



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

G-326

P16 - 12552

Е.К.Гельфанд, М.М.Комочков, Б.В.Манько,
М.И.Салацкая, Б.С.Сычев

5/11-79

4497/2-79

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ДОЗЫ
ЗА ЗАЩИТОЙ УСКОРИТЕЛЕЙ ПРОТОНОВ
С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ИФКн

Дубна 1979

P16 - 12552

Е.К.Гельфанд, М.М.Комочков, Б.В.Манько,
М.И.Салацкая, Б.С.Сычев

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ДОЗЫ
ЗА ЗАЩИТОЙ УСКОРИТЕЛЕЙ ПРОТОНОВ
С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ИФКн

Направлено в АЭ

Гельфанд Е.К. и др.

P16 - 12552

Определение эквивалентной дозы за защитой ускорителей протонов с помощью метода ИФКн

Предлагается, при просмотре ядерной эмульсии дозиметра нейтронов ИФКн, вводить процедуру разделения треков на "серые" и "черные", в зависимости от линейной плотности проявленных зерен. Показывается, что наличие "серых" треков, соответствующих для эмульсии типа "К" энергии протонов ~ 50 МэВ, отвечает условиям облучения дозиметра в поле нуклонов высокой энергии. На основании результатов численных расчетов предлагается определять суммарную эквивалентную дозу излучений с помощью выражения, являющегося линейной комбинацией количества "черных" и "серых" треков, образуемых на единице площади эмульсии. Приводятся результаты просмотра эмульсий, облученных в разных условиях за защитой протонных ускорителей ОИЯИ и ЦЕРН. Сопоставление экспериментальных и расчетных данных указывает на возможность определения суммарной эквивалентной дозы излучений за защитой ускорителей с помощью метода ИФКн.

Работа выполнена в Отделе радиационной безопасности и радиационных исследований ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований, Дубна 1978

Gelfand E.K. et al.

P16 - 12552

Dose Equivalent Determination behind the Proton Accelerator Shielding by PNPC (Personal Neutron Photo Control) Technique

In surveying nuclear emulsion it is proposed to select the "gray" and "black" tracks depending upon their linear grain density. The existence of "gray" tracks corresponding to the proton energy of about 50 MeV is shown to correspond to the dosimeter irradiation by high energy nucleons. Basing on obtained numerical results we propose to calculate the total radiation dose equivalent by the relation which is a linear superposition of the number of "black" and "gray" tracks per unit emulsion square. The data obtained in surveying the emulsions irradiated under different conditions behind the JINR and CERN proton accelerators shielding are given. The comparison of experimental and calculated data points to the possibility to determine the total dose equivalent of radiation field behind the accelerator shielding by PNPC technique.

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

В работе^{/1/} нами выполнены расчеты, моделирующие показания дозиметра ИФКн в смешанном поле излучений за защитой ускорителей протонов. Было дано количественное объяснение эффекту существенного завышения показаний дозиметра, если интерпретировать их в терминах эквивалентной дозы быстрых нейтронов.

Известны работы^{/2,3/}, в которых предприняты попытки повысить достоверность определения дозы нейтронов за защитой ускорителей на высокие энергии с помощью метода ИФКн. В работе^{/2/} предлагается с этой целью учитывать либо плотность звезд в эмульсии, либо долю треков, начинающихся или заканчивающихся в эмульсии. В работе^{/3/}, помимо эмульсии типа "К", использовалась эмульсия типа Н-3 с пониженным верхним энергетическим порогом регистрации.

В настоящей работе покажем, как можно по числу треков, образуемых в эмульсии дозиметра ИФКн, определить суммарную эквивалентную дозу излучений более точно, чем ранее^{/2/}. Основой для решения этой задачи послужило то обстоятельство, что треки, регистрируемые в эмульсии, имеют различную плотность зерен в зависимости от энергии образующих их протонов. В работе^{/4/} нами было предложено визуально разделять треки в эмульсии типа "К" на две группы: "черные" и "серые". Черными мы назвали треки, в которых доля длины, занимаемая зернами, больше доли, занимаемой разрывами. Остальные треки названы серыми. Из экспериментальных данных, полученных в^{/4/}, можно заключить, что граница между серыми и черными треками соответствует энергии протона ~ 50 МэВ. Ясно, что наличие в эмульсии серых треков свидетельствует о присутствии в поле излучений высокоэнергетических протонов.

Быстрые же нейтроны $/E < 20 \text{ МэВ}/$ могут образовывать только черные треки. Для того чтобы использовать информацию о числе черных и серых треков с целью установления эквивалентной дозы излучений, необходимо показать, что существуют достаточно устойчивые соотношения между эквивалентной дозой и числом треков в рассматриваемых группах. С этой целью расчеты, выполненные в ^{1/}, были расширены для получения данных о числе черных и серых треков, образующихся в эмульсии дозиметра ИФКн. Разделение на серые и черные относилось к проекциям треков на плоскость эмульсии. Как и в ^{1/}, исследовалась реакция дозиметра в полях излучений за плоскими экранами из обычного бетона различной толщины, облучаемыми широким пучком нейтронов следующих энергетических спектров:

I. Нейтроны прямых ядерных реакций, испускаемые из мишеней, бомбардируемых протонами с энергией $E \geq 10 \text{ ГэВ}$, под углом $\theta = 70^\circ$.

II. Нейтроны с энергетическим спектром, равномерно распределенным по интервалу $3,68 \div 480 \text{ МэВ}$.

III. Нейтроны с энергетическим спектром, равномерно распределенным по интервалу $3,68 \div 660 \text{ МэВ}$.

IV. Нейтроны со спектром, равномерно распределенным по логарифмической переменной в интервале $3,68 \text{ МэВ} \div 10 \text{ ГэВ}$ /спектр $1/E$ /.

Помимо вариаций начального спектра нейтронов и толщины защитного экрана, исследовалась реакция дозиметра в зависимости от верхней границы чувствительности эмульсии, которая менялась от 150 до 175 МэВ . Граница между серыми и черными треками варьировалась в пределах $30 \div 50 \text{ МэВ}$. Расчет образования треков нейтронами проводился согласно ^{15/}. Плотности образуемых треков ставилось в соответствие максимальное значение эквивалентной дозы в тканезквивалентной пластине $/\text{ТЭП}/ - N_{\text{max}}$.

Результаты расчетов приведены в табл. 1 и 2. В этих таблицах использованы следующие обозначения: x - толщина слоя бетона, $г/см^2$; $N_p^{(q)}$ - плотность черных треков, образуемых протонами поля излучений, $трек/см^2$; $N_n^{(q)}$ - плотность черных треков, образуемых под действием нейтронов, $трек/см^2$; $N^{(q)}$ - суммарная плотность черных треков, $трек/см^2$; N_c - суммар-

ная плотность серых треков, $\text{трек}/\text{см}^2$; N - суммарная плотность треков, $\text{трек}/\text{см}^2$; E_c - энергия протонов, которые образуют серые треки.

Таблица 1

Соотношение между плотностью образования треков и эквивалентной дозой поля излучений /интервал регистрации серых треков - $40 < E_c < 150$ МэВ/.

Спектр	x , $\text{г}/\text{см}^2$	$\frac{N_p^{(y)}}{N_n^{(y)}}$	$\frac{N^{(y)}}{N^{(c)}} = k$	$\frac{H_{\max}/N^{(c)}}{\text{мкБэр.см}^2/\text{трек}}$	$\frac{H_{\max}/N}{\text{мкБэр.см}^2/\text{трек}}$
I	200	5,15	0,725	8,05	4,67
	500	4,86	0,752	8,61	4,91
	II00	4,58	0,784	9,22	5,17
	I550	4,43	0,800	9,54	5,30
	2000	4,32	0,815	9,79	5,39
II	200	6,77	0,623	6,26	3,86
	500	5,54	0,681	7,45	4,43
	II00	4,86	0,737	8,51	4,90
	I550	4,65	0,754	8,94	5,10
	2000	4,51	0,770	8,99	5,08
III	200	7,89	0,583	5,97	3,77
	500	6,16	0,646	6,97	4,23
	II00	5,22	0,703	8,04	4,72
	I550	4,94	0,727	8,47	4,90
	2000	4,74	0,747	8,80	5,04
IV	200	10,2	0,553	7,90	5,09
	500	8,43	0,586	7,71	4,86
	II00	7,30	0,617	7,86	4,86
	I550	6,87	0,635	7,94	4,86
	2000	6,62	0,646	8,05	4,89

Таблица 2

Соотношение между плотностью образования треков и эквивалентной дозой излучений для II-го спектра первичных нейтронов

E_c , МэВ	x , г/см ²	$\frac{N_p^{(ч)}}{N_n^{(ч)}}$	$\frac{N^{(ч)}}{N^{(e)}} = k$	$H_{max} / N^{(e)}$, мкбэр.см ² трек	H_{max} / N , мкбэр.см ² трек
50 + 150	200	7,52	0,87	7,21	3,86
	500	6,13	0,96	8,69	4,43
	1100	5,33	1,03	9,91	4,88
	1550	5,10	1,06	10,5	5,10
	2000	4,93	1,09	10,6	5,03
40 + 150	200	6,77	0,623	6,26	3,86
	500	5,54	0,681	7,45	4,43
	1100	4,86	0,737	8,51	4,90
	1550	4,65	0,754	8,94	5,10
	2000	4,51	0,770	8,99	5,08
30 + 150	200	5,92	0,428	5,50	3,85
	500	4,88	0,467	6,50	4,43
	1100	4,31	0,502	7,36	4,90
	1550	4,12	0,512	7,71	5,10
	2000	4,01	0,525	7,75	5,08
40 + 175	200	6,87	0,553	5,47	3,52
	500	5,61	0,613	6,59	4,09
	1100	4,90	0,665	7,59	4,56
	1550	4,68	0,684	8,01	4,76
	2000	4,54	0,699	8,09	4,76

Как видно из табл. 1 и 2, в рассмотренных полях излучений действительно существует достаточно устойчивое соотношение между плотностью треков и максимальной эквивалентной дозой, что позволяет находить H_{\max} по числу треков для неизвестных полей с "жестким" спектром:

$$H_{\max} = \beta_0 N \quad /1/$$

$$H_{\max} = \beta_1 N^{(c)} \quad \text{или} \quad /1/$$

где β_0 и β_1 - коэффициенты перехода от плотности всех треков и плотности серых треков, соответственно, к эквивалентной дозе в рассматриваемом поле излучений.

В реальных ситуациях облучение за защитой ускорителей может происходить в условиях, характеризуемых суперпозицией "жесткого" и "мягкого" спектров. В этом случае, пользуясь установленным в расчетах отношением плотности черных треков к плотности серых треков в "жестком" спектре k , и учитывая, что в "мягком" спектре образуются только черные треки, можно записать:

$$H_{\max} = \beta_1 N^{(c)} + \beta_2 [N - (1+k)N^{(c)}], \quad /2/$$

где β_2 - коэффициент перехода от плотности черных треков к максимальной эквивалентной дозе рассеянных нейтронов "мягкого" спектра, мбэр см²/трек.

В выражении /2/ предполагается, что максимальные значения эквивалентной дозы для каждого из полей излучения соответствуют одной и той же глубине ТЭП. Как следует из /1/, это действительно справедливо, причем H_{\max} соответствует поверхности ТЭП. Поэтому далее индекс "max" в H_{\max} опускаем. Коэффициенты β_1 , β_0 и k находились путем усреднения данных табл. 1 и 2.

$$\beta_1 = /8,15 \pm 1,17/ \text{ мкбэр см}^2/\text{трек};$$

$$\beta_0 = /4,80 \pm 0,44/ \text{ мкбэр см}^2/\text{трек};$$

$$k = 0,71 \pm 0,16.$$

Согласно экспериментальным и расчетным данным, величина β_2 изменяется в зависимости от спектра быстрых нейтронов и в среднем составляет:

$$\beta_2 = /135 \pm 30/ \text{ мкбэр см}^2/\text{трек}.$$

Прежде чем записать окончательное выражение для эквивалентной дозы, сделаем несколько замечаний относительно степени неопределенности используемых параметров β_0 , β_1 и k . Приведенная для β_0 , β_1 и k погрешность обусловлена физическими закономерностями формирования поля излучений в защите и отражает степень неконсервативности этих величин в рассмотренной нами области изменения исходных данных, то есть, вида энергетического спектра первичных нейтронов и толщины защиты. Помимо этого, существует погрешность, обусловленная неточностью в исходных данных по сечениям взаимодействия адронов с ядрами. По нашим оценкам, наибольшее влияние на β_0 оказывает отношение средних множественностей протонов и нейтронов в неупругих адрон-ядерных взаимодействиях. Анализ данных, полученных разными авторами^{/6-8/}, указывает на неопределенность ~ 40% в величине этого отношения. Существует также неопределенность ~ 15% в величине эквивалентной дозы для "жесткого" спектра, связанная с формой представления углового распределения излучений, падающих на поверхность ТЭП^{/1/}. Поэтому целесообразно ввести коррекцию в значения коэффициентов β_0 и β_1 .

В практике индивидуального дозиметрического контроля в ОИЯИ просмотр эмульсий под микроскопом ведется по траверсу площадью $0,0225 \text{ см}^2$, а число треков относят обычно к этой площади. Поэтому значения переходных коэффициентов должны быть перенормированы. Перенормированные значения переходных коэффициентов следующие:

$$\beta_0 = /0,27 \pm 0,07/ \text{ мбэр. траверс/трек};$$

$$\beta_1 = /0,46 \pm 0,11/ \text{ мбэр. траверс/трек};$$

$$\beta_2 = /6,0 \pm 0,9/ \text{ мбэр траверс/трек}.$$

Указанная погрешность отражает неопределенность в исходных данных, а также изменение результатов в зависимости от начальных условий. Выражения /1/ и /2/ трансформируются, соответственно, в:

$$N = 0,27 N, \text{ мбэр};$$

$$N = 6,0 N - 9,8 N^{(e)} \text{ мбэр}.$$

/3/

/4/

При экспериментальном определении плотности треков в эмульсии возможны следующие субъективные источники ошибок:

а/ неопределенность в величине плотности зерен, принимаемой за границу между черными и серыми треками;

б/ неопределенность в величине минимальной плотности зерен, когда упорядоченная их группа воспринимается как трек, в особенности для треков, пересекающих эмульсию под большим углом относительно ее поверхности. Оба эти источника ошибок частично учитываются нами путем вариации соответствующих исходных данных. Однако эта вариация относительно невелика и отражает, по-видимому, наименьшую погрешность, которую следует ожидать от результатов просмотра пленок опытными лаборантами. Как будет видно из приводимых ниже экспериментальных данных, разброс между результатами просмотра одной и той же эмульсии разными лаборантами больше, чем следует из наших оценок, хотя в среднем можно говорить о согласии эксперимента и расчета в пределах ожидаемых ошибок.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Экспериментальные данные представляют собой результаты просмотра эмульсий, облученных за защитой ускорителей протонов ОИЯИ и ЦЕРНа, в соответствии с предлагаемой методикой разделения треков на черные и серые. Просмотр производился двумя опытными лаборантами. По результатам просмотра с помощью приведенных выше выражений определялась эквивалентная доза излучений N_1 , которая сопоставлялась со значением N_0 , полученным наиболее достоверными способами измерения дозы.

В табл. 3 приведены результаты просмотра 13 эмульсий, облученных в шести точках за защитой синхроциклотрона и синхрофазотрона ОИЯИ^{/2/} и в "жестком" спектре за защитой синхротрона ЦЕРНа^{/10/}. При рассмотрении результатов, приведенных в табл. 3, необходимо иметь в виду, что точки 1 и 3 /рис. 1 из работы^{/2/} расположены за защитой без проемов и каналов, поэтому условия облучения в них наиболее близки

Таблица 3

Результаты просмотра эмульсий, облученных на различных ускорителях

Установка	Точка измерения	Число треков на траверсе			$k = \frac{N^{(ч)}}{N^{(с)}}$	Эквивалентная доза, мбэр		$\frac{H_1}{H_0}$
		$N^{(ч)}$	$N^{(с)}$	N		H_1	H_0	
Синхроциклотрон ОИЯИ $E_p = 660 \text{ МэВ}$ Рис. 1 /2/	1	337	561	898	0,60	242	213	1,14
	1	226	405	671	0,66	181	213	0,85
	3	417	739	1156	0,56	312	307	1,02
	3	210	248	458	0,85	124	96	1,29
Синхроциклотрон ОИЯИ $E_p = 660 \text{ МэВ}$ Рис. 2 /2/	1	206	595	801	0,34	216	187	1,16
	1	274	666	940	0,41	253	187	1,36
	2	215	475	690	0,45	186	136	1,35
	2	182	451	633	0,40	171	136	1,26
	4	16,0	38,6	54,6	0,41	14,7	28,0	0,53
4	19,7	63,6	83,3	0,31	22,5	28,0	0,80	
Синхрофазотрон ОИЯИ $E_p = 10 \text{ ГэВ}$ Рис. 3 /2/	9	354	816	1170	0,43	316	423	0,75
	9	112	490	602	0,23	163	188	0,86
Протонный синхротрон ЦЕРН $E_p = 28 \text{ ГэВ} /10/$ жесткий спектр		590	1154	2144	0,38	579	600	0,95

к условиям расчета дозы за глухой защитой, результаты которого приведены в данной работе. Доза излучения в точках 1 и 2 /рис. 2 /2/ на синхроциклотроне также в основном обусловлена "жестким" спектром. В точке 4 /рис. 2 /2/ имеет место суперпозиция "жесткого" и "мягкого" спектров. В точке 9 /рис. 3 /2/ на синхрофазотроне треки в эмульсии могли быть образованы еще и вторичными протонами, получающимися при прохождении первичного пучка протонов по каналу, вблизи которого находится точка 9. В табл. 3 дается сравнение дозы H_1 , посчитанной по формуле /3/, поскольку облучение эмульсий проводили в "жестких" спектрах, где $k < 0,87$, и значения H_0 . Среднее значение отношения H_1/H_0 по результатам табл. 3 составляет $1/0,3 \pm 0,21$, что подтверждает справедливость выполненных расчетов.

Для оценки субъективных ошибок при просмотре одна из облученных в "жестком" спектре эмульсий была просмотрена семью лаборантами. В табл. 4 приведены результаты просмотра. Как видно из этой таблицы, результаты, полученные разными лаборантами, существенно отличаются друг от друга. Исходя из приведенных данных, можно получить средние значения:

$$\overline{N^{(q)}} = /334 \pm 57/ \text{ трек/траверс};$$

$$\overline{N^{(c)}} = /375 \pm 86/ \text{ трек/траверс};$$

$$k = \frac{\overline{N^{(q)}}}{\overline{N^{(c)}}} = 0,89 \pm 0,25;$$

$$\overline{N} = /709 \pm 80/ \text{ трек/траверс}.$$

Таблица 4

Результаты просмотра эмульсии, облученной в "жестком" спектре за защитой синхроциклотрона ОИЯИ

Лаборант № п/п	Число треков на траверсе			
	$N^{(q)}$	$N^{(c)}$	N	k
I	339	390	729	0,87
II	428	325	753	1,32
III	288	301	589	0,96
IV	401	234	635	1,71
V	337	562	899	0,60
VI	214	476	690	0,45
VII	268	340	608	0,79

Эквивалентная доза, определенная в этом случае, согласно /3/, составляет 191 мбэр. Значение эквивалентной дозы, полученное с помощью наиболее достоверных способов измерения, в данном случае - 210 мбэр, погрешность измерения составляет /15 ÷ 20/%. Поэтому можно утверждать, что расчетные данные совпадают с экспериментально полученными результатами.

Данные табл. 4 указывают на большую субъективную ошибку при разделении треков на черные и серые. Однако следует отметить, что приведенные результаты получены лаборантами

практически без предварительной подготовки. Это дает основание к оптимизму в отношении существенного уменьшения субъективной ошибки при просмотре эмульсий по мере приобретения навыков по новой методике просмотра.

Согласно полученным в работе данным, для определения эквивалентной дозы по результатам просмотра предлагается следующая методика. При просмотре эмульсии считается число черных и серых треков, затем находится величина $k = N^{(ч)}/N^{(с)}$. Если $0,4 \leq k \leq 1,1$, то доза определяется по формуле /3/. В данном случае величины 0,4 и 1,1 соответствуют граничным значениям $k = 0,71 \pm 0,16$ с учетом субъективных ошибок при делении треков на черные и серые. Если $k > 1,1$, то доза определяется по формуле /4/. Случай, когда $k < 0,4$, означает, что условия облучения резко отличались от рассмотренных в данной работе /например, облучение внутри помещения ускорителя/, и необходимо дополнительное исследование.

ВЫВОДЫ

1. Показана принципиальная возможность определения полной эквивалентной дозы поля излучений за защитой ускорителей протонов с помощью метода ИФКн путем введения в процедуру просмотра эмульсий разделения треков на "черные" и "серые".

2. Достоверность измерения эквивалентной дозы в полях с "жестким" спектром при этом выше, чем при использовании метода, предложенного в работе /2/; в случае суперпозиции "мягкого" и "жесткого" спектров достоверности обоих методов, по-видимому, одинаковы.

3. Сравнение экспериментальных и расчетных данных показало применимость использованного метода расчета для моделирования дозовых характеристик излучений за защитой ускорителей протонов.

Авторы выражают благодарность сотрудникам группы индивидуального дозиметрического контроля Отдела радиационной безопасности и радиационных исследований ОИЯИ, выполнившим просмотр эмульсий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гельфанд Е.К. и др. ОИЯИ, 16-12551, Дубна, 1979.
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. Комочков М.М. и др. ОИЯИ, 13-10188, Дубна, 1976.
5. Манько Б.В. В кн.: Труды РТИ АН СССР №30. М., 1977, с.86.
6. Alsmiller R.G., Jr., Leimderber M., Barish J. ORNL-4046, UC-34-Physics.
7. Барашенков В.С., Тонеев В.Д. Взаимодействия высокоэнергетических частиц и атомных ядер с ядрами. Атомиздат, М., 1972.
8. Варлашова Г.А. и др. В сб. докладов совещания по дозиметрии и физике защиты на ускорителях. ОИЯИ, 16-4888, Дубна, 1970.
9. Бискупчук А.М. и др. Препринт ИФВЭ ЛРИ 76-136, Серпухов, 1976.
10. Комочков М.М., Салацкая М.И. ОИЯИ, Р16-9780, Дубна, 1976.

Рукопись поступила в издательский отдел
16 июня 1979 года.