

Измерение временных спектров вторичного ионизирующего излучения импульсных ускорителей ионов и электронов с энергией 3–30 МэВ

Ю.Н. Гавриш, А.В. Сидоров, А.М. Фиалковский
*НИИ электрофизической аппаратуры им. Д.В.Ефремова
Научно-производственный комплекс ЛУЦ, Санкт-Петербург, Россия*

В настоящее время особо актуальной стала задача разработки измерительных комплексов на базе импульсных ускорителей для решения конкретных прикладных задач таких, как активационный анализ, основанный на использовании ядерных реакций, приводящих к образованию радионуклидов с малым периодом полураспада; определение делящихся и взрывчатых веществ и т.д. При экспериментальной отработке данных методик важное значение имеет временное распределение фона в помещении, где расположена установка. С этой целью были исследованы временные спектры вторичного нейтронного и фотонного излучений на протонном линейном ускорителе при разных энергиях ($E_p=3,3$; $6,3$ и 12 МэВ) и бетатроне в энергетическом диапазоне ускоренных электронов $10-27$ МэВ. Измерения проводились в зале, где расположен ускоритель и за биологической защитой методом синхронного детектора [1] с использованием сцинтилляционного спектрометра нейтронов, кассеты гелиевых счетчиков, сцинтилляционного (типа 6931-20) и полупроводникового (типа ДГДК-125В) спектрометров гамма-излучения.

Исследование временных спектров ВИИ линейного протонного ускорителя

На рис. 1 представлены временные спектры нейтронов, измеренные в зале при различной энергии ускоренных протонов. Запуск нейтронного детектора осуществлялся по заднему фронту токового импульса. Изучалась длительность запаздывающего излучения. Установлено, что с повышением E_p , а следовательно, и с увеличением выхода нейтронов из мишени (использовалась в качестве приемника протонов медная мишень полного поглощения) длительность импульса вторичного запаздывающего излучения растет. Аналогичная зависимость была получена и для гамма-излучения. Дальнейшие измерения были выполнены вне здания, где расположен ускоритель. Временной спектр гамма-фона, измеренный за биологической защитой на расстоянии приблизительно 5–6 м для случая, когда на резонаторы ускорителя подана ВЧ-мощность, а пучка нет, представляет собой белый шум (время измерения 30 мин).

На рис. 2 представлен спектр гамма-излучения, измеренный полупроводниковым детектором при $E_p=12$ МэВ, импульсном токе 1 мА, частоте 1 Гц (ширина одного канала 4 мкс). Время измерений 10 мин. Расстояние от детектора до биологической защиты то же. На спектре хорошо выделяются две компоненты излучения — мгновенная, в точности повторяющая длительность и форму токового импульса, и запаздывающая, имеющая максимальную интенсивность более низкую по сравнению с первой и монотонно спадающая по экспоненциальному закону.

На рис. 3 представлен временной спектр гамма-излучения, измеренный с помощью сцинтилляционного детектора на расстоянии порядка 25 м от ускорителя при частоте

2 Гц. Время измерений 30 мин. Энергия ускоренного протонного пучка была постоянна и составляла 12 МэВ, импульсный ток 0,5-0,7 мА. Даже в этом случае хорошо выделяется мгновенная составляющая, соответствующая импульсу тока и спадающая по экспоненте запаздывающая компонента.

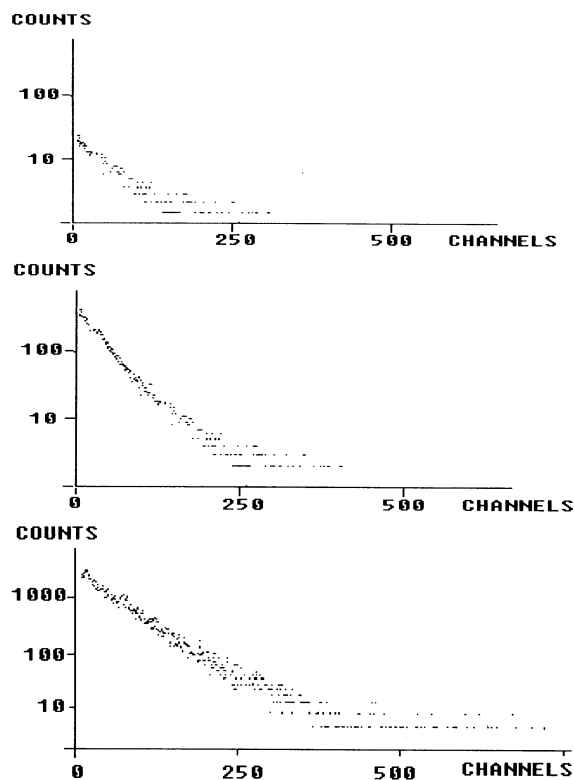


Рис. 1: Временные спектры вторичного нейтронного излучения, измеренные при различной энергии ускоренных протонов. (На первом рисунке энергия ускоренных протонов составляла 3,3 МэВ, на втором — 6,3 МэВ и на третьем — 12 МэВ.) Расстояние между детектором нейтронов и мишенью — порядка 7 м. Импульсный ток ускорителя 0,1 мА. Частота посылок 2 Гц. (Цена деления канала 8 мкс).

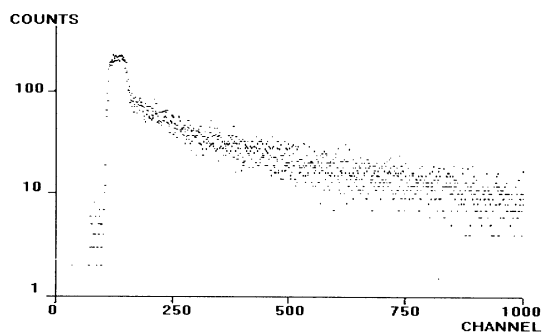


Рис. 2: Временной спектр гамма-излучения, измеренный полупроводниковым детектором при $E_p=10$ МэВ, импульсном токе 1 мА, частоте 1 Гц (ширина одного канала 4 мкс). Время измерений 10 мин.

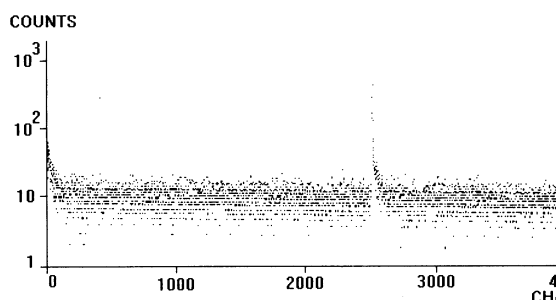


Рис. 3: Временной спектр гамма-излучения, измеренный с помощью сцинтилляционного детектора на расстоянии 25 м от ускорителя. (Цена деления канала 20 мкс.)

Измерение временных спектров гамма-излучения на бетатроне

Измерение временных спектров гамма-излучения проводились при различной энергии ускоренных электронов. Было установлено, что запаздывающая компонента гамма-излучения (по аналогии с линейным ускорителем протонов) появляется при энергии электронов выше порога рождения фотонейтронов, и интенсивность ее зависит от выхода нейтронов. С увеличением энергии электронов сечение фотоядерных реакций растет, и поэтому увеличивается выход запаздывающего излучения. Форма временного спектра имеет экспоненциальный вид и одинаковую постоянную спада и не зависит от энергии электронов. На рис. 4 представлены спектры гамма-излучения, измеренные в диапазоне энергий ускоренных электронов 13-27 МэВ с шагом 2 МэВ.

Цена одного канала 8 мкс. Измерения проводились с помощью полупроводникового детектора ДГДК-240В в зале, где расположен ускоритель.

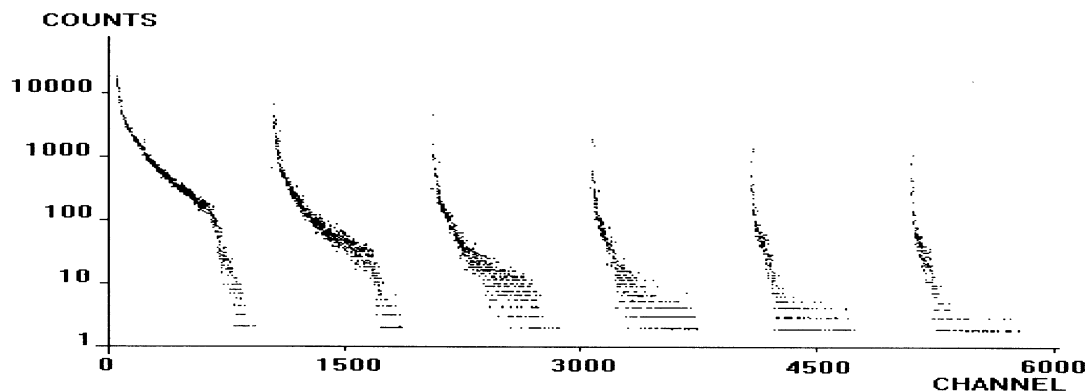


Рис. 4: Временные спектры гамма-излучения, измеренные в диапазоне энергий ускоренных электронов 13-27 МэВ.

При энергии ускоренных электронов 27 МэВ исследовалась зависимость формы временных спектров гамма-излучения от его энергии. На рис. 5 представлены спектры, измеренные с разным порогом энергетической дискриминации: от 0,05 до 6,0 МэВ с шагом 1,5 МэВ. Форма спектров имеет экспоненциальный вид, постоянная спада не зависит от энергии регистрируемого гамма-излучения.

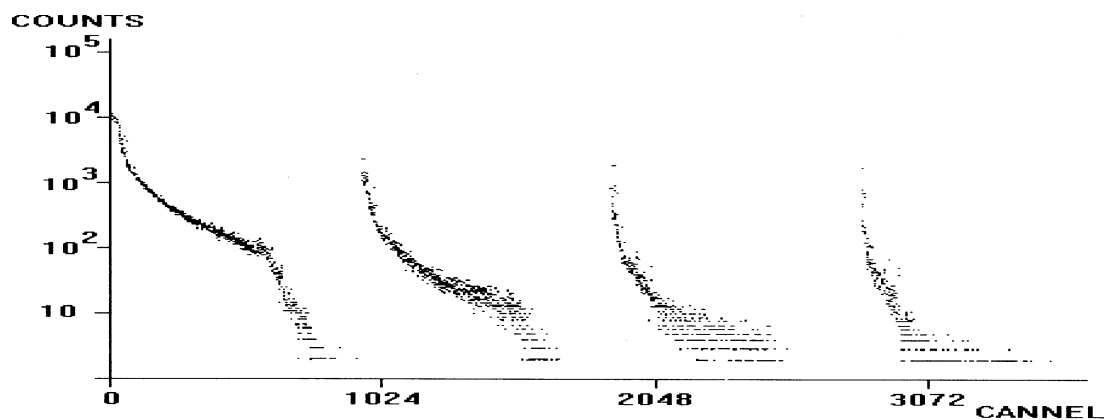


Рис. 5: Временные спектры гамма-излучения, измеренные с разным порогом энергетической дискриминации.

Дальнейшие исследования были проведены вне зала ускорителя. На спектре гамма-излучения, измеренном на расстоянии около 25 м в течение 10 мин отчетливо наблюдаются токовые посылки и хорошо видны “хвосты” запаздывающего излучения. Аналогичный спектр был получен и на расстоянии приблизительно 68-70 м от защиты. Токовые посылки, по-прежнему, отчетливо наблюдаются, что позволяет восстановить рабочую частоту ускорителя. Наличие хотя и слабо выраженных “хвостов” запаздывающего излучения указывает на то, что при работе ускорителя образуется нейтронное излучение.

Измерение временных спектров нейтронного излучения

Временные спектры нейтронного излучения исследовались при различных энергиях бетатрона как внутри зала, где расположен ускоритель, так и вне его.

Измеренное распределение потока нейтронов во времени имело такую же скорость спада, как и гамма-излучение. Экспериментально полученные временные зависимости могут быть описаны одной и той же формулой:

$$N(t) = N_o \cdot e^{-\frac{t}{\tau}},$$

где N_o — интенсивность ионизирующего излучения в начальный момент; t — постоянная спада. Эта же формула может быть получена также из простых модельных представлений.

Пусть в некоторый момент времени имеется поток нейтронов в зале $n(t)$, убывание потока $\frac{dn}{dt}$ определяется коэффициентом поглощения нейтронов в стенах зала b и временем пробега нейтронов от стенки до стенки, т.е. $t_n \approx \frac{R}{v}$, где R — наименьший характерный размер зала, оцениваемый нами в 2,5 м; v — средняя скорость тепловых нейтронов (приблизительно 2200 м/с), откуда t_n приблизительно 1 мс. Интегрируя, получаем

$$n(t) = n_o \cdot e^{-\frac{\beta vt}{R}} = n_o \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \text{ где } \tau = \frac{R}{\beta \cdot v}.$$

По справочным данным, альbedo тепловых нейтронов для бетона (материал стен, пола, потолка) равно 0,6–0,7, откуда коэффициент поглощения тепловых нейтронов при падении на бетонную стену составляет 0,3–0,4. Отсюда $\tau \approx 2,5 - 3$ мс, что находится в достаточно хорошем согласии с экспериментом.

Аналогично было найдено и t из экспериментально полученных временных спектров нейтронов на линейном протонном ускорителе. В этом случае t составило 4,5–5 мс, это объясняется несколько большими характерными размерами зала, где расположен ускоритель.

В измерениях временных спектров нейтронов, выполненных вне помещения, где расположен ускоритель, с использованием нейтронного детектора радиометра СРПС-2 были получены аналогичные результаты, т.е. наблюдались две компоненты — мгновенная и запаздывающая, обусловленная нейтронным фоном. Следует отметить, что, когда бетатрон, кроме обычной биологической защиты, был окружен защитой из борированного полиэтилена толщиной 16 см, интенсивность запаздывающего излучения как нейтронного, так и гамма-излучения, снизилась приблизительно в 100 раз.

Список литературы

- [1] Хоровиц К. Искусство схемотехники.— М.: Мир, 1986.