

УДК 621.039.76

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПОЗИЦИОННОЙ МОЩНОСТИ ДОЗЫ НАВЕДЕННОГО ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОТЯЖЕННОЙ СВИНЦОВОЙ МИШЕНИ, АКТИВИРОВАННОЙ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ПРОТОНАМИ

В.И. Юревич, И.О. Цветков*, Р.М. Яковлев*

Измерена экспозиционная мощность дозы наведенного гамма-излучения после облучения протяженной свинцовой мишени пучком протонов с энергией 1—4 ГэВ. Изучена зависимость мощности дозы от времени с момента окончания облучения, а также от энергии протонов пучка.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Study of Exposure Dose Power of Induced Gamma-Radiation for Extended Lead Target Activated by High-Energy Protons

V.I. Yurevich, I.O. Tsvetkov, R.M. Yakovlev

Exposure dose power of induced gamma-radiation has been measured for extended lead target irradiated by 1—4 GeV proton beam. A dependence of the dose power on the time after the end of irradiation and on the proton energy has been studied.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

1. Введение

В современных проектах электроядерных установок на базе ускорителей протонов в качестве нейтронопроизводящей мишени наиболее часто рассматривается протяженная мишень из РЬ или РЬ—Ві эвтектики. При этом оптимальные ядерно-физические характеристики такого нейтронного генератора достигаются при энергии протонов пучка в интервале 1—3 ГэВ. С другой стороны, свинец является одним из основных материалов при конструировании защиты на ускорителях, а также калориметров, использующихся в экспериментах при сверхвысоких энергиях для регистрации вторичных адронов. Обычно максимум энергетического спектра таких частиц также приходится на интервал энергий в несколько ГэВ.

Целью проведенных исследований является оценка экспозиционной мощности дозы (ЭМД) наведенного гамма-излучения как внутри свинцовой мишени, так и в околомишенном пространстве, а также изучение зависимости дозы от времени, прошедше-

*Радиевый институт им. В.Г.Хлопина, Санкт-Петербург

го после окончания облучения, и энергии падающих протонов в области 1—4 ГэВ. В настоящее время подобных экспериментальных данных крайне мало, однако они являются весьма ценными при проектировании установок и планировании экспериментов.

Измерения были проведены на канале выведенного пучка синхрофазотрона Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

2. Эксперимент

Мишенная станция располагалась в фокусе пучка, где его поперечный размер по основанию составлял 25 мм. Сама свинцовая мишень представляла собой цилиндр $\varnothing 20 \times 60$ см, состоящий из дисков толщиной 2,5 см, и являлась мишенью практически полного поглощения для пучка протонов за счет неупругого взаимодействия с ядрами свинца. Траектория пучка совпадала с осью цилиндра, а интенсивность пучка протонов составляла от 10^{10} до $n \cdot 10^{11}$ p /цикл с интервалом между циклами ускорения около 9 с. Флюенс протонов определялся с помощью откалиброванной ионизационной камеры. Погрешность мониторингирования пучка составляла $\pm 20\%$. Измерение ЭМД наведенного гамма-излучения проводилось с помощью двухканального радиометра УСИТ-2, обеспечивающего погрешность определения дозы не более $\pm 20\%$.

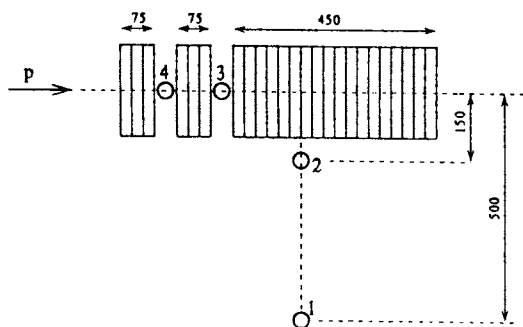


Рис.1. Геометрия эксперимента. Цифрами 1—4 указаны места расположения детектора гамма-излучения

Как показано на рис.1, измерения проводились для четырех различных положений детектора гамма-излучения: на расстоянии 50 см от центра мишени в перпендикулярном направлении от ее оси (1); в том же направлении, но на расстоянии 5 см от поверхности мишени (2); на оси мишени на расстоянии 7,5 см от ее переднего торца (внутри мишени) (3); тоже на оси, но на расстоянии 15 см от переднего торца мишени (4). Это позволило изучить дозиметрическую обстановку как в околомишенном пространстве (положение 1 и 2), так и оценить ЭМД, наведенной пучком протонов внутри мишени (положение 3 и 4). Заметим, что длина половинного поглощения протонов в свинце за счет ядерных взаимодействий составляет около 12 см и находится между выбранными значениями $Z = 7,5$ и 15 см. На эту же область приходится максимум выхода нейтронов с боковой поверхности свинцовой мишени [2].

Облучения проводились при нескольких энергиях протонов в интервале 1—4 ГэВ, а время облучения варьировалось от 10 минут до 3 часов. Всего было проведено пять сеансов облучения, значительно отстоящих друг от друга по времени. Временная зависимость ЭМД с момента окончания облучения прослеживалась в течение 4 часов.

3. Результаты

Наблюдения показали, что в исследуемом временном интервале можно выделить три различные компоненты, отличающиеся характерным временем спада наведенной гамма-активности. Первая мощная компонента относится к малым временам, $T < 1$ мин, где она определяет формирование ЭМД. Вторая компонента, с $T_{1/2} \approx 8$ мин, играет существенную роль в первые полчаса с момента окончания облучения. Третья компонента, с $T_{1/2} \approx 170$ мин, вносит определяющий вклад в ЭМД при больших временах выдержки облученной мишени. Ряд последовательных облучений при $E_p = 3,65$ ГэВ и интенсивности пучка $I_p = 3 \times 10^{11}$ р/мин показал, что временная зависимость ЭМД наведенной гамма-активности в диапазоне от 1 минуты до нескольких часов хорошо описывается двухкомпонентной зависимостью

$$P = P_1 + P_2 = I_p \{ a_1 [1 - \exp(-0,086t)] \exp(-0,086T) + \\ + a_2 [1 - \exp(-0,0041t)] \exp(-0,041T) \},$$

где размерность P — в мкР/с, I_p — в р/мин, t — время облучения в минутах, T — время проведения измерения с момента окончания облучения в мин. Соотношение коэффициентов a_1 и a_2 при $E_p = 3,65$ ГэВ составляет $a_1/a_2 \approx 1,1$ и оно сильно падает до значения 0,1 при переходе к $E_p = 1$ ГэВ. Таким образом, относительная интенсивность короткоживущей компоненты быстро возрастает с увеличением энергии протонов с 1 до 3,65 ГэВ. По-видимому, причиной этого является сильно изменяющееся при таком изменении энергии пучка распределение ядерных фрагментов, образующихся в неупругих столкновениях прямых протонов и вторичных адронов с ядрами свинца при распространении их внутри мишени. ЭМД возрастает приблизительно в 10 раз при переходе от положения 1 к положению 2 (см. рис.1). Отношение ЭМД, измеренных для различных положений детектора при энергии протонов 3,17 ГэВ и $T \approx 200$ мин, составило $P(4)/P(3)/P(2)/P(1) = 75/35/10/1$.

Временная зависимость изменения ЭМД в положении 1 (50 см от мишени) для пучка протонов с энергией 1 ГэВ и интенсивностью 3×10^{11} р/мин при различной продолжительности облучения исследуемой свинцовой мишени $t = 90$ и 180 мин показана на рис.2. Изменение

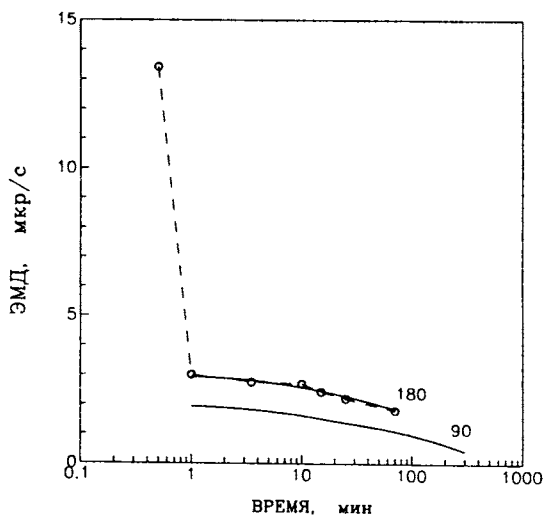


Рис.2. Временная зависимость ЭМД при $E_p = 1$ ГэВ и $I_p = 3 \times 10^{11}$ р/мин для двух времен облучения $t = 90$ и 180 мин. Символы — эксперимент (пунктирная кривая проведена через экспериментальные точки), сплошные кривые — расчет по формуле

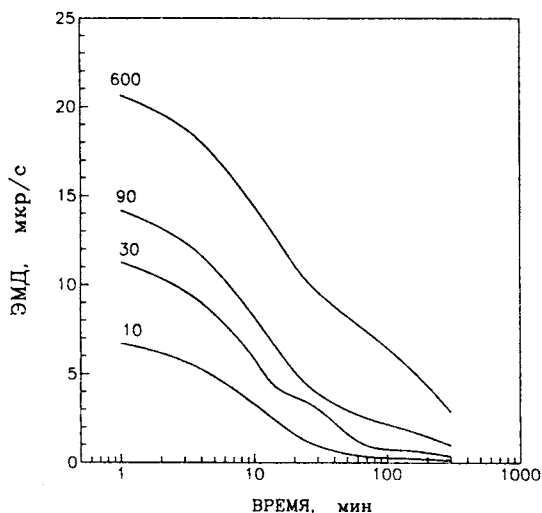


Рис.3. То же, что на рис.1, но для $E_p = 3,65$ ГэВ и четырех времен облучения $t = 10, 30, 90$ и 600 мин

времен с момента окончания облучения, $T = 5, 60$ и 120 мин соответственно. Для 10-часового облучения те же значения дозы будут равны $5,2$ и $1,7$ бэр соответственно, оставаясь на высоком уровне длительное время. Таким образом, при 20-кратном увеличении длительности облучения величина дозы возрастает всего приблизительно в 2 раза, но с увеличением времени выдержки облученной мишени разница в значениях дозы быстро нарастает, достигая 7 раз при $T = 120$ мин. Приведенные результаты показывают важность учета зависимости величины дозы от энергии протонов пучка, длительности облучения, времени выдержки облученной мишени, а также от места расположения в околومیшенном пространстве и могут использоваться для получения оценок доз наведенного гамма-излучения при планировании экспериментов с целью предотвращения необоснованного облучения персонала.

Литература

1. Немировский Б.В. и др. — Радиометры, М.: Атомиздат, 1972, в.2, с.40.
2. Nikolaev V.A. et al. — Proc. ICANS-XI, Tsukuba, Japan, 1990, p.612.

ЭМД, но уже для $3,65$ ГэВ протонов при той же интенсивности пучка и четырех различных времен облучения $t = 10, 30, 90$ и 600 мин, представлено на рис.3. Кривые на рисунке есть результат расчета по приведенной выше формуле с параметрами, определенными по результатам измерений.

Основным выводом, следующим из анализа приведенных на рис.3 данных по эволюции дозы на расстоянии 50 см от мишени (положение 1), является заключение о сравнительно быстром уменьшении дозы со временем после непродолжительного облучения (минуты) при значительно более медленном спаде величины дозы для длительного облучения (часы). Так, набранная за 5 мин доза для 30-минутного облучения протонами составляет $2,5, 0,5$ и $0,25$ бэр для трех значений