



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4498/2-79

P 16 - 12551

Е.К.Гельфанд, М.М.Комочков, Б.В.Манько

Б.С.Сычев

5/11-79

G-326

РАСЧЕТ РЕАКЦИИ ДОЗИМЕТРА ИФК_н
НА ПОЛЕ ИЗЛУЧЕНИЙ
ЗА ЗАЩИТОЙ УСКОРИТЕЛЕЙ ПРОТОНОВ

Дубна 1979

P16 - 12551

Е.К.Гельфанд, М.М.Комочков, Б.В.Манько

Б.С.Сычев

РАСЧЕТ РЕАКЦИИ ДОЗИМЕТРА ИФК_n
НА ПОЛЕ ИЗЛУЧЕНИЙ
ЗА ЗАЩИТОЙ УСКОРИТЕЛЕЙ ПРОТОНОВ

Направлено в АЭ

Гельфанд Е.К. и др.

P16 - 12551

Расчет реакции дозиметра ИФКн на поле излучений за защитой ускорителей протонов

Выполнены расчеты числа треков, образуемых в ядерной эмульсии пленочного дозиметра нейтронов под действием излучений за защитой ускорителей протонов. Получены количественные данные, характеризующие вклад протонов поля излучений в суммарное число треков. Показано наличие достаточно устойчивого соотношения между плотностью треков в эмульсии дозиметра ИФКн и суммарной эквивалентной дозой излучений за защитой, лишенной проемов и неоднородностей.

Работа выполнена в Отделе радиационной безопасности и радиационных исследований ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1979

Gelfand E.K. et al.

P16 - 12551

The Calculation of the IFK Dosimeter Response in the Radiation Field behind the Proton Accelerator Shielding

The number of tracks generated in nuclear emulsion of the film neutron dosimeter irradiated behind the proton accelerator shielding have been calculated. Numerical data on the radiation field proton contribution into the total track number have been obtained. The existence of a rather constant relation between the track density in the IFK dosimeter emulsion and total radiation dose equivalent behind the bulk homogeneous shielding have been shown.

The investigation has been performed at the Department of Radiation Safety and Radiation Investigations, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

Экспериментальные исследования, выполненные в Дубне и Серпухове^{1-3/}, показали, что интерпретация числа треков в фотозумьсии пленочного дозиметра быстрых нейтронов /ИФКн/^{4/} в терминах эквивалентной дозы быстрых нейтронов приводит в ряде случаев к существенному завышению этой величины. Причиной такого завышения является наличие в поле излучений заряженных частиц /в основном протонов/, регистрируемых фотозумьсией с высокой эффективностью^{5/}.

Если обратиться к результатам исследований спектров нейтронов в помещениях ускорителей и за их защитой /см., например,^{6-8/} /, то можно выделить две основные группы спектров:

1. Спектры, в которых основная доля нейтронов претерпела многократное отражение от внутренней поверхности стен помещения /спектры замедляющихся нейтронов/.

2. Спектры, формирующиеся при прохождении нейтронов высокой энергии через защиту без проемов. В таких спектрах, естественно, присутствуют и замедляющиеся нейтроны, но только в виде "сопровождения" к лидирующей группе нейтронов высокой энергии.

В спектрах первой группы нейтроны высокой энергии присутствуют в крайне малых количествах, так как их альbedo мало^{9/}.

Авторы работы^{10/}, посвященной экспериментальным исследованиям спектров нейтронов на ускорителях ОИЯИ, называют спектры первой группы "мягкими", а второй - "жесткими".

Поскольку в спектрах первой группы доля нейтронов с энергией $E > 20 \text{ МэВ}$ пренебрежимо мала, то измерения дозы быстрых нейтронов с помощью метода ИФКн вполне обоснованы. В полях излучений со спектром из второй группы реакция дозиметра ИФКн существенно иная, чем в поле быстрых нейтронов.

Цель настоящей работы - исследование показаний дозиметра ИФКн в поле излучений второй группы спектров и сопоставление этих показаний с величиной эквивалентной дозы излучений.

Для моделирования поля излучений использовалась следующая геометрическая идеализация задачи. Предполагалось, что на плоский слой защиты нормально к ее поверхности падает широкий пучок нейтронов. Поле излучений $F_1(x, E, \theta)$, образующихся за защитой, принималось за исходное для расчета реакции дозиметра ИФКн и эквивалентной дозы. За основу расчета эквивалентной дозы был принят формализм, изложенный в работе¹¹ с учетом некоторых уточнений. Вычисления выполнены на ЭВМ БЭСМ-6 с использованием программ D2N1, CASC1, LEN, S, EMUL, DOSE.

Для того чтобы выяснить, насколько зависят сопоставляемые величины /число треков и максимальное значение эквивалентной дозы/ от характера спектра первичных нейтронов, расчеты выполнялись для четырех спектров.

I. Нейтроны прямых ядерных реакций, испускаемые из мишеней, бомбардируемых протонами с энергией $E_0 > 10$ ГэВ, под углом $\theta = 70^\circ$.

II. Нейтроны с энергетическим спектром, равномерно распределенным по интервалу 3,68 ÷ 480 МэВ.

III. Нейтроны с энергетическим спектром, равномерно распределенным по интервалу 3,68 ÷ 660 МэВ.

IV. Нейтроны со спектром, равномерно распределенным по логарифмической энергетической переменной от 3,68 МэВ до 10 ГэВ /спектр $1/E$ /.

Энергия 3,68 МэВ соответствует нижнему порогу в расчетах спектров каскадных частиц. Все спектры были нормированы на единицу. Перечисленные спектры первичных нейтронов позволяют воспроизвести широкий набор радиационных ситуаций, типичных для полей излучений на синхроциклотронах и протонных синхротронах. В качестве материала защиты рассматривался обычный бетон с содержанием воды 5% по весу.

Для каждого спектра первичных нейтронов вычислялись следующие функционалы за слоем бетона толщиной x :

- число каскадных адронов сорта i с энергией выше $E_1 = 3,68 \text{ МэВ}$,

$$F_i(x) = \int_{E_1}^{E_0} \int_{2\pi} F_i(x, E, \theta) dE d\Omega;$$

- суммарное число каскадных адронов,

$$F(x) = \sum_{(i)} F_i(x);$$

- число треков, образуемых протонами поля излучений

$$N_p(x) = \int_{(E)} \int_{2\pi} F_p(x, E, \theta) \cdot \eta_p(E) dE d\Omega,$$

где $\eta_p(E)$ - чувствительность дозиметра ИФКн к протонам, принимаемая равной 1 в интервале $0,5 \leq E \leq 150 \text{ МэВ}$ и нулю вне этого интервала;

- число треков, образуемых нейтронами,

$$N_n(x) = \int_{(E)} F_n(x, E) \eta_n(E) dE,$$

где $\eta_n(E)$ - чувствительность дозиметра ИФКн к нейтронам, определяемая согласно /12/; $F_n(x, E)$ - суммарный энергетический спектр нейтронов с учетом их замедления, $H_{\max}(x)$ - максимальное значение эквивалентной дозы в тканезквивалентной пластине /ТЭП/, толщиной 30 см.

С целью более корректной интерпретации экспериментальных данных /1/ параллельно с данными по реакции дозиметра ИФКн были получены соответствующие значения сечения активации углерода, $^{12}\text{C}(x, n)^{11}\text{C}$, в поле адронов:

$$\sigma(x) = \sum_{(i)} \int_{(E)} \int_{2\pi} F_i(x, E, \theta) \sigma_i(E) dE d\Omega,$$

где $\sigma_i(E)$, мбарн - сечение активации углерода адронами сорта i с энергией E .

Спектр замедляющихся нейтронов рассчитывался в диапазоне от 20 МэВ до тепловой области, так что он существенно перекрывался с каскадным спектром.

На рис. 1 показаны энергетические спектры нейтронов и протонов в диапазоне энергий от 0,1 МэВ до E_0 .

В табл. 1 приведены расчетные данные, характеризующие исследуемое поле адронов по энергетическим группам. Для всех начальных спектров доля каскадных нейтронов в группе $2 \div 20$ МэВ составляет ~10% от их числа в группе выше 20 МэВ, поэтому группа $2 \div 20$ МэВ представлена в среднем на 70% замедляющимися нейтронами и на 30% - каскадными. Расчетные данные сравниваются в табл. 1 с экспериментальными результатами ^{13/}, характеризующими поле нейтронов за двухметровой защитой синхроциклотрона ОИЯИ. Видно, что расчетный состав поля нейтронов вполне соответствует экспериментальным данным, хотя и заметны некоторые различия, объяснить которые можно разницей в условиях расчета и эксперимента.

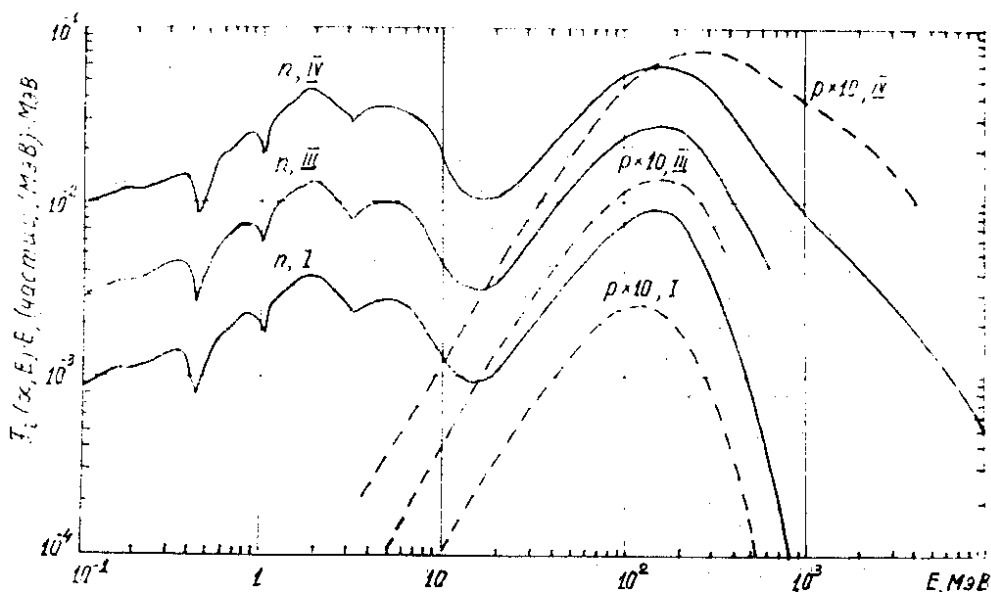


Рис.1. Энергетические спектры нуклонов за слоем бетона толщиной 500 г/см^2 , на поверхность которого падает широкий пучок нейтронов с начальными спектрами I, III, IV.

Таблица 1

Компонентный состав поля адронов за слоем бетона толщиной 500 г/см² при различных спектрах первичных нейтронов *

Спектр	Нейтроны						Протоны	π^+ -мезоны
	Энергия, МэВ							
	$4 \cdot 10^{-7} - 0,1$	0,1-0,5	0,5-2	2-20	>20	>3,7		
I	0,36	0,11	0,23	0,29	0,97	0,031	0,001	
II	0,36	0,11	0,23	0,28	0,96	0,038	0,001	
III	0,34	0,11	0,23	0,29	0,95	0,048	0,003	
IV	0,36	0,12	0,24	0,35	0,82	0,125	0,051	
350 МэВ**	0,40		0,91		1,0	-	-	
480 МэВ**	0,36		0,63		1,0			
660 МэВ**	0,16		0,39		1,0			

Примечания: * / - нормировка на один адрон с энергией выше 20 МэВ, ** / - указана энергия протонов при работе синхротрона на внутреннюю мишень, эксперимент /13/.

Максимальное расчетное значение суммарной эквивалентной дозы в ТЭП $H_{\max}(x)$, сопоставлялось с данными, характеризующими реакцию дозиметра ИФКн и углеродного детектора. Сводные данные по такому сопоставлению представлены в табл. 2.

Таблица 2

Сопоставление различных функционалов, характеризующих поле излучений и реакцию на него дозиметра ИФКн и углеродного детектора

Спектр	x, г/см ²	$\frac{F_n(x)}{F_p(x)}$		$\frac{N_p(x)}{N_n(x)}$		$H_{\max}(x)$	$H_{\max}(x)$	$H_{\max}(x)$
						$N(x)$ МКБЭР.СМ ² трек	$F(x)$ НБЭР.СМ ² адрон	$\sigma(x)$ НБЭР.СМ ² мбарн
I	200	29,4	8,55	4,67	56,1	2,88		
	500	33,5	7,84	4,91	56,7	2,90		
	II00	39,1	7,10	5,17	56,2	2,89		
	I550	41,9	6,78	5,30	56,0	2,89		
	2000	43,9	6,52	5,40	55,9	2,88		
II	200	20,6	12,2	3,85	56,8	2,82		
	500	27,0	9,40	4,43	56,4	2,87		
	II00	33,4	7,90	4,90	56,0	2,88		
	I550	36,2	7,39	5,08	56,2	2,90		
	2000	38,4	7,07	5,08	54,5	2,83		
III	200	14,9	14,7	3,77	61,5	2,99		
	500	21,1	10,8	4,23	58,3	2,91		
	II00	28,1	8,73	4,72	57,3	2,92		
	I550	31,6	8,03	4,92	56,8	2,91		
	2000	35,0	7,56	5,04	56,2	2,89		
IV	200	5,46	20,9	5,06	91,6	3,96		
	500	7,29	16,4	4,88	78,4	3,55		
	II00	9,77	13,6	4,88	71,0	3,34		
	I550	11,1	12,6	4,86	67,7	3,24		
	2000	12,3	11,9	4,90	66,2	3,19		

Примечание: $N(x) = N_n(x) + N_p(x)$; $F(x) = F_n(x) + F_p(x)$.

Проанализируем результаты расчетов. Во-первых, хорошо видна относительно слабая зависимость приведенных в *табл. 2* значений от вида первичного спектра и толщины защиты. Далее, из *табл. 2* видно, что число треков, образуемых в дозиметре ИФКи протонами поля излучений, примерно в $7 \div 20$ раз больше числа треков, обусловленных протонами отдачи, образующимися под действием нейтронов поля излучений. В то же время, как видно из *рис. 2*, максимальная эквивалентная доза быстрых нейтронов $/E < 20 \text{ МэВ}/$ примерно в 3 раза меньше N_{max} . Из этого следует, что, если интерпретировать число в терминах эквивалентной дозы быстрых нейтронов, то ожидается завышение "истинного" значения в $20 \div 60$ раз, что и было экспериментально установлено в ^{/2/}.

Расчеты глубинного распределения дозы излучений были выполнены для условий нормального их падения на поверхность ТЭП с использованием в качестве исходных данных ^{/14/}. Было также оценено, насколько чувствительно глубинное распределение к угловому распределению излучений, падающих на поверхность ТЭП. Результаты показаны на *рис. 2*, где сравниваются глубинные распределения компонентов эквивалентной дозы для условий нормального падения и с учетом углового распределения /"реальные" условия облучения/. Неопределенность в результатах расчета для облучения ТЭП с учетом углового распределения обусловлена в основном статистическими флуктуациями использованных исходных данных по глубинным распределениям дозы ^{/15/}.

На *рис. 2* результаты наших расчетов сравниваются также с экспериментальными данными ^{/16/}, полученными за боковой защитой протонного синхротрона в Серпухове. Нормировка сравниваемых распределений произведена по величине поглощенной дозы без ТЭП, точнее говоря, в расчетах - это толщина ТЭП 0,5 см для условий нормального падения излучений.

На основе значений, приведенных в *табл. 2*, были вычислены средние величины отношений функционалов

$$\left\langle \frac{N_{\text{max}}(x)}{\sigma(x)} \right\rangle = 3,0 \pm 0,2 / \text{нбэр} \cdot \text{см}^2 / \text{мбарн};$$

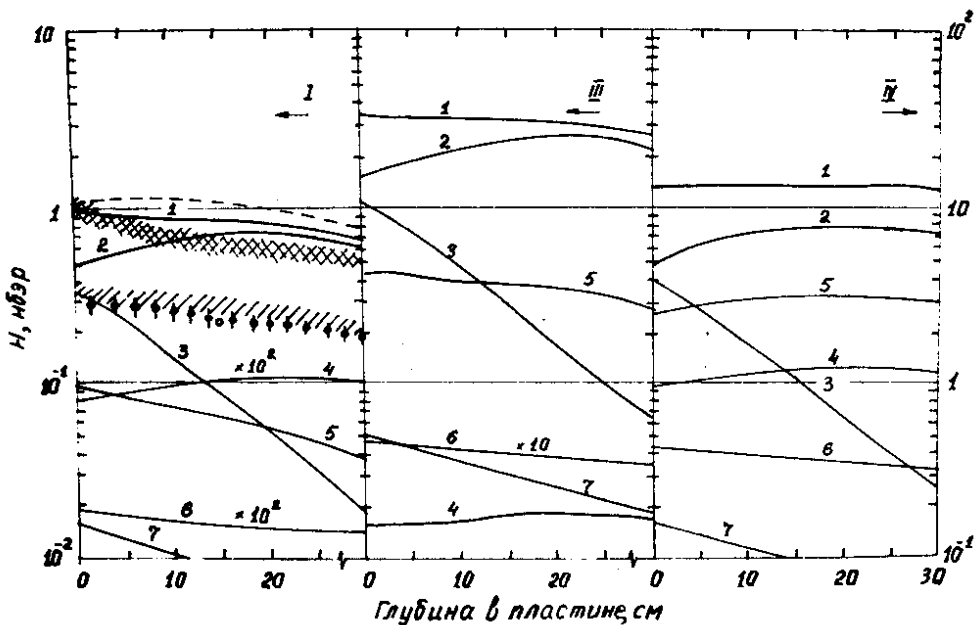


Рис.2. Глубинные распределения дозы и ее компонентов в ТЭП, размещенной за слоем бетона толщиной 500 г/см^2 /на поверхность бетона падают первичные нейтроны со спектрами I, III, IV/. Сплошные линии - эквивалентная доза /наш расчет для мононаправленного облучения ТЭП/: 1 - сумма; 2 - нейтроны $/E > 20 \text{ МэВ}/$; 3 - нейтроны $/E < 20 \text{ МэВ}/$; 4 - π^\pm -мезоны; 5 - протоны; 6 - π^0 -мезоны; 7 - γ -излучение. Пунктир - суммарная эквивалентная доза /расчет /11/- суммарная эквивалентная доза /наш расчет для "реальных" условий облучения ТЭП/.

///// - суммарная поглощенная доза /наш расчет для "реальных" условий облучения ТЭП/.

● - суммарная поглощенная доза в ТЭП /экспериментальные данные /17/.

○ - суммарная поглощенная доза без ТЭП /экспериментальные данные /18/.

$$\left\langle \frac{H_{\max}(x)}{N(x)} \right\rangle = 4,8 \pm 0,3 / \text{мкбэр} \cdot \text{см}^2 / \text{трек}; -$$

для мононаправленного источника и

$$\left\langle \frac{H_{\max}(x)}{\sigma(x)} \right\rangle = (3,5 \pm 0,5) \text{ нбэр см}^2 / \text{мбарн}$$

$$\left\langle \frac{N_{\max}(x)}{N(x)} \right\rangle = (5.5 \pm 0.7) \text{ мкбэр см}^2/\text{трек}$$

для "реальных" условий облучения. Приведенные значения могут быть интерпретированы как коэффициенты перехода от показаний двух рассмотренных детекторов к эквивалентной дозе излучений за сплошной защитой ускорителей протонов. Однако сама процедура использования переходных коэффициентов, как это справедливо отмечено в работе ^{/17/}, неразрывно связана с методом определения эквивалентной дозы в эксперименте. Для произвольного компонентного состава излучений необходимо провести аналогичный анализ по сопоставлению значений эквивалентной дозы и выходов соответствующих реакций, определяющих показания детекторов. Изложенный подход к интерпретации показаний детекторов в смешанном поле излучений и определению дозы излучений представляется нам наиболее последовательным как для обоснования применимости различных методов дозконтроля, так и для уменьшения степени неопределенности результатов, получаемых при применении этих методов /см. ^{/18/} /.

ВЫВОДЫ

1. Получена систематизированная расчетная информация о закономерностях формирования дозы излучений за защитой ускорителей протонов.
2. Получены численные данные о показаниях дозиметра ИФКн и углеродного детектора в исследованных полях излучений.
3. Показано, что отношение показаний детекторов излучений к значению максимальной эквивалентной дозы является величиной, мало меняющейся для исследованных полей излучения.
4. Полученные данные могут служить в качестве исходной информации для корректного определения дозы в полях излучений на ускорителях с помощью методов индивидуального контроля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алейников В.Е. и др. ОИЯИ, Р16-6790, Дубна, 1972.
2. Комочков М.М., Салацкая М.И. ОИЯИ, Р16-8175, Дубна, 1974.

3. Антипов А.В. и др. Препринт ИФВЭ ЛРИ 77-10, Серпухов, 1977.
4. Золин Л.С. и др. АЭ, 1962, 13, вып. 5, с. 467.
5. Комочков М.М. и др. ОИЯИ, 13-10188, Дубна, 1976.
6. Кимель Л.Р. и др. ОИЯИ, Р9-3409, Дубна, 1967.
7. Сычев Б.С. ОИЯИ, Р16-4304, Дубна, 1969.
8. Комочков М.М., Сычев Б.С. ОИЯИ, 16-4888, Дубна, 1970.
9. Кимель Л.Р. и др. ОИЯИ, Р16-3514, Дубна, 1967.
10. Алейников В.Е., Гердт В.П., Комочков М.М. ОИЯИ, Р16-9870, Дубна, 1967; АЭ, 1977, 42, вып. 4, с. 305.
11. Гельфанд Е.К. и др. Труды РТИ АН СССР, М., 1975, № 22, с. 242.
12. Манько Б.В. Труды РТИ АН СССР, М., 1977, № 30, с. 86.
13. Aleinikov V.E., Komochkov M.M., Tsoyboon V.I. Synchrocyclotron Shield-Bakage Neutron Spectra. International Congress on Protection against Accelerator and Space Radiation. CERN 71-16, Geneva, 1971.
14. Атлас дозовых характеристик внешнего ионизирующего излучения. Справочник под ред. докт. техн. наук Е.Е.Ковалева, М., 1978.
15. Zerby C.D., Kinney W.E. Nucl. Instr. and Meth., 1965, 36, No. 1, p.125.
16. Антипов А.В. и др. Препринт ИФВЭ, ОРИ 78-15, Серпухов, 1978.
17. Головачик В.Т., Кустарев В.Н., Лебедев В.Н. Препринт ИФВЭ ОРИ 77-91, Серпухов, 1977.
18. Комочков М.М. ОИЯИ, Р16-10647, Дубна, 1977.

Рукопись поступила в издательский отдел
14 июня 1979 года.