

Дозиметрия γ -нейтронного излучения сцинтилляционным спектрометром

В. П. КОВАЛЕВ, С. П. КАПЧИГАШЕВ, Л. П. ПАВЛОВ

УДК 539.12.08

В настоящей работе рассматривается возможность применения сцинтилляционного спектрометра с кристаллом стильбена в качестве дозиметра для дозиметрии смешанного γ -нейтронного излучения. Использование известного принципа разделения импульсов по их форме позволяет с помощью такой методики отдельно определить дозу от нейтронов и γ -излучения.

Дозиметрия γ -излучения. Если $\frac{dN}{dE_e}(E_e)$ — дифференциальный спектр электронов, образованных в сцинтилляторе, то доза, выделенная γ -квантами произвольного спектра в ткани, может быть вычислена по формуле

$$D = A Q(E_\gamma) K [D'_e + D''_e], \quad (1)$$

где A — градуировочный коэффициент; K — переходный коэффициент от поглощенной энергии к дозе, рад; $Q(E_\gamma)$ — переходный коэффициент от дозы, измеренной в сцинтилляторе,

к дозе в ткани; $D'_e = \int_{E_{e \text{ пор}}}^{E_{e \text{ макс}}} \frac{dN}{dE_e}(E_e) E_e dE_e$; $D''_e =$

$= \int_0^{E_{e \text{ пор}}} \frac{dN}{dE_e}(E_e) E_e dE_e$. Величина D''_e опреде-

ляет дозу от электронов с энергиями ниже порога разделения нейтронной и γ -компонент и непосредственно не измеряется. Доля этой дозы зависит как от спектра γ -излучения, так и от величины порога ($E_{e \text{ пор}}$). В общем случае эта величина и определяет неточность измерения дозы от γ -квантов в смешанных полях.

Однако экспериментальные исследования показали, что вблизи порога разделения ($\gamma - n$)-компонент аппаратный спектр электронов в кристалле стильбена с достаточной степенью точности можно описать функцией $\frac{dN}{dE_e}(E_e) = C e^{-\alpha E_e}$. Исследования проводились для диапазона энергий γ -квантов 0,2—4,5 Мэв. При этом изменяется только показатель экспоненты α .

Таким образом, вклад D''_e в общую дозу может быть определен экстраполяцией зависимости $\frac{dN}{dE_e}(E_e)$ из области энергий электронов выше порога в неизмеряемую область энергий ($E_e < E_{e \text{ пор}}$). Аналогичный метод оценки D''_e использовался в работе [1] при исследовании

дозы γ -излучения из различных мишеней, бомбардируемых α -частицами с начальной энергией 42 Мэв. Расчеты показали, что переходный коэффициент $Q(E_\gamma)$, учитывающий нетканеэквивалентность кристалла стильбена в диапазоне энергий γ -квантов от 0,1 до 20 Мэв, отличается от единицы не более чем на 1—3%.

Дозиметрия нейтронов. При взаимодействии с органическими сцинтилляторами энергия быстрых нейтронов преобразуется в энергию заряженных частиц главным образом за счет ($n - p$)-рассеяния на ядрах водорода, а также за счет упругого рассеяния и ядерных реакций типа (n, α) на ядрах углерода. Однако при упругом рассеянии ядро углерода приобретает незначительную энергию и эффективность преобразования этой энергии в световую существенно меньше, чем для протонов отдачи. Сечение же реакции $C^{12}(n, \alpha)B^9$ на несколько порядков меньше сечения рассеяния на водороде.

Таким образом, только ($n - p$)-рассеяние на ядрах водорода дает вклад в измеряемую дозу при нейтронной дозиметрии с помощью кристалла стильбена.

Если $\frac{dN}{dE_p}(E_p)$ — дифференциальный спектр протонов отдачи, то доза, выделенная в ткани нейтронами произвольного спектра (аналогично предыдущему), может быть вычислена по формуле

$$D = A Q(E_n) K [D'_p + D_p]. \quad (2)$$

В общем случае переходный коэффициент $Q(E_n)$ зависит от энергии нейтронов и определяется следующим образом:

$$Q(E_n) = \frac{\sum_i K_i(E_n) f_i}{K_H(E_n) f_H}, \quad (3)$$

где f_i — процентное содержание по весу i -го элемента в ткани; $K_i(E_n)$ — энергия, переданная i -му элементу (керма) нейтронами с энергией E_n в результате всевозможных ядерных реакций; f_H и $K_H(E_n)$ — соответственно процентное содержание водорода в стильбене и энергия, переданная ядру водорода нейтронами с энергией E_n .

Проведены расчеты коэффициента $Q(E_n)$ для диапазона энергий нейтронов 0,2—14 Мэв на основе данных по керме для водорода, угле-

рода, азота и кислорода, представленных в работе [2].

Химический состав ткани принимался следующим (в вес. %): 10 Н, 12 С, 4 N, 73 O и других элементов 1 вес. %. Химическая формула кристалла стильбена $C_{14}H_{12}$, состав следующий: 6,7 вес. % Н, 93,3 вес. % С. Результаты расчета коэффициента $Q(E_n)$ в зависимости от энергии нейтронов представлены на рис. 1. Пики в районе 0,44 и 1 Мэв обусловлены резонансами ($n, n'\gamma$)-реакции на кислороде. Медленный подъем при энергиях нейтронов выше 10 Мэв объясняется уменьшением сечения ($n - p$)-рассеяния на ядрах водорода и одновременным увеличением сечения взаимодействия нейтронов с ядрами углерода, азота и главным образом кислорода. Несмотря на некоторые флюктуации, функция в диапазоне энергий до 10 Мэв изменяется от 1,6 до 1,8. Среднее значение коэффициента перехода для этого диапазона определяется как $\bar{Q}(E_n) = 1,7 \pm 0,1$, что может привести к неопределенности порядка 6% при переходе от измеренной к истинной дозе в ткани.

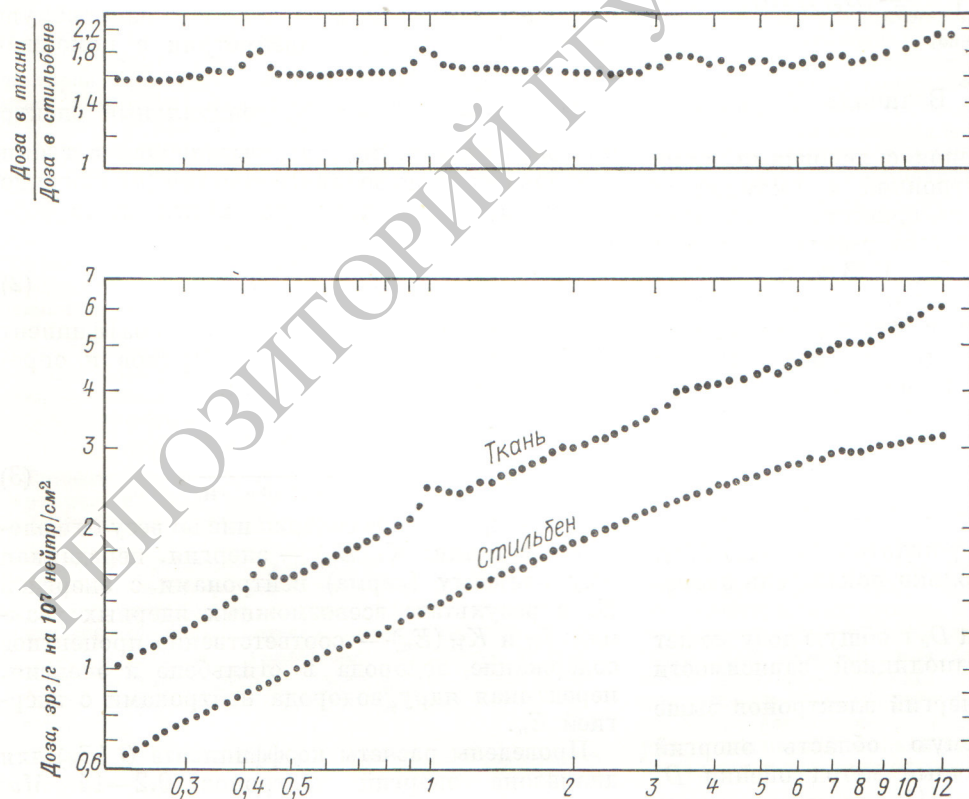
Если световой выход кристалла стильбена для электронов выше нескольких десятков кило-

электронвольт не зависит от энергии электронов и вследствие этого измеренное амплитудное распределение является спектром электронов, то для протонов световой выход существенно образом зависит от энергии и спектр протонов отдачи из аппаратного распределения dN/ds определяется следующим образом:

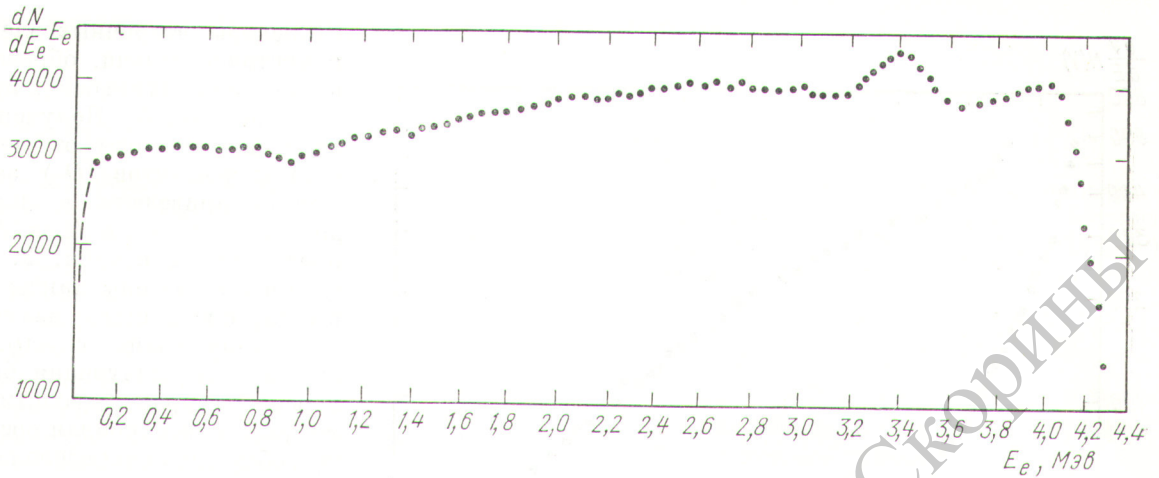
$$\frac{dN}{dE_p}(E_p) = \frac{dN}{ds} \frac{ds}{dE_p}(E_p).$$

В настоящей работе для определения спектра протонов отдачи используются данные о световых выходах ds/dE_p , представленные в работе [3]. Следует отметить, что точность измерения нейтронной дозы несколько хуже, чем точность измерения дозы γ -излучения, и определяется главным образом порогом дискриминации импульсов от γ -квантов.

Дозовые характеристики (Pu — Be)-источника. Для иллюстрации возможности изложенной выше методики дозиметрии проведены исследования отношения доз от нейтронов и γ -квантов из (Pu — Be)-источника. Измерения проведены на спектрометре нейтронов с кристаллом стильбена размером 30×30 мм и фотоумножителем ФЭУ-13. Спектрометрический порог по электро-



Р и с. 1. Зависимость выделенной дозы от энергии быстрых нейтронов для ткани и стильбена.



Р и с. 2. Зависимость интенсивности от энергии электронов $(\frac{dN}{dE_e} E_e)$.

нам составлял 0,1 Мэв при коэффициенте подавления нейтронного или γ -излучения, равном $\sim 10^3$.

На рис. 2 и 3 представлены графики зависимости интенсивности $\frac{dN}{dE} E$ от энергии для электронов и протонов отдачи от (Pu — Be)-источника с выходом $4,6 \cdot 10^5$ нейтр/сек. Полученные по этим данным отношения нейтронной дозы к дозе γ -излучения представлены в табл. 1. В этой таблице приведены также результаты расчетов отношения доз, проведенных на основе исследований в работе [4] выхода γ -квантов на один нейтрон для (Pu — Be)-источника и данных работ [5, 6].

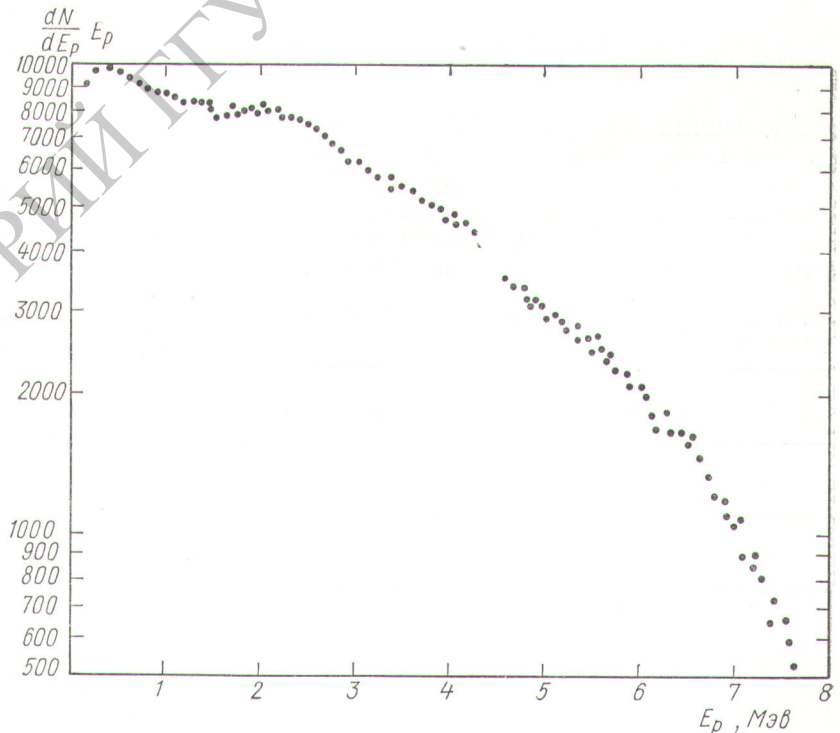
Наблюдается удовлетворительное согласие полученных в настоящей работе отношений доз D_n/D_γ с результатами расчетов. Одновременно наблюдается существенное расхождение полученных результатов по величине D_n/D_γ с данными, представленными в работе [7].

Исследование источника смешанного излучения на базе ЛУЭ-25. Были проведены исследования на линейном ускорителе электронов типа ЛУЭ-25. В качестве экрана использовали слой железа толщиной 50 см,

Отношения доз для нейтронов и γ -квантов

Таблица 1

Источник	Настоящая работа	Работы			
		[7]	[6]	[5]	[6]
Pu — Be	$1,7 \pm 0,2$	0,07	2,5	—	—
Po — Be	—	2,5	—	1,84	2,5



Р и с. 3. Зависимость интенсивности от энергии протонов отдачи $(\frac{dN}{dE_p} E_p)$.

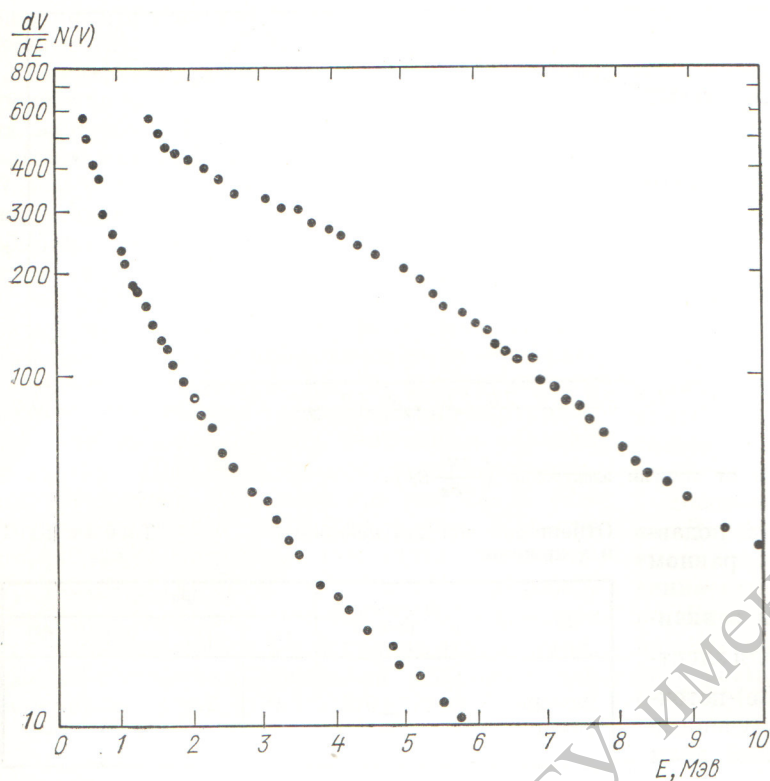


Рис. 4. Спектры вторичных электронов и протонов отдачи, образованных смешанным излучением.

расположенный под углом 120° к направлению движения пучка электронов. Расстояние от вольфрамовой мишени (диск диаметром 40 мм и толщиной 8 мм) до передней стенки экрана составляло 700 см. Сцинтилляционный дозиметр располагали сразу за экраном.

Дозы и отношения доз для нейтронной Таблица 2 и γ -компонент поля излучения

Толщина слоя, см	$D_n, \frac{\text{рад}}{\text{ч} \cdot \text{мкка}}$	$D_\gamma, \frac{\text{рад}}{\text{ч} \cdot \text{мкка}}$	D_n/D_γ
0	11,4	3800	$3 \cdot 10^{-3}$
50	$0,38 \pm 0,04$	$0,18 \pm 0,01$	$2,1 \pm 0,2$

Спектры вторичных электронов и протонов отдачи, образованных в кристалле стильбена, представлены на рис. 4. Полученные по этим данным дозы от нейтронов (D_n) и γ -квантов (D_γ) за слоем железа приведены к значениям доз на расстоянии $R = 50$ см и представлены в табл. 2. В этой таблице приведены также величины доз смешанного излучения в отсутствие экрана ($x = 0$). В этом случае доза γ -излучения была измерена ферросульфатным дозиметром, а нейтронная составляющая общей дозы определена расчетным путем на основе известного интегрального выхода нейтронов. Из результатов исследований следует, что использование экрана из железа толщиной 50 см приводит к увеличению отношения D_n/D_γ в поле смешанного излучения из мишени линейного ускорителя электронов примерно в 10^3 раз.

Авторы выражают благодарность Н. В. Родионову за помощь в создании сцинтилляционного спектрометра нейтронов.

Поступила в Редакцию 7/VI 1971 г.

ЛИТЕРАТУРА

- С. С. Омаров и др. «Атомная энергия», 26, 390 (1969).
- R. Vach, R. Caswell. Rad. Res., 35, 1 (1968).
- Ю. А. Казанский и др. «Атомная энергия», 20, 143 (1966).
- D. Drake et al. Nucl. Instrum. and Methods, 62, 349 (1968).
- Н. А. Бак, Н. С. Шиманская. Нейтронные источники. М., Атомиздат, 1969.
- А. Т. Баков и др. Neutron monitoring, Vienna, IAEA, 1967, p. 201.
- Г. М. Фрадкин. Изотопные источники нейтронов. М., Госатомиздат, 1963.