

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

P16-85-435

А.А.Астапов, В.П.Бамблевский

НАВЕДЕННАЯ АКТИВНОСТЬ
ТОЛСТОЙ МЕДНОЙ МИШЕНИ
ПРИ БОМБАРДИРОВКЕ ЕЕ ПРОТОНАМИ
С ЭНЕРГИЕЙ 3,65 ГэВ

Направлено на IV Всесоюзную научную
конференцию по защите ядерно-технических
установок от ионизирующих излучений
/Томск, 1985/

1985

ВВЕДЕНИЕ

Как известно ^[1], наведенная активность играет важную роль в общей проблеме радиационной безопасности. Отсюда вытекает необходимость в исследовании механизмов и закономерностей образования наведенной активности в процессе работы ускорителя в деталях оборудования, защитных сооружениях, воздухе и т.д.

Многолетними дозиметрическими измерениями ^[2] в ОИЯИ установлено, что основной вклад в дозу внешнего облучения обслуживающего персонала ускорителя высоких энергий вносит наведенная активность γ -излучения. Учитывая современную тенденцию увеличения потока и энергии ускоряемых частиц, например ^[3,4,5], актуальность получения необходимых данных по наведенной активности возрастает.

В данной работе представлены расчетные и экспериментальные пространственно-временные распределения мощности поглощенной дозы P от радионуклидов, наработанных в цилиндрической медной мишени размерами $100 \times 130 \text{ мм}^2$, на которую падали протоны с энергией 3,65 ГэВ.

1. РАСЧЕТ

Для получения пространственно-временного распределения P необходимо было определить: 1) пространственно-энергетическое распределение плотности потока адронов, неупруго взаимодействовавших в мишени; 2) энергетические распределения сечений образования радионуклидов в адрон-ядерном взаимодействии; 3) пространственно-энергетическое временное распределение поля γ -излучения от источников в облученной мишени.

Геометрия расчета представлена на рис.1, в. Число неупругих взаимодействий $N_{\alpha}^{in}(I, J, K)$ на один упавший протон в (I, J) -й области мишени для K -го номера энергетической группы адрона отдельно определялось для адронов высоких энергий ($\alpha = p, \pi^{\pm}$) и нейтронов низких энергий ($\alpha = n$) в энергетических интервалах 10 МэВ + 3,65 ГэВ и 0,215 эВ + 10 МэВ соответственно. Моделирование развития нуклон-мезонного каскада осуществлялось методом Монте-Карло с помощью программы SHIELD ^[6]. При этом учитывалось пространственное распределение пучка первичных протонов.

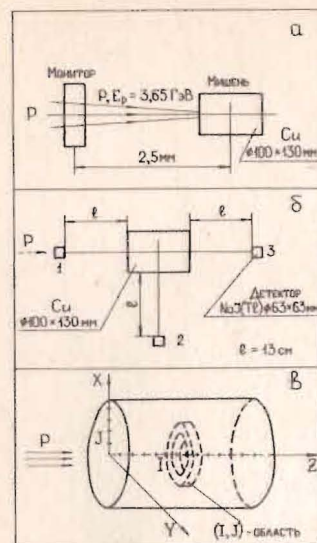
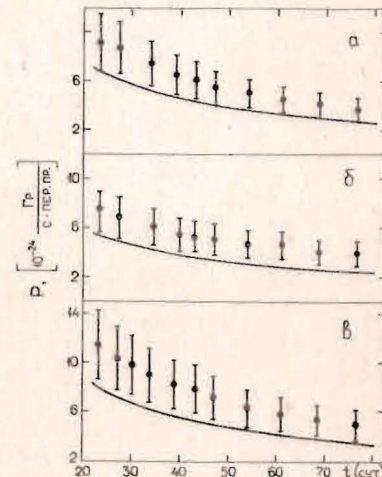


Рис.1. а - геометрия облучения мишени; б - геометрия измерения мощности дозы P облученной мишени: 1 - со стороны входа пучка первичных протонов, 2 - сбоку, 3 - со стороны выхода пучка первичных протонов; в - схема расчета.

Рис.2. Зависимости расчетных (—) и экспериментальных (⊥) значений P от времени t с конца облучения для различных геометрий измерений (рис.1, б): а - в точке 1, б - в точке 2, в - в точке 3.



Скорость образования j -го радионуклида в (I, J) -й области, обусловленная частицами α -го типа, для единичного потока первичного пучка выражается формулой:

$$N_j^{\alpha}(I, J) = \sum_K N_{\alpha}^{in}(I, J, K) \frac{\sigma_{\alpha, j}(K)}{\sigma_{\alpha}^{in}(K)}, \quad (1)$$

где $\sigma_{\alpha, j}(K)$ и $\sigma_{\alpha}^{in}(K)$ - среднее сечение образования j -го радионуклида и полное сечение неупругого взаимодействия для частицы α -го типа K -й энергетической группы и ядер естественной меди.

Источник γ -излучения, обусловленный наработанными радионуклидами, будет:

$$S_j^{\alpha}(I, J, K_r, t) = \sum_j N_j^{\alpha}(I, J) (1 - e^{-\lambda_j T}) e^{-\lambda_j t} f(K_r), \quad (2)$$

где K_r - энергетическая группа γ -излучения; λ_j - постоянная распада j -го радионуклида; T - время, в течение которого происходило облучение мишени первичным пучком; t - время, прошедшее от момента окон-

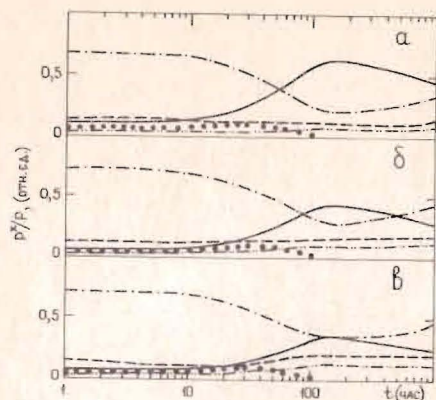


Рис. 3. Временные зависимости относительных вкладов в мощность поглощенной дозы от различных типов адронов:

— — первичных протонов,
 --- — вторичных протонов с $E_p > 10$ МэВ, - · - · - нейтронов с $E_n > 10$ МэВ, · · · · · — нейтронов с $0,215 \text{ эВ} < E_n < 10$ МэВ, - - - - π^\pm -мезонов с $E_{\pi^\pm} > 10$ МэВ; а — в точке 1, б — в точке 2, в — в точке 3 (рис. 1, б).

чения облучения; f_j — квантовый выход радионуклида j -го типа [7]. Расчет сечений образования радиоактивных изотопов в адрон-ядерном взаимодействии для частиц высоких энергий производился по эмпирическим аппроксимациям [8] с помощью программы SPALL [9]. Хотя указанные выше аппроксимации были получены в основном для протонов, мы использовали их также для нейтронов и π^\pm -мезонов, так как погрешности расчетов сравнимы с различиями в сечениях расщепления для различных типов адронов [9]. Для нейтронов низких энергий использовались данные, которые получены из библиотеки DLC-41C (VITAMIN-C) [10] и [11].

Пространственно-временные распределения мощности дозы $P^*(\vec{r}, t)$ от источников γ -излучения (2), где \vec{r} — радиус-вектор точки пространства, определялись с помощью инженерных методов [12], а результирующая величина мощности поглощенной дозы будет

$$P(\vec{r}, t) = \sum_{\vec{r}} P^*(\vec{r}, t). \quad (3)$$

2. ЭКСПЕРИМЕНТ

Облучение медной мишени $\phi 100 \times 130 \text{ мм}^2$ проводилось в течение двух часов пучком протонов энергией 3,65 ГэВ потоком $7 \cdot 10^{10}$ р/цикл (рис. 1, а). Условия облучения, мониторинг были такими же, как и в [13, 14]. Контроль за облучением проводился с помощью ионизационной камеры [15], а общее число протонов G , упавших на мишень, определялось с помощью реакций активации $^{27}\text{Al}(\rho, x)^{18}\text{F}$ и $^{27}\text{Al}(\rho, x)^{24}\text{Na}$. Значения G , опре-

деленные активационным детектором и камерой, согласуются между собой в пределах ошибок измерения. В данной работе принято

$$G = (5,0 \pm 0,4) \cdot 10^{13} [\text{р}].$$

Аппаратурные спектры γ -излучения облученной мишени измерялись датчиком ЕДЭГ-23 с детектором $\text{NaI}(\text{Tl})$ размером $\phi 63 \times 63 \text{ мм}^2$ и амплитудным многоканальным анализатором NTA-1024. Линейность, энергетические зависимости эффективности регистрации γ -квантов в пике полного поглощения, точности, положение эффективного центра определялись несколькими наборами ОСИМ.

По методике, изложенной в [16], определялись энергетические распределения плотности потока γ -квантов $\Phi(E_\gamma)$, а затем мощность дозы γ -излучения

$$P = \int K_d(E_\gamma) \Phi(E_\gamma) dE_\gamma, \quad (4)$$

где $K_d(E_\gamma)$ — коэффициент перехода от плотности потока к мощности дозы γ -излучения [17]. Проверка правильности получения значений P проводилась с помощью точечных источников с известными активностями из наборов ОСИМ в различных сочетаниях. Причем, источники располагались на различных расстояниях от поверхности упаковки кристалла $\text{NaI}(\text{Tl})$ в интервале от 40 мм до 300 мм. На основании полученных результатов значения P определялись с погрешностью не хуже 15%.

Геометрия измерений P от облученной мишени показана на рис. 1, б; измерения проводились на расстоянии $\ell = 130$ мм от поверхности мишени.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Полученные расчетные и экспериментальные пространственно-временные распределения мощности поглощенной дозы представлены на рис. 2, различия между которыми не превышают 30%. Расчет дает несколько заниженные результаты, что, по-видимому, объясняется учетом для упрощения расчетов активации от вторичных γ -квантов, электронов, мюонов.

Анализ расчетных относительных вкладов в $P(\vec{r}, t)$ от наведенной активности в нашем случае для первичного пучка и вторичных адронов различных типов показывает (рис. 3), что для $t \leq 50$ ч и $t \geq 100$ ч величину $P(\vec{r}, t)$ в основном обуславливают нейтроны с $E_n > 10$ МэВ. Для остальных t рассматриваемого временного интервала определяющей $P(\vec{r}, t)$ будет величина от первичных протонов $P^*(\vec{r}, t)$ с максимумом при $t \approx 200$ ч.

Из данных расчетов следует также, что активация вторичными адронами в основном обусловлена адронами энергией $E_a \leq 300$ МэВ; аналогичный вывод сделан и в [18], но для первичных протонов энергией $E_p = 660$ МэВ.

Хотя данный расчет имеет некоторые допущения, полученное хорошее согласие экспериментальных и расчетных результатов говорит о правильности подхода к решению задачи. Расчет для мишеней больших размеров и более сложных конфигураций возможен после усовершенствования используемого расчетного аппарата.

Авторы выражают благодарность М.М.Комочкову за постановку задачи, поддержку и полезные обсуждения, а также А.В.Корытову, А.Н.Резунику за помощь в проведении эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зайцев Л.Н. и др. Основы защиты ускорителей. Атомиздат, М., 1971.
2. Алейников В.Е. и др. ОИИ, Р16-80-601, Дубна, 1980.
3. Баддин А.М. и др. Ускорительный комплекс тяжелых ионов ОИИ. Дубна, 1978.
4. Александров В.С. и др. ОИИ, Р9-83-613, Дубна, 1983.
5. Мурин Б.П. Проект линейного ускорителя мезонной фабрики. В кн.: Труды третьего Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. "Наука", М., 1973, т. I, с. 234.
6. Соболевский Н.М. ОИИ, Б1-2-5458, Дубна, 1970.
7. Гусев Н.Г., Дмитриев П.П. Квантовое излучение радиоактивных нуклидов. Справочник, Атомиздат, М., 1977.
8. Silberberg R., Tsao C. *Astrophys. J., Sup. Ser.*, 1973, 220, 25, 315.
9. Routti J.T., Sandberg J.V. *Comp. Phys. Com.*, 1981, 23, 411.
10. Roussin R.W. et al. ORNL/RSIC-41, 1978.
11. Бычков В.М. и др. Сечения пороговых реакций, вызываемых нейтронами. Справочник. Энергоиздат, М., 1982.
12. Манжкович В.П. Защита от ионизирующих излучений. Справочник, Энергоатомиздат, М., 1982.
13. Алейников В.Е. и др. В кн.: Труды VIII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИИ, Дубна, 1983, т. 2, с. 189.
14. Бамблевский В.П. ОИИ, 16-85-35, Дубна, 1985.
15. Алейников В.Е., Тимошенко Г.Н. ОИИ, 16-83-359, Дубна, 1983.
16. Экспериментальные исследования полей гамма-излучения и нейтронов. Под ред. Ю.А.Егорова. Атомиздат, М., 1974.
17. Нормы радиационной безопасности (НРБ-76). Атомиздат, М., 1978.
18. Ильинов А.С., Матушко В.Л. В кн.: Программа экспериментальных исследований на мезонной фабрике ИИИ АН СССР. Труды второго Всесоюзного семинара. Изд. ИИИ АН СССР, М., 1982, с. 222.

Рукопись поступила в издательский отдел
10 июня 1985 года.

Астапов А.А., Бамблевский В.П. Р16-85-435
Наведенная активность толстой медной мишени
при бомбардировке ее протонами с энергией 3,65 ГэВ

Представлены расчетные и экспериментальные результаты по пространственно-временному распределению мощности дозы от наведенной активности медной мишени размерами $\phi 100 \times 130$ мм² при облучении ее пучком протонов с энергией 3,65 ГэВ. Моделирование процесса наработки радиоактивных элементов в мишени проводилось методом Монте-Карло. Получены данные по относительному вкладу в мощность дозы от наведенной активности для первичного пучка и вторичных частиц - нейтронов с энергией $E_n < 10$ МэВ и различных типов адронов с $E_a > 10$ МэВ. Экспериментальные величины определены с помощью сцинтилляционного детектора с кристаллом NaJ(Tl) размером $\phi 63 \times 63$ мм². Различие между расчетными и экспериментальными значениями мощностей доз γ -излучения не превышает 30%.

Работа выполнена в Отделе радиационной безопасности и радиационных исследований ОИИИ.
Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1985

Перевод О.С.Виноградовой