

УДК 621.384.6.03+621.039.514

Измерения характеристик высокоинтенсивных полей излучений при проведении радиационных исследований на моделирующих установках и комплексах РФЯЦ-ВНИИЭФ

А. И. Герасимов, В. С. Гордеев, С. А. Горностай-Польский, А. В. Гришин, В. П. Грицына, А. В. Грунин, Е. Н. Донской, К. Н. Ковшов, А. С. Кошелев, Е. Н. Крылевский, С. А. Лазарев, Н. К. Миронов, Б. И. Модель, Г. А. Мысков, В. О. Филиппов

Для измерения характеристик импульсных полей тормозного и нейтронного излучения облучательных комплексов РФЯЦ-ВНИИЭФ созданы системы диагностики. Входящая в их состав измерительная техника, импульсные и интегральные детекторы позволяют проводить измерения дозиметрических характеристик и радиометрических параметров полей в большом диапазоне времени и амплитудных значений. Приводятся краткие описания детекторов и методов измерений. Примеры применения систем диагностики позволяют оценить современное состояние методического обеспечения измерений высокоинтенсивных полей излучений облучательных комплексов РФЯЦ-ВНИИЭФ.

С начала 1960-х годов во ВНИИЭФ началась разработка аperiodических импульсных ядерных реакторов (ИЯР) и мощных импульсных сильноточных линейных индукционных ускорителей (ЛИУ) пучков электронов. В настоящее время основная часть ускорителей и ИЯР ГИР-2 и БР-1 объединены в два не имеющих аналогов в мире облучательных комплекса (ОК) ЛИУ-10М-ГИР-2 и ПУЛЬСАР [1]. Входящие в состав этих комплексов моделирующие установки (МУ) позволяют проводить радиационные исследования в очень широком диапазоне дозовых, мощностных, временных и спектральных характеристик полей излучений как при автономной, так и при синхронизированной во времени работе МУ.

Для проведения измерений временных и амплитудных параметров высокоинтенсивных полей излучений, генерируемых МУ этих ОК, и дозиметрического сопровождения радиационных

исследований используются детекторы, методики и измерительная аппаратура, входящая в состав диагностических систем (ДС), наиболее развитой из которых в настоящее время является ДС ОК ПУЛЬСАР [2]. Основными задачами, решаемыми при проведении измерений характеристик высокоинтенсивных полей излучений с использованием ДС, являются:

- аттестация режимов работы МУ в процессе подготовки, модернизации и технического усовершенствования отдельных систем и узлов, а также для контроля стабильности параметров излучения;

- измерение амплитудно-временных характеристик полей излучений в импульсах МУ при проведении исследований с учетом изменения временных параметров импульсов в облучательном зале;

- определение неравномерности облучения по распределению интенсивности излучения, действующего на объект по отдельным точкам детектирования (эта задача становится особенно сложной при использовании двух и более установок);

- диагностика электронных пучков ускорительных МУ по спектрально-временным характеристикам генерируемого ими тормозного излучения.

Используемые в ДС методы и методики разделяются на два класса: интегральные и динамические. К первому относятся термолюминесцентный метод дозиметрии с использованием приборных комплексов ИКС-А и ДВГ [3], метод дозиметрии полей электронного и фотонного излучения с использованием цветных дозиметрических пленок (ЦДП) и метод получения активационных изображений высокоэнергичной компоненты тормозного излучения (ТИ). Ко второму относятся методика импульсной дозиметрии [4], фотонейтронные измерения по методу времени пролета, методика комплексных измерений импульсов сложной формы и интервалов времени (МКИ), метод поглощающих фильтров (МПФ).

ДС ОК ПУЛЬСАР создана на базе двух аппаратурных комплексов СКПФ-204 и СКПФ-209, разработанных и изготовленных в НИИИТ. В состав каждого из них входит регистрирующая и вспомогательная аппаратура, позволяющая проводить настройку, контроль и управление регистраторами в процессе подготовки и проведения экспериментов. Для сбора и хранения данных с цифровых регистраторов создана автоматизированная система сбора и отображения данных на базе персонального компьютера. В настоящее время ДС дооснащаются цифровыми регистраторами фирмы Tektronix (серии TDS3000 и TDS7000). Для хранения, сбора и последующей обработки полученной информации все ЭВМ подключены к локальной вычислительной сети комплекса ПУЛЬСАР. В целом ДС позволяет организовать до 200 интегральных и около 40 динамических измерительных каналов в диапазоне времен регистрации от 1 нс до 24 ч. Наилучшее временное разрешение канала (кабель + регистратор) достигается с кабелем РК75-44-17 и регистратором СРГ-7 и составляет 0,3 нс, что соответствует требованиям используемых методик выполнения измерений.

Методика импульсной дозиметрии [4] позволяет измерять форму импульса ТИ и определять интегральную дозу за импульс $D_{\text{и}}$, максимальную мощность дозы P_{max} и длительность импульса $t_{0,5}$ на половине амплитуды, а также другие вычисляемые параметры импульса в любой точке поля излучения. В состав методики входят алмазные (АДЗ, АД6, САД1), сцинтилляционные (СД2, СД2-01), кремниевые (СКД1, СКД1-01, СКД1-02) дозиметры и детекторы прямой зарядки (АДДР1, АДДР2). Дозиметры позволяют измерять мощность дозы в диапазоне от 10^4 до 10^{13} Р/с, обладают высоким временным разрешением (0,3–5 нс) и значительными линейными токами, а также имеют высокую радиационную стойкость.

Для проведения локальных измерений экспозиционной дозы ТИ ускорителей в облучательных экспериментах, для получения пространственных распределений экспозиционной дозы для аттестации полей и режимов работы ускорителей, а также для получения информации о распределении излучения внутри объектов при проведении исследований используется термолюминес-

центный метод дозиметрии с использованием приборных комплектов ИКС-А и ДВГ. Относительная простота, компактность детекторов и возможность последовательной обработки измерений позволяют, используя в одном эксперименте до 300 детекторов, получать достаточно подробную информацию о пространственном распределении ТИ (рис. 1). Использование для анализа результатов подобных измерений параметров пучка электронов, а также результатов моделирования методом Монте-Карло переноса излучения в мишенных узлах ускорителей и объемах экспериментальных залов позволяет строить корректные модели распределений полей, необходимые на этапе выбора методики проведения исследований. С помощью ТЛД проведена оценка пространственной неоднородности дозовых полей в облучательных залах установок. Так, например, на расстояниях свыше 10 м для ЛИУ-30 показана возможность облучения крупногабаритных объектов с линейными размерами по фронту до 8 м при неоднородности облучения менее 30 %.

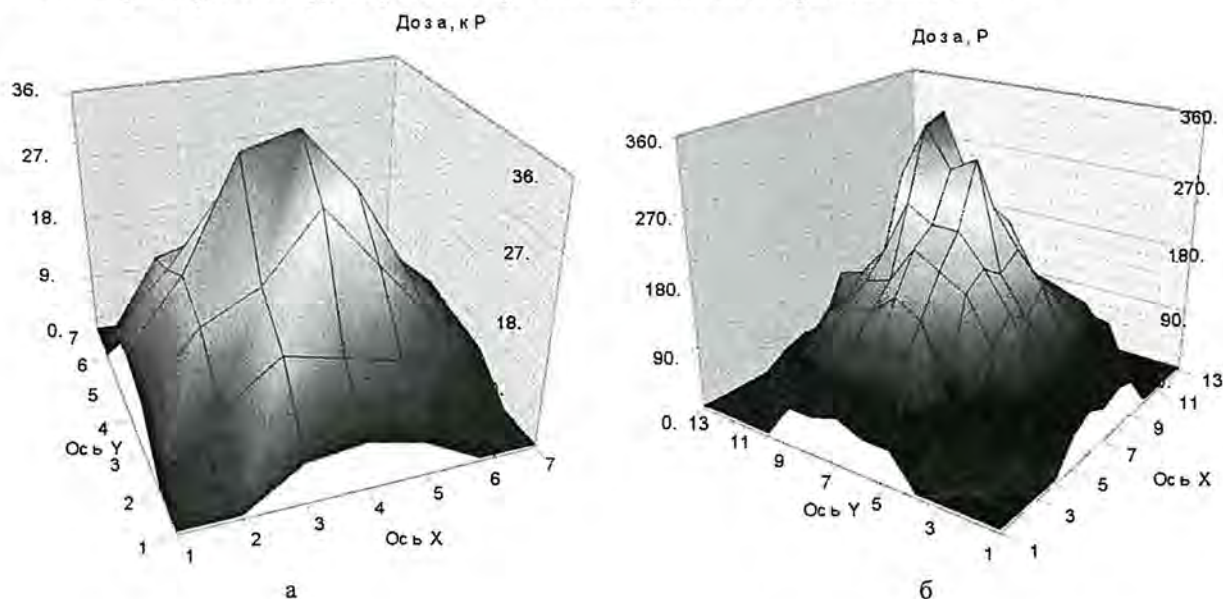


Рис. 1. Распределение дозы ТИ вблизи мишени (а – шаг 6 см по X, Y) и на расстоянии 3 м от мишени ускорителя ЛИУ-30 (б – шаг 30 см по X, Y) (пуск № 1475)

В целом методика измерений дозиметрических характеристик полей МУ при проведении радиационных исследований состоит в определении термолюминесцентными детекторами пространственного распределения экспозиционной дозы на внешней (фронтальной и тыльной) поверхности исследуемого объекта и измерении методикой импульсной дозиметрии временных характеристик генерируемого излучения (до 10 точек измерений вблизи объекта). По результатам измерений ТЛД и временных характеристик ТИ определяется мощность экспозиционной дозы ТИ. Такая методика проведения измерений обеспечивает возможность непрерывного взаимного контроля корректности результатов измерений и, в целом, получения требуемой точности.

Схема переноса единиц измерения дозиметрических величин следующая. Дозиметры перед применением их в опытах градуируются на рабочем эталоне экспозиционной дозы и мощности экспозиционной дозы ВЭТ8-12 (установка "ЭТАЛОН-3"). Для контроля временного разрешения детекторов методики ИГД используется ускоритель СПИН-2 [5] с характеристиками: энергия электронов до 1 МэВ, длительность импульса 0,15 нс, мощность дозы ТИ до 10^{11} Р/с. Для уменьшения зависимости дозовой чувствительности детекторов от энергии ТИ в диапазоне энергий, характерных для ЛИУ, дозиметры снабжены насадками из алюминия толщиной до 15 мм.

Для определения погрешностей измерения параметров сигналов с датчиков излучения используется одновременное измерение сигнала с одного детектора на двух идентичных регистраторах. После независимой обработки сигналов с каждого из регистраторов массивы параметров по серии измерений обрабатываются методом наименьших квадратов для расчета значений средних квадратических отклонений измеряемых параметров импульсных сигналов. Результаты измерений показывают, что определенные таким образом оценки случайных составляющих погрешностей измерений находятся на уровне 1–2 % (по отношению к максимальному значению соответствующей шкалы).

Определяющий вклад в погрешности измерения максимальной мощности дозы и дозы гамма-излучения в наших условиях вносят компоненты, связанные со спектральной характеристикой детекторов и неопределенностью спектра регистрируемого излучения. Для уточнения этих параметров методом Монте-Карло по программе ЭЛИЗА [6] проведен цикл расчетов спектральных характеристик дозиметров. В проведенных расчетах получены дозовые энергетические зависимости чувствительности (ЭЗЧ) в диапазоне энергий гамма-излучения от 0,01 до 100 МэВ (рис. 2).

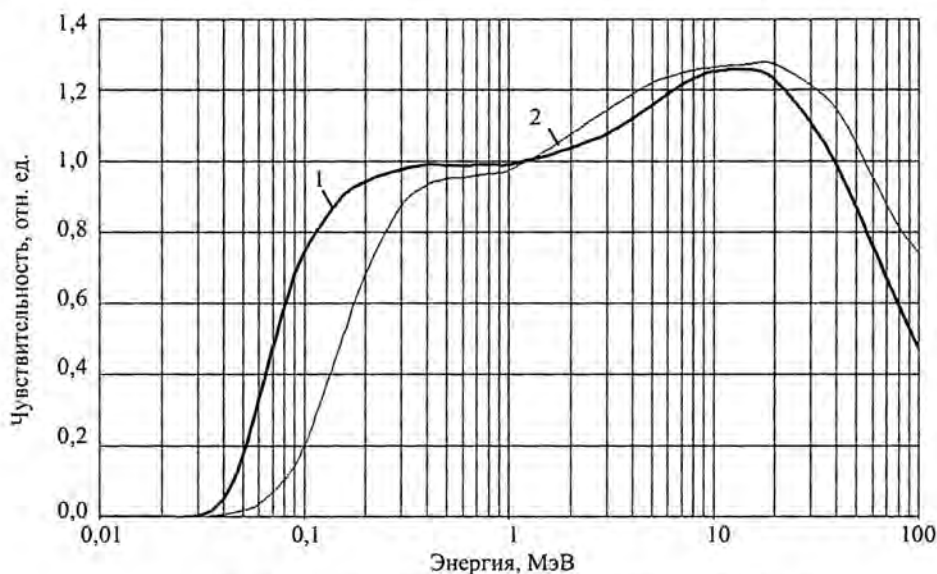


Рис. 2. Дозовые ЭЗЧ дозиметров СД2(1) и САД1(2)

В итоге погрешность измерения максимальной мощности дозы в точке детектирования не превышает $\pm 15\%$ для одного дозиметра, а погрешность единичного измерения длительности импульса ТИ на половине его амплитуды составляет около $\pm 7\%$. Погрешность измерения интегральной дозы единичным дозиметром составляет $\pm 18\%$ и уменьшается до $\pm 13\%$ для трех дозиметров в стандартных измерениях.

Для измерения интервалов времени между срабатываниями отдельных ускорительных установок при их включении в синхронизированном режиме используются либо каналы методики импульсной дозиметрии, либо специальные измерительные каналы с использованием регистраторов типа СУПИ-19 (СУПИ-24). В последнем случае в измерительном канале используются несколько детекторов с различной чувствительностью, но с одинаковым напряжением питания, располагающиеся каждый у соответствующей установки и подключенные к общей кабельной линии. Временная диаграмма подобного эксперимента с синхронизированным включением 4 ускорительных установок ОК ПУЛЬСАР приведена на рис. 3.

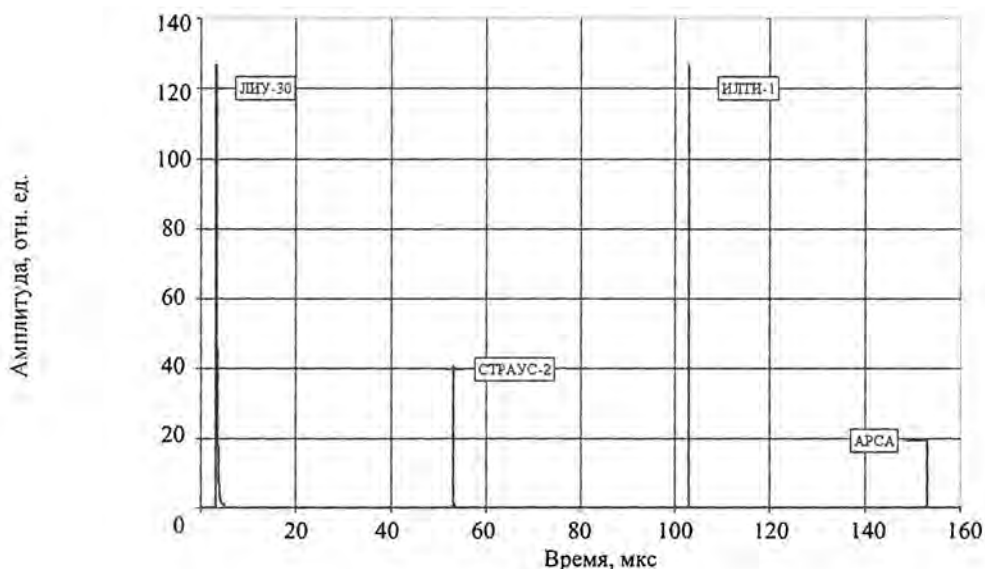


Рис. 3. Временная диаграмма срабатывания установок ОК ПУЛЬСАР

Для измерения временных параметров, дозы и мощности дозы ТИ и гамма-излучения в смешанных полях при совместной работе ускорительных установок и ИЯР совместно с методикой импульсной дозиметрии используются разработанные в НИИИТ детекторы с избирательной чувствительностью к нейтронам (СППД26 и СППД26-01), избирательной чувствительностью к гамма-излучению (СППД27) и сцинтилляционный детектор, включающий "медленный" сцинтиллятор CsI(Tl) и фотоэлемент Ф-22. Использование сцинтилляционного детектора позволяет, благодаря большой (1 мкс) постоянной времени высвечивания, уменьшить амплитуду сигнала от импульса ТИ в 30-50 раз и, дополнительно ослабив ее за счет геометрии и фильтра, получить соотношение амплитуд сигналов от ускорителя и ИЯР, приемлемое для регистрации. Использование этих детекторов обеспечивает измерения дозовых и временных характеристик импульсов излучения, сильно различающихся по форме, длительности и интенсивности, при совместной работе ЛИУ и ИЯР, когда, в зависимости от размещения в зале, отношение максимальных мощностей доз может составлять $10^3 - 10^4$ при резком различии временных параметров импульсов и спектра излучения. Временная диаграмма подобного эксперимента с синхронизированным МУ ОК ЛИУ-10М-ГИР-2 приведена на рис. 4.

Для диагностики сильноточных электронных пучков ЛИУ применяется метод дозиметрии полей электронного и фотонного излучения с использованием цветных дозиметрических пленок, ЦДП (рис. 5а), и метод получения активационных изображений высокоэнергичной компоненты ТИ (рис. 5б).

Для проведения измерений спектров ТИ ЛИУ применяются активационный метод с использованием (γ, n) -реакций [7] и метод поглощающих фильтров (МПФ). Для обеспечения возможности применения МПФ в диапазоне до 60 МэВ в каналах спектрометра используются фильтры из разных материалов. На рис. 6 приведена временная зависимость спектра ТИ ускорителя ЛИУ-30, полученная с использованием МПФ. На рис. 7 проведено сравнение форм спектров ТИ ускорителя ЛИУ-30, измеренных активационным методом и МПФ (среднего по серии из 40 экспериментов). На рис. 8 приведены спектры ТИ ускорителя ЛИУ-10М при работе с различным числом индукторов, полученные с использованием МПФ.

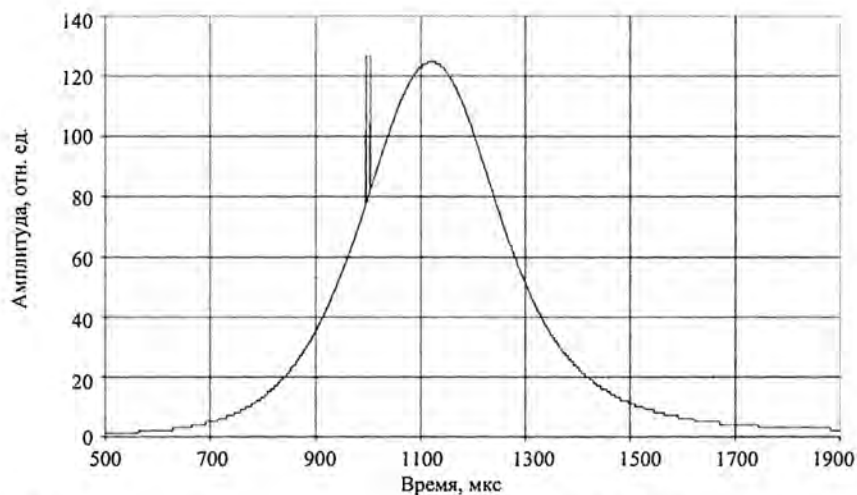


Рис. 4. Последовательность работы ускорителей СТРАУС-2, ЛИУ-10М и реактора ГИР-2



Рис. 5. Автографы трубчатого электронного пучка на выходах из инжектора (а) и на мишени ускорителя ЛИУ-30 (б) (Средний диаметр пучка $\sim 0,25$ м, амплитуда тока ~ 100 кА)

Анализ результатов современного радиационного эксперимента немислим без применения ЭВМ. Помимо очевидного использования современных высокопроизводительных ПЭВМ и сетей на их основе для сбора, обработки и анализа собственно экспериментальных данных широко применяются расчеты методом Монте-Карло для определения спектральных характеристик детекторов излучений. Проведение таких расчетов позволяет обеспечить требуемые характеристики точности методик выполнения измерений. Кроме того, современные возможности вычислительного комплекса РФЯЦ-ВНИИЭФ позволили перейти к расчетам методом Монте-Карло переноса излучений в полных объемах экспериментальных залов ОК для достаточно реалистичных моделей распределения вещества. Результаты подобных расчетов позволяют проводить прямое сравнение с экспериментальными данными и проверять существующие модели формирования полей излучений, особенно для ускорительных МУ, что имеет большое значение для планирования радиационных исследований и испытаний.

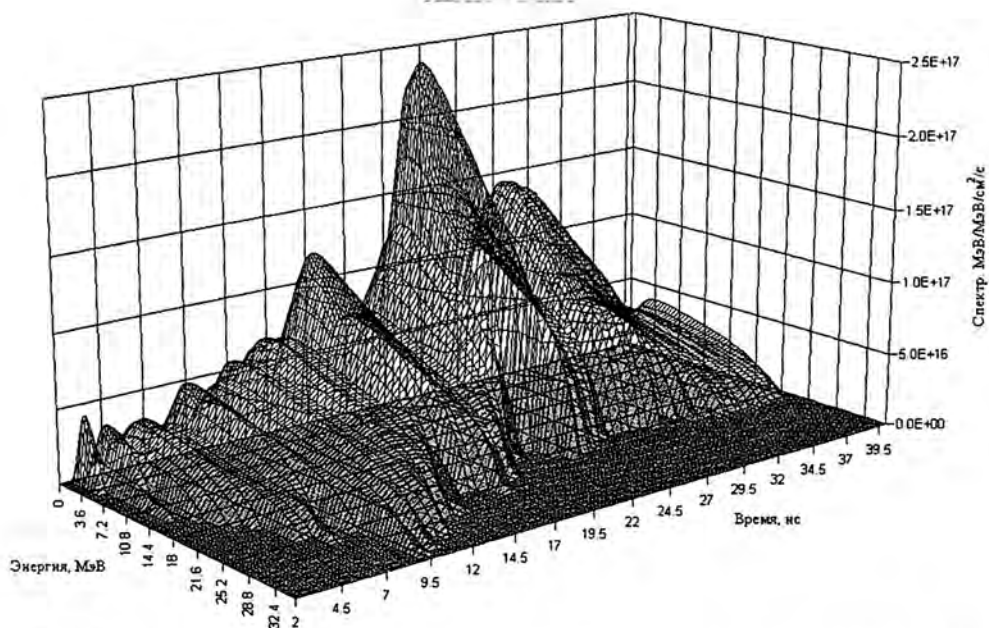


Рис. 6. Временная зависимость спектра тормозного излучения на расстоянии 8 м от мишени ускорителя ЛИУ-30

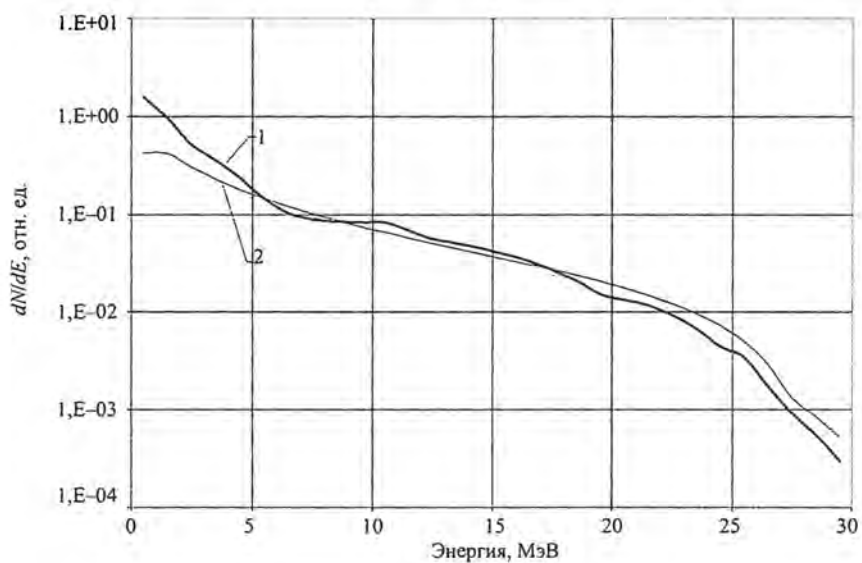


Рис. 7. Средние энергетические спектры ТИ ускорителя ЛИУ-30, измеренные активационным методом (1) и МПФ (2)

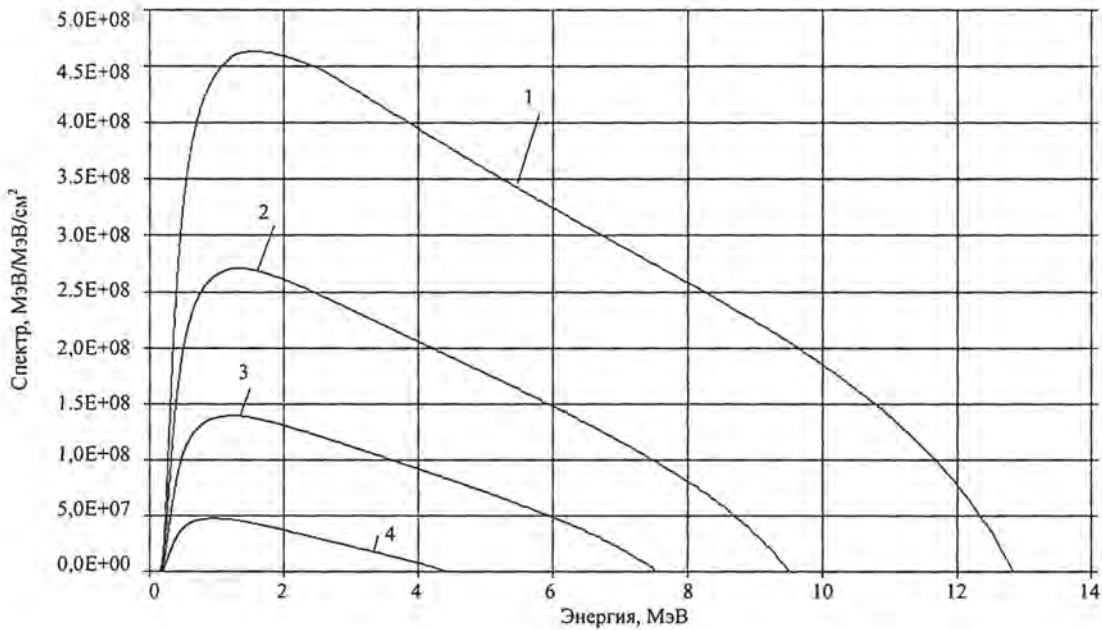


Рис. 8. Спектры ТИ ускорителя ЛИУ-10М при различном числе работающих индукторов: 16(1); 12(2); 8(3); 4(4)

Среди проблем методического обеспечения радиационных исследований можно выделить следующие:

1. Проведение измерений пространственно-временных характеристик в полях с максимальной мощностью дозы до 10^{15} Р/с при исследованиях радиационно-переходных процессов в малогабаритных объектах.
2. Измерение компонент поля от различных установок в различных областях исследуемых объектов при синхронизированном воздействии нескольких установок.
3. Повышение точности спектральных измерений высокоинтенсивного ТИ ускорителей типа ЛИУ с максимальной энергией до 40 МэВ.

За время эксплуатации ОК с использованием ДС выполнен большой объем временных, спектральных и спектрально-временных, пространственных и пространственно-временных измерений характеристик высокоинтенсивных полей излучений МУ и комплексов. Современный уровень проведения измерений характеризуется использованием в одном эксперименте сотен интегральных и десятков динамических детекторов излучений. Это обеспечивает получение необходимого объема информации о характеристиках высокоинтенсивных полей излучений при проведении радиационных исследований на МУ и ОК РФЯЦ-ВНИИЭФ.

Список литературы

1. Пунин В. Т., Савченко В. А., Завьялов Н. В., Гордеев В. С., Гришин А. В., Герасимов А. И., Смирнов И. Г., Воинов М. А., Кошелев А. С., Кувшинов М. И. Мощные линейные индукционные ускорители электронов и облучательные комплексы на их основе для радиационных исследований // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2001. Вып. 1. С. 356–362.
2. Брюков Б. В., Герасимов А. И., Гончаров А. С., Лазарев С. А. и др. Дозиметрическое сопровождение радиационных исследований на мощном линейном ускорителе ЛИУ-30 // Радиационная стойкость электронных систем, СТОЙКОСТЬ-2001. М.: СПЭЛС. 2001. Вып. 4. С. 241–243.
3. Бочвар И. А., Гимадова Т. И., Ксирим-Маркус И. Б. и др. Метод дозиметрии ИКС. М.: Атомиздат, 1977.
4. Терентьев Н. И., Розов В. И., Максимов В. И. Методы градуировки дозиметров импульсного гамма-излучения // ВАНТ. Сер. Физика радиационного воздействия на РЭА. 1999. Вып. 3–4. С. 139–141.
5. Желтов К. А., Коробков С. А., Петренко А. Н., Шалиманов В. Ф. Пикосекундный сильноточный ускоритель электронов // ПТЭ. 1990. № 1. С. 37–41.
6. Донской Е. Н. Методика и программа ЭЛИЗА решения методом Монте-Карло задач совместного переноса γ -излучения, электронов и позитронов // ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1993. Вып. 1. С. 3–6.
7. Одинцов Ю. М., Крыжановский А. А., Маслов Г. Н., Кошелев А. С. и др. Определение спектра тормозного излучения ускорителя ЛИУ-30 активационным методом // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 1999. Вып. 3–4. С. 35–42.

Measurement of Characteristics of High-Intensity Radiation Fields During Radiation Studies Performed at the Simulating Facilities and Complexes Available in RFNC-VNIIEF

A. I. Gerasimov, V. S. Gordeev, S. A. Gornostay-Polsky, A. V. Grishin,
V. P. Gritsyna, A. V. Grunin, E. N. Donskoy, K. N. Kovshov, A. S. Koshelev,
E. N. Krylevsky, S. A. Lazarev, N. K. Mironov, B. I. Model, G. A. Myskov,
V. O. Filippov

Diagnostic systems were developed in RFNC-VNIIEF to measure characteristics of pulsed fields of bremsstrahlung and neutron radiation for the radiation complexes available. The diagnostics systems are based on the measuring devices, pulsed and integral detectors which allow dose-rate characteristics and radiometric parameters of radiation fields to be measured within a wide range of time and amplitude values. Brief descriptions of the detectors and measuring methods involved are presented. The examples of diagnostics systems applications make it possible to assess the current state of methodological provision of measurements of high-intensity radiation fields of the RFNC-VNIIEF radiation complexes.