

A-458



29/1-73

441/2-73

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ОТДЕЛ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

P16 - 6790

В.Е. Алейников, В.А. Архипов, В.Ф. Виноградов,  
М.М. Комочков, Ю.В. Мокров,  
М.И. Салацкая, А.П. Череватенко

СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ И ПРИБОРОВ  
ДОЗИМЕТРИИ В ПОЛЯХ ИЗЛУЧЕНИЙ  
УСКОРИТЕЛЕЙ ПРОТОНОВ ОИЯИ

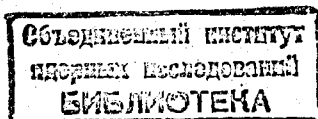
Дубна 1972

P16 - 6790

В.Е. Алейников, В.А. Архипов, В.Ф. Виноградов,  
М.М. Комочков, Ю.В. Мокров,  
М.И. Салацкая, А.П. Череватенко

**СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ И ПРИБОРОВ  
ДОЗИМЕТРИИ В ПОЛЯХ ИЗЛУЧЕНИЙ  
УСКОРИТЕЛЕЙ ПРОТОНОВ ОИЯИ**

Доклад на симпозиум МАГАТЭ по нейтронной  
дозиметрии. Вена, 11-15 декабря 1972 г.



Работа выполнена с целью установления степени достоверности результатов, получаемых при оперативных измерениях уровней ионизирующих излучений и, в частности, эквивалентной дозы нейтронов, а также для критической оценки различных способов дозиметрии нейтронов и определения адекватности показаний некоторых приборов эквивалентной дозе нейтронов в условиях работы ускорителей протонов высоких энергий.

#### Приборы и условия сравнения

В сравнительных измерениях использовались приборы, указанные в таблице I. Там же даны приблизительные интервалы энергий измеряемых излучений и диапазоны измерения величин в полях с импульсной структурой излучения при коэффициенте заполнения  $2,5 \cdot 10^{-2}$ . Данные таблицы свидетельствуют о том, что приборы, дополняя друг друга, позволяют перекрыть необходимый энергетический интервал и диапазон измеряемых величин. Верхний предел измерения мощностей доз для большинства приборов установлен в опытах на ускорителях ОИЯИ и соответствует 10-процентной потере информации вследствие просчетов. Нижняя граница энергетического диапазона измерений дозы излучения рекомбинационным дозиметром REM-2 соответствует энергии, при которой пробег частиц или длина релаксации дозы излучения больше толщины стенок камеры  $\sim 0,4 \text{ г/см}^2 \text{ Ae}$ .

Верхний предел энергетического диапазона не ограничен, однако при этом следует помнить, что доза излучения измеряется на глубине  $\sim 2 \text{ г/см}^2$  ткани /6/.

Таблица I

## Приборы и их параметры

№: Наименование прибора или детектора и его пп: символ	: Энергетический диапазон изме- : диапазон, эв	: Диапазон изме- : прямой величины	: Размерность : измеряемой : величины
I. Спектрометр Боннера <sup>/1/</sup> , СБ	$10^{-2}+10^8$	$0,1+2 \cdot 10^3$	мбэр/час
2. Детектор медленных нейтронов с четырьмя шаровыми замедлителями <sup>/2/</sup> ,	$10^{-1}+10^7$	$0,1+2 \cdot 10^3$	мбэр/час
3. Детектор медленных нейтронов в одном шаровом замедлителе <sup>/2/</sup> , $\phi = 25,4$ см	$10^{-2}+10^7$	$0,1+2 \cdot 10^3$	мбэр/час
4. Пропорциональный счетчик в цилиндрическом замедлителе с толщиной стенок 12 см <sup>/3/</sup> , ПС	$0,5+1,4 \cdot 10^7$	$0,01+5 \cdot 10^2$	мбэр/час
5. Сцинтилляционный счетчик с детекторами медленных и быстрых нейтронов <sup>/4/</sup> , ДН-А1	$2 \cdot 10^{-2}-10^9$	$0,3-7 \cdot 10^2$	мбэр/час
6. $In$ в замедлителе $\phi = 28$ см <sup>/5/</sup> ,	$10^{-2}+10^7$	$\geq 3$	мбэр/час
7. Активационный детектор $^{12}C(x, xn)^{11}C, ^{12}C$	$> 2 \cdot 10^7$	$\geq 1$	мбэр/час
8. Гейгеровский счетчик с чехлом из серебра в замедлителе <sup>/5/</sup> , Ag	$10^{-2}+10^7$	$0,6+3 \cdot 10^2$	мбэр/час
9. Ионизационная камера, работающая в режиме насыщения и в режиме рекомбинации ионов <sup>/6/</sup> , REM-2	см. текст	$1+10^3$	мбэр/час
10. Ионизационная камера со стенками из алюминия, наполненная воздухом, $\gamma+3$	$2 \cdot 10^5-3 \cdot 10^6(\gamma)$	$0,2+10^3$	мр/час
11. Индивидуальный фото-контроль   нейтроны, ИФК <sup>/7/</sup> , 8/   гамма-кванты <sup>/9/</sup> , ИФК	$10^{-2}+1,5 \cdot 10^7$ $10^3+3 \cdot 10^6$	$0,02+15$ $0,02+70$	бэр рентген

При выборе мест измерения с целью сравнения мощностей доз или доз излучений, регистрируемых различными приборами, стремились получить результаты в условиях максимально "жесткого" и "мягкого" спектров нейтронов, как одного из основных компонентов проникающей радиации. При этом необходимо было выбрать такие уровни излучений, которые за приемлемое время можно было зарегистрировать всем набором приборов. Таким требованиям на синхроциклотроне отвечали места за сплошной защитной стеной и за стеной с проемами. Эти условия были близки к условиям мононаправленного источника нейтронов на границе полубесконечного барьера - "жесткий" спектр (точки 1 и 3 рис. 1) и к условиям, при которых многократно рассеянная радиация проходит через проемы - "мягкий" спектр (точка 2 рис. 1, ). На синхрофазотроне места для сравнения соответствовали промежуточным условиям - между "мягким" и "жестким" спектрами (рис. 2).

#### Результаты и их интерпретация

Результаты сравнения представлены в таблицах 2 и 3. Данные таблицы 2 содержат результаты сравнения эквивалентных доз нейтронов с энергиями менее 20 Мэв, измеренных различными приборами, с аналогичными величинами, полученными в измерениях со спектрометром Боннера<sup>/10/</sup>, которые мы считаем наиболее вероятными. Результаты сравнения свидетельствуют о том, что для ряда приборов и методов наблюдаются большие отклонения от наиболее вероятных величин. Это, в частности, относится к методу ИФКН<sup>/7,8/</sup> и прибору ДН-А1<sup>/4/</sup>, которые предназначены для контроля экви-

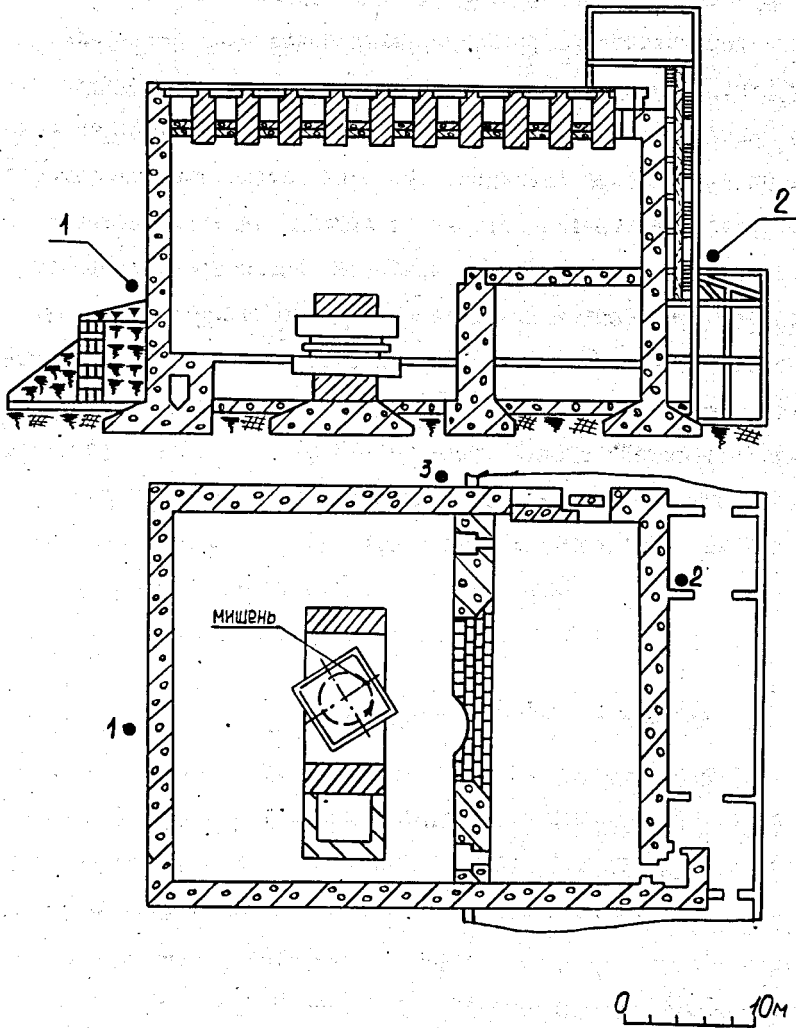


Рис. I. Геометрия измерений вблизи синхроциклотрона:  
 1, 2, 3-точки измерения.

валентной дозы, приблизительно, в этой области энергий нейтронов. Завышение до коэффициента 2 наблюдается и для других широко используемых приборов<sup>/5/</sup>. Исключение составляет прибор, в котором детектором является сцинтилляционный счетчик медленных нейтронов, помещаемый при измерениях последовательно в центре четырех шаровых полиэтиленовых замедлителей<sup>/2/</sup>. При обработке настоящих результатов измерений по четырехшаровой методике использовались уточненные функции чувствительности детектора медленных нейтронов, помещенного в шары различного диаметра<sup>/10/</sup>. Новые функции чувствительности дают коэффициенты в формуле для нахождения эквивалентной дозы, отличные от коэффициентов, указанных в работе<sup>/2/</sup>. Уточненное выражение записывается в следующем виде:

$$D = 0,458 \cdot N_{10''} + 0,0733 N_{7''} - 0,121 N_{5''} + 0,044 N_{3,5''},$$

где  $D$  - мощность эквивалентной дозы, мбэр/час;  
 $N$  - скорость счета, имп/сек, с соответствующим диаметром шаров в дюймах.

При этом чувствительность детектора с шаром 10 дюймов составляет величину 0,32 имп.нейтрон<sup>-1</sup>см<sup>2</sup>. Результаты, полученные с помощью уточненного выражения, на 30% меньше аналогичных величин, получаемых с помощью прежнего выражения<sup>/2/</sup>.

В чем же причина плохого соответствия показаний ИФКН и ДН-А1 эквивалентной дозе нейтронов того энергетического диапазона, для контроля в котором они предназначались? Прежде всего,

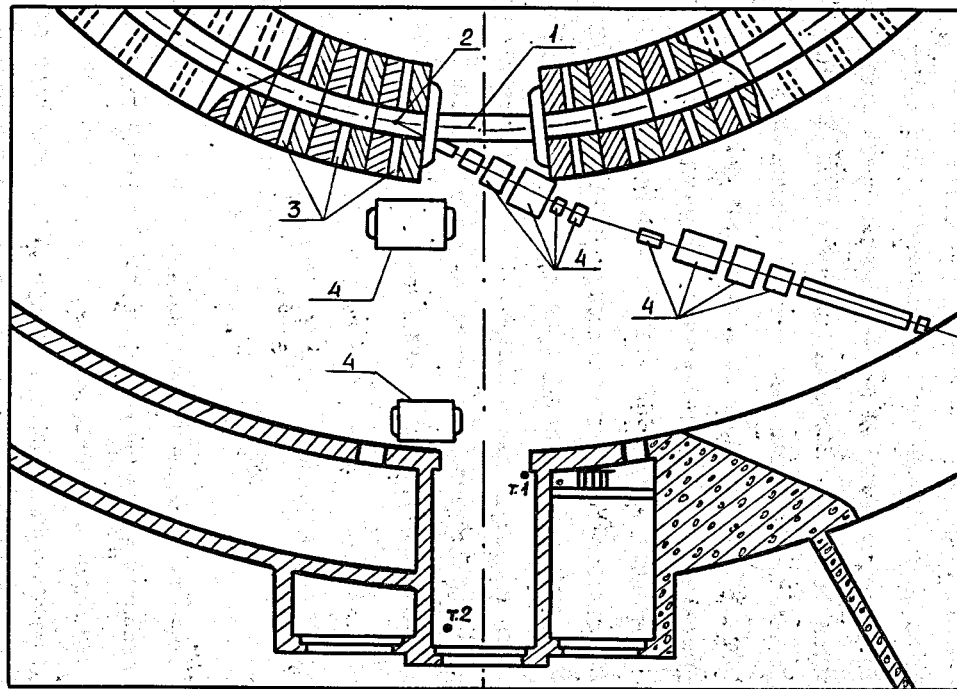


Рис. 2. Геометрия измерений вблизи синхрофазотрона.  
 1-пучок протонов; 2-мишень; 3-"окна" в секциях магнита ускорителя; 4-экспериментальное оборудование;  
 т.1, т.2 - точки измерения.



Таблица II

Отношение эквивалентной дозы нейтронов с энергией менее 20 Мэв, измеренной различными приборами, к эквивалентной дозе, установленной с помощью спектрометра Боннера  $D_{CB}^*$

Установки	: Номера : точек изме- : рения : (рис. I, 2 )	$: D_{\Sigma\phi}$	$: D_{In}$	$: D_{\phi=25,4}$	$: D_{TC}$	$: D_{Ag}$	$: D_{DH-A-1}$	$: D_{ИФКН}$
		$: D_{CB}$	$: D_{CB}$	$: D_{CB}$	$: D_{CB}$	$: D_{CB}$	$: D_{CB}$	$: D_{CB}$
Синхрофазотрон, $E_p = 10$ Гэв	1	1,15	1,13	1,4	0,72	0,7	2,8	6,3
	2	1,15	1,8	1,5	1,4	0,86	2,0	4,6
Синхроциклотрон, $E_p = 660$ Мэв	1	1,10	1,1	1,2	1,5	1,4	6,5	33
	2	1,15	2,0	2,2	2,0	1,4	0,75	0,3 <sup>xxx</sup> (0,6) <sup>xxx</sup>
	3	1,0	1,05	1,02	1,15	1,1	3,6	47

\*)  $D_{CB} = \int_{10^{-3,36}}^{20M96} \eta \frac{dN}{dE} dE$

xx) измерения без фантома

xxx) измерения с фантомом

$\eta$  - коэффициент перехода от плотности потока моноэнергетических нейтронов, падающих на фантом, к максимальной эквивалентной дозе  $1/51$ , а  $\frac{dN}{dE}$  - спектр нейтронов в данной точке измерения /10/

следует обратить внимание на то, что завышение эквивалентной дозы наблюдается только там, где вклад в дозу релятивистских нейтронов ( $E > 20$  Мэв) значителен. Поток релятивистских нейтронов всегда сопровождается потоком заряженных частиц и, в частности, протонов, которые образуются от взаимодействия нейтронов с ядрами. Поток таких протонов составляет несколько процентов от потока нейтронов<sup>/11/</sup>. С другой стороны, хорошо известно<sup>/12/</sup>, что эмульсия, применяемая в ИФКН, регистрирует протоны вплоть до энергии 150 Мэв. Оценки<sup>\*</sup> показывают, что сцинтилляционный счетчик, детектором которого служит смесь  $ZnS(Ag)$  с плексигласом (как это имеет место в одном из детекторов прибора ДН-А1) даже хорошо регистрирует протоны с энергией до  $\sim 100$  Мэв при дискриминации импульсов от гамма-квантов радия или кобальта-60. Так как пробег протонов увеличивается с ростом энергии нейтронов, то повышение чувствительности ИФКН и ДН-А1 происходит за счет увеличения объема радиатора.

Завышение показаний приборов, детекторами которых являются  $In$  в замедлителе, сцинтилляционный счетчик медленных нейтронов в шаре  $\phi=25,4$  см, пропорциональный счетчик  $BF_3$  в цилиндрическом замедлителе и гейгеровский счетчик с серебряным чехлом в замедлителе, является следствием повышенной чувствительности таких детекторов в области промежуточных нейтронов<sup>/3/</sup>. Кажущееся соответствие показаний этих детекторов

---

\* Расчеты сделаны Цовбуном В.И. —сотрудником Отдела радиационной безопасности Объединенного института ядерных исследований

в поле излучения, где вклад релятивистских нейтронов значителен, происходит из-за пониженной чувствительности указанных детекторов в области энергий нейтронов от 10 до 20 Мэв. Таким образом, пониженная чувствительность в диапазоне от 10 до 20 Мэв компенсируется повышенной чувствительностью в области промежуточных нейтронов.

Очень важно установить различие в показаниях, существующее при воспроизведении суммарной дозы излучений. Сравнение выполним в единицах эквивалентной дозы, зарегистрированной как сумма различных компонентов излучений и энергетических групп нейтронов к эквивалентной дозе, установленной с помощью рекомбинационного дозиметра, детектором которого является тканеэквивалентная ионизационная камера, работающая попеременно в режиме насыщения и в режиме рекомбинации ионов. Результаты сравнения представлены в таблице 3. Как видно из таблицы, сравниваются три различных набора приборов с рекомбинационным дозиметром. При установлении эквивалентной дозы релятивистских нейтронов (первая колонка таблицы) коэффициент перехода от плотности потока нейтронов к мощности эквивалентной дозы определяли с помощью данных о глубинном распределении эквивалентной дозы нейтронов (рис.3), которые были получены на основе энергетического  $^{10}$  распределения нейтронов и глубинного распределения эквивалентной дозы  $^{13,14}$  для моноэнергетических нейтронов, падающих на фантом в направлении нормали к его плоскости  $^{14}$  или вдоль диаметра его цилиндра  $^{13}$ . При этом коэффициенты перехода в единицах  $\frac{\text{мБэр}}{\text{час}} \cdot \frac{\text{нейтрон}}{\text{см}^2 \cdot \text{сек}}$  для релятивистских нейтронов и дозы нейтронов с энергией менее 20 Мэв

Таблица III

Отношение эквивалентной дозы, зарегистрированной как сумма результатов для отдельных компонентов излучений и различных энергетических диапазонов нейтронов к эквивалентной дозе, измеренной рекомбинационным дозиметром  $D_{REM-2}$

Установки	:Номера : $D_{\gamma} + D_{\text{сб}} + D_{\gamma+3}^{**}$ : $D_{\text{ИФКН}} + D_{\gamma+3}$ : $D_{\text{ДН-А-1}} + D_{\gamma+3}$ :точек : : : :измерения : $D_{REM-2}$ : $D_{REM-2}$ : $D_{REM-2}$ :(рис. I, 2 : : : : : : :
Синхрофазотрон, $E_p = 10$ Гэв	1 $\frac{15+80+6,5}{111} = 0,90$ $\frac{14+430}{111} = 4,0$ $\frac{191+6}{111} = 1,8$
	2 $\frac{1,2+13+2}{21} = 0,8$ $\frac{2,4+50}{21} = 2,4$ $\frac{22+2}{21} = 1,15$
Синхроциклотрон, $E_p = 660$ Мэв	1 $\frac{28+6,2+2,2}{20,4} = 1,8$ $\frac{2,4+270}{20,4} = 13,3$ $\frac{53+2,2}{20,4} = 2,7$
	2 $\frac{0+3,8+1,4}{4,2} = 1,2$ $\frac{2,2+1,0}{4,2} = 0,7$ $\frac{2,5+1,4}{4,2} = 0,9$
	3 $\frac{104+27+11}{64} = 2,2$ $\frac{9,1+1850}{64} = 29$ $\frac{140+10,8}{64} = 2,3$

$$*) D = \int_{10^{-8}}^{10^{+6}} \frac{dN}{dE} dE$$

, где  $k$  — коэффициент перехода от плотности потока моноэнергетических нейтронов, падающих на фантом, к эквивалентной дозе в максимуме глубинного распределения эквивалентной дозы для спектра нейтронов  $\frac{dN}{dE}$ , измеренного в данной точке /10/

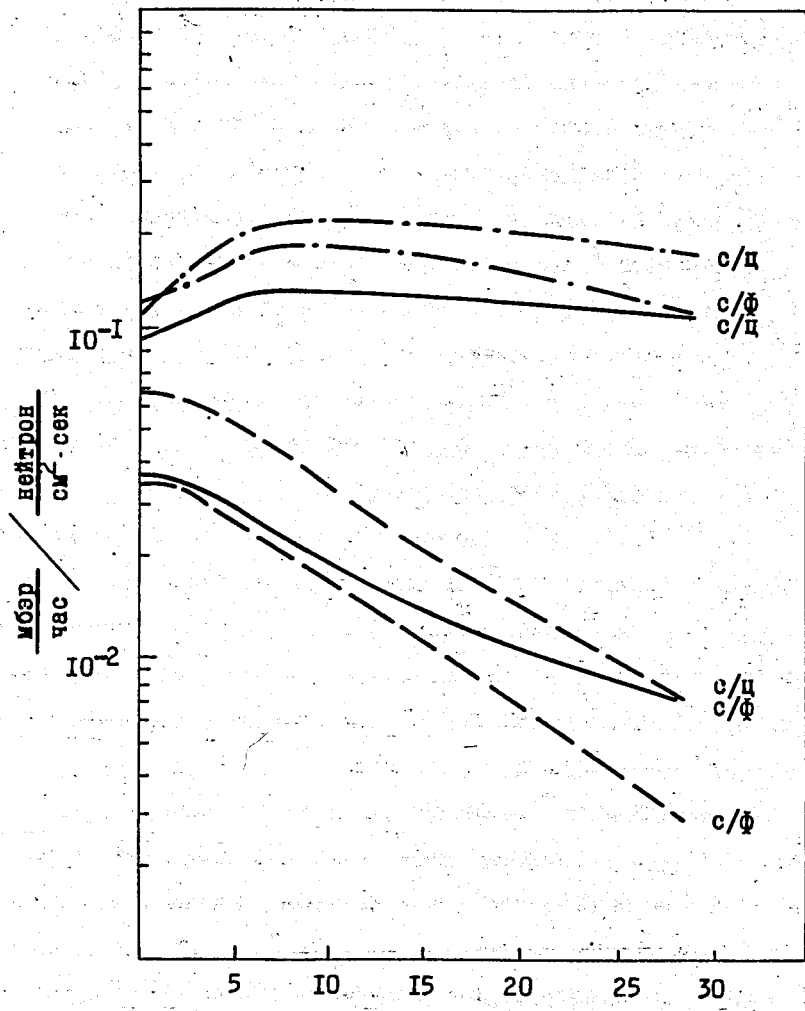
жж)  $D_{\gamma+3}$

— зарегистрированная доза гамма-излучения и заряженных частиц.

выбирались в максимумах глубинного распределения для каждой точки измерения. В числителе и знаменателе дробей, приведенных в таблице, указаны величины эквивалентных доз, измеренные приборами, которые отмечены соответственно в верхней строке каждой колонки. Приведенные в таблице данные показывают, что отношение эквивалентных доз, регистрируемых различными приборами, изменяется в несколько раз при изменении "жесткости" спектра нейтронов. Наибольшие изменения отмечаются для метода ИФК; здесь можно видеть, что полная доза излучений, зарегистрированная ИФК, может превышать наиболее вероятную дозу в десятки раз. Это обесценивает метод индивидуального фотоконтроля в полях, где вклад в эквивалентную дозу релятивистских нейтронов превышает 10%. К счастью, такая ситуация не характерна для большинства зон работы сотрудников ОИЯИ. В отсутствие релятивистских частиц тяжелее электронов, полная доза излучения, зарегистрированная ИФКН, может быть на несколько десятков процентов ниже наиболее вероятной, при условии, что кассета ИФК находится на поверхности фантома или тела человека.

Следует отметить приемлемую возможность оценивать радиационную обстановку с помощью стандартных приборов ДН-А1 и воздушной ионизационной камеры с алюминиевыми стенками. Эти приборы доступны, а измерения, выполняемые с их помощью, оперативны. Как видно из таблицы, такой способ дает результаты, отличающиеся не более чем в два раза от средних значений, получаемых наиболее достоверными методами из сравниваемых.

Не вполне ясна сравнительно большая разница результатов измерения эквивалентной дозы, установленной наиболее достоверными методами (колонка 3 таблица 3). Эта разница выходит



Глубина в ткани, см

—————  $E > 10^{-2}$  эв

- - - - -  $E > 20$  Мэв

- - - - -  $E < 20$  Мэв

Рис.3. Глубинное распределение эквивалентной дозы нейтронов.

за пределы ошибок измерения и интерпретации результатов, основными из которых являются погрешности: градуировки, определения глубинного распределения эквивалентной дозы, показаний приборов из-за их нестабильности во времени, определения просчетов, статистические, мониторингования. Суммарная среднеквадратичная ошибка оценивается примерно  $\pm 30\%$ . В этой связи следует остановиться на методической неточности сравнения двух наших наиболее достоверных методов. Неточность сравнения заключается в том, что сравниваемые эквивалентные дозы относятся к различной глубине в ткани. Действительно, доза, измеряемая рекомбинационным дозиметром, относится к глубине  $2 \text{ г/см}^2$  ткани, а доза, устанавливаемая по сумме показаний различных приборов, есть сумма эквивалентной дозы нейтронов в максимуме глубинного распределения и поглощенной дозы  $\gamma$ -излучения и заряженных частиц в воздухе. Для того, чтобы точно установить степень расхождения показаний, обусловленных этим фактом, необходимо знать глубинное распределение суммарной эквивалентной дозы. Однако оценки эквивалентной дозы гамма-излучения и заряженных частиц, выполненные на основании измерения поглощенной дозы ионизационной камерой с графитовыми стенками, наполненной  $\text{CO}_2$ , и измерения фактора качества рекомбинационным дозиметром, показали, что изменения эквивалентной дозы всех компонентов излучения от поверхности фантома до глубины, соответствующей максимуму эквивалентной дозы нейтронов, не превышает 40% от поверхностной дозы. Таким образом, наблюдающееся расхождение результатов, которые получены двумя наиболее достоверными и имеющимися в нашем распоряжении методами, вряд ли можно объяснить неодинаковыми условиями сравнения и отмеченными

погрешностями измерения. Вероятно, сказывается также некоторое занижение эквивалентной дозы рекомбинационным дозиметром в области больших линейных потерь энергии заряженными частицами<sup>/15/</sup> и влияние алюминиевой стенки камеры REM -2 в полях релятивистских нейтронов.

### Заключение

Широко используемые для оперативного контроля радиационной обстановки за защитой ускорителей и, в частности, за защитой ускорителей протонов Объединенного института ядерных исследований приборы воспроизводят эквивалентную дозу нейтронов и суммарную эквивалентную дозу излучения с точностью коэффициента 2. Как правило, это приводит к переоценке наиболее вероятной величины. В пределах указанной степени достоверности, когда она допустима, целесообразно в оперативных измерениях использовать стандартный прибор ДН-А1 и ионизационную камеру с воздушным наполнением для оценки радиационной обстановки за защитой ускорителей, учитывая при этом снижение верхнего предела измерения, обусловленного импульсной структурой поля излучения. При необходимости более точных измерений следует пользоваться методами, позволяющими устанавливать глубинное распределение эквивалентной дозы.

Коэффициент перехода от плотности потока релятивистских нейтронов к мощности эквивалентной дозы за защитой ускорителей ОИЯИ не превышает  $0,21 \frac{\text{мБэр/нейтрон}}{\text{час см}^2\text{сек}}$ .

Завышение показаний индивидуального дозиметра нейтронов более чем в 2 раза происходит в таких полях излучений, в которых вклад релятивистских нейтронов в суммарную дозу излучения превышает 10%.



Авторы признательны М.Зельчинскому за полезные дискуссии и помощь при измерениях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. BRAMBLETT R.L. et.al. " A new type of neutron spectrometer"  
Nucl.Instr.and Meth. 9,I, 1960.
2. Алейников В.Е. и др. Использование детектора медленных нейтронов с шаровыми полэмтилевыми замедлителями в дозиметрии нейтронов. Препринт ОИЯИ Р16-4480, Дубна 1969.
3. Золин Л.Г. Применение борного счетчика с  $\text{CH}_2$  -замедлителем в нейтронной дозиметрии, публикация ОИЯИ 2252, Дубна, 1965.
4. Голованов Н.А. и др. Измерение мощности дозы нейтронного излучения широкого энергетического диапазона. Труды СНИИП вып.1, стр.36, Атомиздат 1964.
5. Radiation protection instrumentation and its application,  
ICRP report 20,ICRP, Washington,1971.
6. Зельчинский М., Карновецкий К. Neutron Monitoring  
p.125,IAEA,Vienna 1967.  
Рекомбинационная камера REM-2. "Техническое описание и инструкция обслуживания "Объединение "Полон", Выдгощ, 1970.
7. Л.С.Золин, В.Н.Лебедев, М.И.Салацкая. Атомная энергия  
т.13, № 5, 467 (1962).
8. М.Г.Гелев, М.М.Комочков, И.Т.Мипев, М.И.Салацкая. Препринт ОИЯИ 16-6243 Дубна 1972.
9. В.Ф.Козлов, Г.Н.Шипкин. Радиационная безопасность ядерных критических сборок, Атомиздат Москва 1969.
10. Алейников В.Е. и др. Спектры нейтронов за защитой ускорителей протонов. Препринт ОИЯИ Р16-6791, Дубна, 1972.
11. ALSMILLER R.I. et.al. Nucl.Sci.Eng. 36,251 (1969)
12. Боннети А. и др. Ядерные эмульсии, Физматгиз, 1961.

13. SNYDER W.S. Radiation dosimetry. Proceedings of the international summer school on radiation protection - Cavtat 21-30 sept. 1970 v. I; p. 160, Beograd, 1971
14. ALSMILLER R.I. et.al. Nucl. Science and Engin 42 (1970) 367.
15. A.H. Sullivan. "The Estimation of the Distribution of Energy Loss of Ionizing Radiation from Observations of the Initial Recombination of the Ions in a Gas." CERN 69-1, Health Phys. Group, Geneva 1969.

Рукопись поступила в издательский отдел  
13 ноября 1972 года.