитной составляющей ЭМИ, А/м	≤ 800
13. Длительность фронта / длительность импульса ЭМИ (нс)	40 / 2500

Характеристики ускорителя ИПУЭ

Таблица 4

Режим	Напряжение на УТ, кВ	Ток УТ, кА	Длительность импульса ТИ, нс	Доза ТИ на аноде, Р	Мощность дозы ТИ на аноде, Р/с	Площадь облучения, см ²	Частота следования импульсов, Гц
1	600	3,1	30	15	$5 \cdot 10^8$	260	Одиночный имп.
2	580	3,2	30	12	$4 \cdot 10^8$	260	100
3	600	2,7	35	370	$\approx 10^{10}$	10	Одиночный имп.
4	580	2,6	35	300	$8.6 \cdot 10^9$	10	25
5	400	2,5	38	800	$2 \cdot 10^{10}$	1	0.1

Характеристики ускорителя РАПИД-М

Таблица 5

Запасаемая энергия ГИН, [кДж]	Длительность импульса излучения, [нс]	Амплитуда напряжения на диоде, [кВ]	Ток диода, [кА]	Мощность экспозиционной дозы на R=5 см, [Р/с]	Плотность СЖР излучения на R=5 см на площади 10 см ² [кал/см ²]
25	40	500	150	$3 \cdot 10^{10}$	0,03

2.1. Дозиметрия тормозного и электронного излучений.

На ускорителе ИГУР-3 поля тормозного излучения (режимы 1–4) аттестованы в соответствии с ГОСТ В20.57405.81 и В20.57308-91 [17].

Измерение величины экспозиционной дозы в диапазоне $10^{-1} \div 5 \cdot 10^5$ Р обеспечивается дозиметром АИСТ-5 на основе термомлюминесцентных детекторов ТЛД-500К и ПСТ (ИС-7).

Амплитудно-временная зависимость формы импульса тормозного излучения определяется:

- сцинтилляционными детекторами типа СД2-01 на основе сцинтиллятора В-15 и детекторами типа СДФ-14, регистраторами СРГ-5 и автоматизированной системой SRGTIME на базе СРГ-7 с записью информации в базу данных и контролем на дисплее ЭВМ.
- методикой РИД-Г, разработки ВНИИТФ. Методика основана на измерении тока ионизации в полупроводниковом диоде КД104А [18]. Калибровка детекторов по мощности дозы проводится с использованием ТЛД. Диапазон измерений $10^6 \div 10^{11}$ Р/с.

Как известно, электронные пучки широко используются для моделирования ионизирующего, теплового и механического воздействия рентгеновского излучения. Важной характеристикой при таких исследованиях является поглощенная энергия в образце, для определения которой необходимо знать спектральный состав излучения и флюенс энергии падающего на образец электронного пучка.

На ускорителях для измерения падающей энергии электронного пучка применяется калориметрическая методика. Как правило, в качестве калориметров используют стальные цилиндры полного поглощения ($\varnothing 6 \times 3$ мм), по приращению температуры которых рассчитывают падающую энергию.

Для определения спектрального состава излучения разработан и применяется спектрометр электронов [9]. Он состоит из набора пластин Al, собранных с зазором в пакет, который размещается в вакууме и устанавливается перпендикулярно к направлению падения излучения. Измеряется температура каждой пластины, затем рассчитывается поглощенная энергия в каждой пластине. По полученному профилю поглощенной энергии восстанавливается интегральный спектр электронов. Процедура восстановления изложена в [19].

3. НЕЙТРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР НГ-12И

Нейтронный генератор НГ12-И, разработки НИИЭФА г. Санкт-Петербург [11] является источником нейтронов с энергией 14 МэВ (реакция Д-Т), 2,5 МэВ (реакция Д-Д).

Характеристики нейтронного генератора НГ-12И.

- | | |
|--|--|
| 1. Энергия дейтронов | 200 кэВ |
| 2. Максимальный ток пучка атомных ионов на мишени | до 15 мА |
| 3. Режим работы установки | статический,
импульсный
f-100 кГц, $\tau_{1/2}$ -25 нс, I-3 мА |
| 4. Максимальный выход нейтронов при работе в статическом режиме
На расстоянии 5 см за 10 ч флюенс | $1 \cdot 10^{12}$ нейтр./с (в 4 π)
$\sim 1 \cdot 10^{14}$ нейтр./см ² |
| 5. Потребляемая электрическая мощность | не более 40 кВА. |

4. ИЗОТОПНЫЕ ИСТОЧНИКИ НА ОСНОВЕ Co^{60}

4.1. Гамма-установка «ГАММАТОК-100».

Облучаемый объект загружается в цилиндрическую полость, которая является составной частью центральной подвижной пробки. Механизмом перемещения пробки материал опускается в зону облучения. Максимальный размер облучаемых объектов 190 x 190 x 650 мм³.

4.2. Изотопная панорамная гамма-установка «ИС-1».

Облучаемые объекты устанавливаются на специальной платформе или размещаются в специальных контейнерах, которые для обеспечения однородности облучения вращаются вокруг своей оси. Установка позволяет проводить испытания ИЭТ в активном состоянии и регистрировать изменения параметров в процессе облучения. Основные характеристики источников приведены в табл.6.

Таблица 6.

Тип установки	Начальная активность, кКи	Неравномерность облучения, %	Объем для испытаний, дм ³	Мощность дозы, Р/ч
ГАММАТОК-100	56,4	± 20	60	$0,3 \cdot 10^6$ в центре
ИС-1	5,92	± 20	*	На расстоянии $0,5 \text{ м} - 3,6 \cdot 10^3$

* Зависит от геометрии облучения.

Контроль уровня излучения осуществляется аппаратурой доз. контроля, придаваемой к установке.

5. МЕТОДИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ.

В институте имеются методические разработки по обоснованию моделирования теплового, механического и ионизирующего воздействия СЖРИ на изделия электроники как воздействием электронного пучка, так и тормозного излучения ускорителей. Для определения параметров поля источников, спектрального состава излучений, величины поглощенной энергии излучения в образцах широко применяются расчетные методы, в частности программа «ПРИЗМА»[12], на основе метода Монте-Карло.

6. НАПРАВЛЕНИЕ РАЗВИТИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ БАЗЫ.

Для повышения достоверности оценки уровня радиационной стойкости аппаратуры и более полного обеспечения требований Госстандарта, по мнению ВНИИТФ, необходимо оснащение экспериментальной базы дополнительно следующими установками:

1. Установкой, моделирующей ионизационное воздействие СЖР излучения.
2. Установкой, моделирующей воздействие на ИЭТ гамма- и СЖР излучений «сложной» формы.
3. Установкой, моделирующей механическое воздействие СЖРИ на экраны и корпуса приборов.

По п.3. разрабатываются методические основы испытаний экранов и корпусов приборов автоматики на механическое воздействие СЖРИ. Установка состоит из генератора импульсного тока и нагрузки в виде тонкой медной фольги. При электрическом взрыве фольги образуется плоская ударная волна, которая воздействует на испытуемый объект. Амплитуда и длительность ударной волны могут варьироваться в широких пределах.

По всем этим направлениям в ВНИИТФ имеются ТЗ и технические предложения, проводятся работы по макетированию. Сроки разработки существенно определяются объемом финансирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальная база ВНИИТФ при расширении ее проектируемыми установками позволит обеспечить радиационные исследования и испытания ИЭТ по всем воздействующим факторам и во всем диапазоне требований, определяемых Госстандартом.

Кроме того, в зависимости от габаритов и требуемых уровней облучения возможно проведение испытаний и приборов автоматики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Snopkov A.A., Gorin N.V. et. al. Two-core fast pulse reactor "БАРС-5". – International Embedded Topical Meeting. Physics, Safety and Application of Pulse Reactors. Washington D.C. 13-17, November 1994, p. 300 - 315.
2. Крыжановский В.А., Магда Э.П. ЭБР-Л – экспериментальная установка для исследований лазеров с ядерной накачкой. – Труды конференции ЛЯН-92. Обнинск, 1993, с. 136 – 145.
3. Taskin V.B., Andreev V.V. et. al. Pulsed Homogeneous reactor IGRIK. – International Embedded Topical Meeting, Physics, Safety and Application of Pulse Reactors. Washington D.C. 13-17, November 1994, p. 55 - 66.
4. Levakov B.G., Kurakov N.P. et al. Pulse Reactor YAGUAR with Its Core of Highly Concentrated Solution of Uranium Salts in Light Water. - International Embedded Topical Meeting. Physics, Safety and Application of Pulse Reactors. Washington D.C. 13-17, November 1994, p. 67 - 71.
5. Снопков А.А., Черашев В.И., Литвин В.И. и др. Протяженный нейтронный источник на базе двухзонного импульсного реактора БАРС-5. – Труды конференции ЛЯН-92. Обнинск, 1992, с. 144 – 156.
6. Dijankov V.S., Kormilitsyn A.I., Kovalev V.P. IGUR-3 – the powerful gamma-ray generator. – Abstracts of 9th Int. Conf. on High Power Particle Beams; Beams 92, Washington, D.C. May 25 – 29, 1992, p. 439.
7. Лаврентьев Б.Н., Мунасыпов Р.Н., Перешитов В.В. «Реконструкция установки ЭМИР-М с целью создания двухимпульсного режима работы». VII Межотраслевая конференция по радиационной стойкости. «Стойкость-2004». Снежинск: Изд-во РФЯЦ – ВНИИТФ, 2006.
8. Свидетельство о метрологической аттестации радиационной установки РФЯЦ - ВНИИТФ на основе импульсного ускорителя электронов ИГУР-3. 32 НИЦ МО РФ, г.Мытищи, 1997.
9. Филимончева П.И., Плохой В.В., Самойлова Л.Ю. и др. "Метод спектрометрии мощных импульсных пучков электронов." ПТЭ, 1979, №6, с. 40 – 43.
10. Тараско М.З. Метод минимума направленного расхождения в задачах поиска распределений. Препринт № 1446, Обнинск; ФЭИ, 1983.
11. Нейтронный генератор НГ-12И. Техническое описание 1А.706.440.ТО.
12. Кандиев Я.З., Куропатенко Э.С., Плохой В.В. и др. Расчет методом Монте-Карло взаимодействия частиц с веществом в программе "Призма". Тезисы докл., 3 Всесоюзная Конференция "Защита от ионизирующего излучения ядерно-технических установок". Тбилиси, 1981, с. 24.
13. Ведерников А.И., Касьянов Н.Ю., Кононенко В.Ю., Кормилицын А.И., Покровский А.С.. "Формирование импульса излучения сложной формы на ускорителе ИГУР-3". Доклад на конференции "Стойкость-98".
14. Лукин А.В., Леваков Б.Г., Магда Э.П., Погребов И.С., Снопков А.А., Терехин В.А. «Импульсные ядерные реакторы РФЯЦ-ВНИИТФ». Издательство РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск, 2002г.
15. Свидетельство №46080.02690 на образцовый источник нейтронов ОИ-Р-16.

16. Временные методические указания по измерению потока нейтронов и дозы гамма-излучения на статических и импульсных реакторах при испытаниях радиоэлектронной аппаратуры на радиационную стойкость. //Госстандарт, 1969.
17. Свидетельство о метрологической аттестации радиационной установки РФЯЦ - ВНИИТФ на основе импульсного ускорителя электронов ИГУР-3. Аттестат №21/01 от 21.12.01г.
18. В.В. Воробьев, В.Н. Афанасьев, В.Ф. Хохряков. Полупроводниковый детектор γ -излучения высокой интенсивности. //ПТЭ, 1974, № 1, с. 85 - 87.
19. В.Д. Ларцев. Обобщенный алгоритм метода минимизации направленного расхождения. Препринт № 216, Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2005.
20. V.V. Bratchikov, V.M. Zverev, A.I. Kormilitsyn, V.V. Pereshitov, S.N/ Rukin, A.V. Ponomarev. Pulse-periodical Acelerator of Electrons (PPAE) with Induktive Store and Semiconductor Opening Switch. Proc. 15th International Conference on High-Power Particle BEAMS (BEAMS-2004). St. Petersburg, Russia. July 18-23, 2004. pp.119.
21. А. М. Гафаров, В. А. Филатов, В. М. Корепанов, et al. «Analysis of Characteristics of Plasma Opening Switch and Diode Load on RAPID-M Accelerator ». Beams 2004, St Petersburg, 2004, p.339-342.