

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ $^{10}\text{B}$ -СЧЕТЧИКА В ЗАМЕДЛИТЕЛЕ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ АМБИЕНТНОГО ЭКВИВАЛЕНТА ДОЗЫ НЕЙТРОНОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ В ОИЯИ

*В. Е. Алейников, Л. Г. Бескровная, Ю. В. Мокров*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Представлены результаты исследований возможности использования прибора на основе  $^{10}\text{B}$ -счетчика нейтронов (СНМ-14) в полиэтиленовом замедлителе в качестве дозиметра амбиентного эквивалента дозы нейтронов  $H^*(10)$  в полях излучения ядерно-физических установок ОИЯИ. Показано, что прибор может использоваться в качестве дозиметра этой величины в диапазоне энергий нейтронов от 0,4 эВ до 20 МэВ с погрешностью, не превышающей 30 %, из-за отличия энергетической зависимости его показаний от энергетической зависимости амбиентного эквивалента дозы нейтронов. Использование поправочных коэффициентов позволяет расширить энергетический диапазон измерения дозы нейтронов  $H^*(10)$  до сотен МэВ. Погрешность из-за анизотропии чувствительности прибора не превышает 35 %.

The possibility to use the instrument based on the  $^{10}\text{B}$ -counter (СНМ-14) with polyethylene moderator as a dosimeter of the neutron ambient dose equivalent  $H^*(10)$  in the field of nuclear installations of JINR was investigated. It was shown that the instrument can be used to measure  $H^*(10)$  of neutrons in the energy range from 0.4 eV to 20 MeV with the uncertainty within 30% due to the dependence of response on neutron energy. The use of the correction factors can extend the energy range of measurement of the neutron dose  $H^*(10)$  up to hundreds of MeV. The uncertainty due to angular dependence of the instrument response is not more than 35%.

PACS: 87.52.-g

### ВВЕДЕНИЕ

В 1999 г. в Российской Федерации были введены новые нормы радиационной безопасности НРБ-99 [1], в которых в качестве нормируемой величины при установлении основных пределов дозы используется эффективная доза [2]. Эффективная доза непосредственно не может быть измерена и является в основном расчетной величиной. Поэтому для ее оценки используются операционные величины, которые находятся по результатам измерений и являются, как правило, консервативными оценками этой дозы. Одной из таких операционных величин для измерения полей сильно проникающего излучения при проведении радиационного контроля является амбиентный эквивалент дозы (амбиентная доза)  $H^*(d)$ , рекомендованный [3] вместо используемого ранее для этих целей максимального эквивалента дозы (МЭД).

Амбиентный эквивалент дозы определяется в фантоме (простейшая модель торса человеческого тела), известном как шаровой фантом МКРЕ. Амбиентный эквивалент дозы  $H^*(d)$  в точке поля излучения — это эквивалент дозы, который был бы образован соответствующим расширенным и спрямленным полем в шаровом фантоме МКРЕ на глубине  $d$  по радиусу, противоположному направлению спрямленного поля. Под расширенным полем понимается такое поле излучения, в котором спектральное и угловое распределение флюенса одинаково во всех точках достаточно большого объема и такое же, как и в реальном поле в точке, представляющей интерес. В расширенном и спрямленном поле флюенс и энергетическое распределение частиц такое же, как и в расширенном поле, но все частицы движутся в одном направлении. При любом упоминании термина амбиентный эквивалент дозы следует указывать стандартное значение глубины  $d$ . При измерении в полях сильно проникающих излучений (нейтроны и гамма-излучение) рекомендованная глубина 10 мм. Для измерения  $H^*(10)$  необходимо, чтобы поле излучения было однородным в месте расположения чувствительного объема детектора, прибор обладал изотропной чувствительностью [3], а его энергетическая зависимость чувствительности (ЭЗЧ) была бы подобна зависимости амбиентного эквивалента дозы на единичный флюенс от энергии регистрируемых частиц [4, 5]. Как следует из сказанного, амбиентный эквивалент дозы не зависит от углового распределения излучения и является аддитивной величиной в отличие от МЭД.

## 1. ДОЗИМЕТР АМБИЕНТНОГО ЭКВИВАЛЕНТА ДОЗЫ НЕЙТРОНОВ И МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

При работе ядерно-физических установок (ЯФУ) ОИЯИ значительный вклад в дозу облучения персонала за защитой этих установок вносят нейтроны, имеющие энергию в диапазоне от тепловой энергии до нескольких сотен мегаэлектронвольт. В дозиметрии нейтронов широкое применение находят приборы, в которых используются  $1/v$ -детекторы нейтронов, помещенные в водородсодержащие замедлители различных размеров и конфигурации. При этом для улучшения ЭЗЧ таких приборов внутри замедлителя размещается слой поглотителя тепловых нейтронов, как правило, из борсодержащего материала или из кадмия. В ОИЯИ в радиационном контроле в качестве дозиметра нейтронов широко используется основанный на этом принципе прибор, датчик (детектор) которого состоит из  $^{10}\text{B}$ -счетчика (борный счетчик СНМ-14), расположенного в комбинированном полиэтиленовом замедлителе (далее — СНМ-14 в комбинированном замедлителе). Конструкция замедлителя со счетчиком СНМ-14 показана на рис. 1 [6]. Замедлитель датчика состоит из двух разъемных частей цилиндрического полиэтиленового блока с верхней полусферой, разделенных прослойкой из кадмия толщиной 1 мм. По оси замедлителя располагается борный счетчик СНМ-14 для регистрации замедлившихся нейтронов. Импульсы напряжения с выхода электронной схемы счетчика либо регистрируются пересчетным прибором, либо поступают на дальнейшую обработку в соответствующие электронные устройства автоматизированных систем радиационного контроля, в составе которых, как правило, используется данный прибор.

Одной из основных характеристик прибора, определяющей возможность использования его в качестве дозиметра нейтронов, является ЭЗЧ. У дозиметра, предназначенного для измерения той или иной дозы нейтронов (максимальной эквивалентной, амбиентной

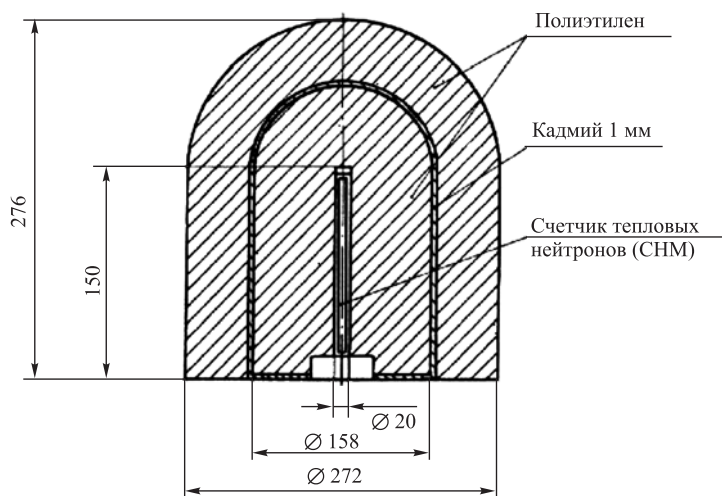


Рис. 1. Борный счетчик нейтронов СНМ-14 в комбинированном замедлителе

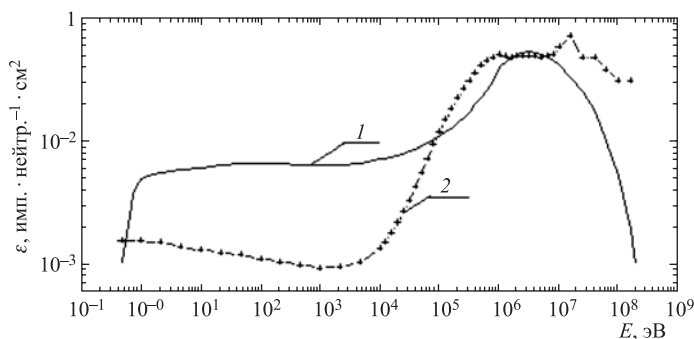


Рис. 2. Энергетическая зависимость чувствительности: 1 — счетчика СНМ-14 в замедлителе; 2 — идеального дозиметра

дозы и др.), его ЭЗЧ должна быть подобна энергетической зависимости данной дозы на единичный флюенс, называемой также удельной дозой, от энергии нейтронов [4]. На рис. 2 сплошной линией показана ЭЗЧ счетчика СНМ-14 в комбинированном замедлителе  $\varepsilon(E)$  в  $\text{имп.} \cdot \text{нейтр.}^{-1} \cdot \text{см}^2$  при перпендикулярном падении нейтронов на боковую поверхность замедлителя [7].

На рис. 2 крестиками показана зависимость ЭЗЧ гипотетического (идеального) дозиметра  $\varepsilon'(E)$ , которая подобна энергетической зависимости удельного AMBIENTНОГО эквивалента дозы и которая для Pu-Be-источника нейтронов равна чувствительности СНМ-14 в комбинированном замедлителе. Зависимость  $\varepsilon'(E)$  определялась по формуле

$$\varepsilon'(E) = \frac{\varepsilon_{\text{Pu-Be}} h^*(10, E)}{h_{\text{Pu-Be}}^*},$$

где  $h^*(10, E)$  — зависимость удельного AMBIENTНОГО эквивалента дозы от энергии,  $\text{Зв} \cdot \text{см}^2$  [4];  $\varepsilon_{\text{Pu-Be}}$  — чувствительность СНМ-14 в комбинированном замедлителе для

$\text{Pu-Be}$ -источника,  $\text{имп.} \cdot \text{нейтр.}^{-1} \cdot \text{см}^2$ ;  $h_{\text{Pu-Be}}^*$  — удельный амбиентный эквивалент дозы нейтронов для  $\text{Pu-Be}$ -источника, равный  $3,8 \cdot 10^{-10} \text{ Зв} \cdot \text{см}^2$ .

Как следует из данных рис. 2, при некоторых энергиях нейтронов различия в значениях чувствительности реального и идеального дозиметров достигают нескольких раз. В связи с этим возникает вопрос о возможности использования рассмотренного выше прибора для измерения амбиентного эквивалента дозы нейтронов и о возникающих при этом погрешностях, обусловленных отличием его ЭЗЧ от энергетической зависимости удельного амбиентного эквивалента дозы. За защитой ядерно-физических установок поля нейтронов имеют различные энергетические спектры с энергией нейтронов от тепловой до сотен МэВ. Отличие показаний исследуемого дозиметра в полях с различными спектрами нейтронов от значения амбиентного эквивалента дозы  $H^*(10)$  в этих полях будет зависеть от спектра нейтронов в месте измерений. Чтобы получить численные значения этого отличия для различных спектров нейтронов расчетным путем, были определены и сравнивались между собой две величины:

- амбиентный эквивалент дозы, который зарегистрировал бы рассматриваемый дозиметр нейтронов с чувствительностью  $\varepsilon(E)$  в поле со спектром нейтронов  $\Phi(E) - H_m^*(10)$ ;
- действительные значения амбиентного эквивалента дозы для этого спектра —  $H_r^*(10)$ .

Значения  $H_m^*(10)$  рассчитывались по формуле

$$H_m^*(10) = \frac{h_{\text{Pu-Be}}^*}{\varepsilon_{\text{Pu-Be}}} \int_{E_1}^{E_2} \varepsilon(E) \Phi(E) dE,$$

где  $E_1$  и  $E_2$  — границы энергетического диапазона спектра нейтронов;  $\Phi(E)$  — спектр нейтронов с энергией  $E$ ,  $\text{нейтр.}/(\text{МэВ} \cdot \text{см}^2)$ .

Действительные значения амбиентного эквивалента дозы рассчитывались по формуле

$$H_r^*(10) = \int_{E_1}^{E_2} h^*(10, E) \Phi(E) dE.$$

Сравнение величин  $H_m^*(10)$  и  $H_r^*(10)$  проведено путем расчета и анализа коэффициентов  $K1$  и  $K2$ , представляющих собой их отношения.

Коэффициент  $K1$  определяется по формуле

$$K1 = \frac{H_r^*(10)}{H_m^*(10)} = \frac{\int_{0,4 \text{ эВ}}^{20 \text{ МэВ}} h^*(10, E) \Phi(E) dE}{\frac{h_{\text{Pu-Be}}^*}{\varepsilon_{\text{Pu-Be}}} \int_{0,4 \text{ эВ}}^{20 \text{ МэВ}} \varepsilon(E) \Phi(E) dE}.$$

Коэффициент  $K1$  фактически является поправочным коэффициентом, на который нужно умножить показания прибора, чтобы получить действительное значение амбиентного эквивалента дозы в диапазоне от 0,4 эВ до 20 МэВ при измерениях в поле нейтронов с данным спектром  $\Phi(E)$ . Если поправочный коэффициент не использовать, то разброс значений этого коэффициента характеризует дополнительную погрешность, с которой

данный прибор измеряет амбиентный эквивалент дозы в диапазоне энергий от 0,4 эВ до 20 МэВ.

Коэффициент  $K_2$  рассчитан по формуле

$$K_2 = \frac{H_r^*(10)}{H_m^*(10)} = \frac{\int_{0,01 \text{ эВ}}^{E_{\max}} h^*(10, E) \Phi(E) dE}{\frac{h_{\text{Pu-Be}}^*}{\varepsilon_{\text{Pu-Be}}} \int_{0,4 \text{ эВ}}^{150 \text{ МэВ}} \varepsilon(E) \Phi(E) dE},$$

где  $E_{\max}$  — максимальная энергия спектра нейтронов.

Значение  $H_r^*(10)$  для коэффициента  $K_2$  рассчитывалось при энергиях  $E_1 = 0,01$  эВ и  $E_2$ , равной максимальной энергии спектра. При расчете  $H_m^*(10)$  верхний предел интегрирования в данной работе составлял 150 МэВ. Коэффициент  $K_2$  характеризует прибор как дозиметр амбиентного эквивалента дозы нейтронов во всем диапазоне энергий данного спектра и может использоваться для приближенной оценки дозы всего энергетического диапазона нейтронов на ускорителях заряженных частиц, где возможен вклад в дозу от нейтронов с энергией выше 20 МэВ.

При расчете величин  $H_r^*(10)$  и  $H_m^*(10)$  использовались 24 спектра нейтронов на различных ядерно-физических установках ОИЯИ, которые ранее были получены авторами или взяты из литературы. Спектры отличаются энергетическим диапазоном и условиями формирования (материалом и геометрией защиты, за которыми они определялись, видом и энергией первичного излучения, местом измерения и др.). Все спектры в данной работе для определенности характеризуются средней энергией по флюенсу.

На рис. 3 в качестве примера приведены некоторые экспериментально измеренные спектры нейтронов на ядерно-физических установках ОИЯИ.

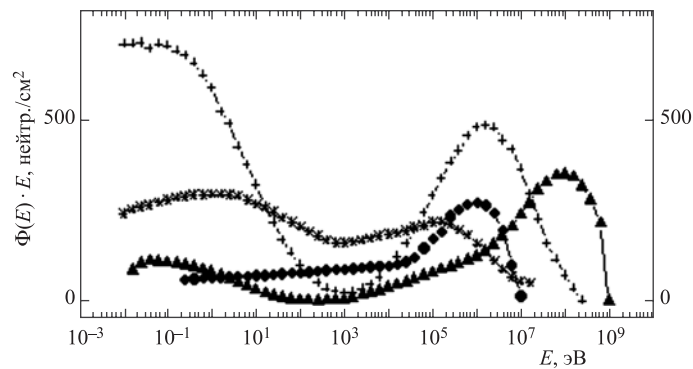


Рис. 3. Спектры нейтронов на ядерно-физических установках ОИЯИ: ▲ — спектр № 1 обв. [13, 15], синхроциклотрон; ◆ — спектр № 1 [10], импульсный быстрый реактор (ИБР-2); + — спектр № 1 [13, 15], синхрофазотрон; \* — спектр № 1 [8], циклотрон У-300

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Места измерения и номера спектров нейтронов для установок ОИЯИ приведены в таблице.

Результаты расчетов коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$  представлены в таблице в соответствии с возрастанием средней энергии спектров нейтронов  $E_{\text{ср}}$  на ЯФУ. В колонке 1 указаны установки, места измерений, номера спектров в цитируемых работах и основные условия формирования спектров (вид ускоряемых частиц, мишени, материал и конфигурация защиты и др.). В таблице также приводится значение средней энергии спектров нейтронов для различных установок и минимальная и максимальная энергии нейтронов в спектре.

Точки, места измерения спектров нейтронов и значения коэффициентов  $K_i$

Установки ОИЯИ	Средняя энергия нейтронов, $E_{\text{ср}}$ , эВ	Энергия нейтронов, $E_1 - E_2$ , эВ	Коэффициенты $K_i$	
			$K_1$	$K_2$
1	2	3	4	5
Ускоритель тяжелых ионов У-300				
Спектр № 3, (ионы $\text{C}^{12}$ , 10 МэВ/нукл.), экспериментальный зал [8]	$5,88 \cdot 10^4$	$1,00 \cdot 10^{-2} - 1,00 \cdot 10^7$	0,80	0,92
Спектр № 2, (ионы $\text{O}^{16}$ , 10 МэВ/нукл.), экспериментальный зал [8]	$2,45 \cdot 10^5$	$1,00 \cdot 10^{-2} - 3,90 \cdot 10^6$	1,10	1,15
Спектр № 1, (ионы $\text{N}^{15}$ , 10 МэВ/нукл.), экспериментальный зал [8]	$2,67 \cdot 10^5$	$1,00 \cdot 10^{-2} - 2,51 \cdot 10^6$	0,84	0,88
Среднее значение коэффициентов			0,91	0,98
Импульсные быстрые реакторы (ИБР)				
ИБР-30, спектр № 1, у защитной двери реактора [9]	$9,33 \cdot 10^4$	$1,00 \cdot 10^{-2} - 1,00 \cdot 10^7$	0,70	0,78
ИБР-30, спектр № 3, экспериментальный зал [9]	$2,10 \cdot 10^5$	$1,00 \cdot 10^{-2} - 1,00 \cdot 10^7$	0,93	1,03
ИБР-30, спектр № 5, экспериментальный зал [9]	$2,42 \cdot 10^5$	$1,00 \cdot 10^{-2} - 1,00 \cdot 10^7$	0,89	0,95
ИБР-2, спектр № 2, пучок № 2, 8 м от замедлителя [10]	$5,71 \cdot 10^5$	$6,31 \cdot 10^{-2} - 1,00 \cdot 10^7$	1,08	1,10
ИБР-2, спектр № 1, пучок № 2, на замедлителе [10]	$7,12 \cdot 10^5$	$2,51 \cdot 10^{-1} - 1,00 \cdot 10^7$	1,05	1,05
ИБР-30, спектр № 4, экспериментальный зал [9]	$7,86 \cdot 10^5$	$1,00 \cdot 10^{-2} - 1,00 \cdot 10^7$	1,08	1,10
ИБР-30, спектр № 2, за шибером канала № 6 [9]	$1,18 \cdot 10^6$	$1,00 \cdot 10^{-2} - 1,00 \cdot 10^7$	0,84	0,84
Среднее значение коэффициентов			0,94	0,98
Ускоритель протонов на энергию 660 МэВ — фазотрон (синхроциклотрон)				
Мягкое опорное поле нейтронов, спектр № 5, в лабиринте под ускорителем [11, 12]	$2,58 \cdot 10^5$	$4,64 \cdot 10^{-3} - 2,51 \cdot 10^8$	0,77	0,98

## Окончание таблицы

1	2	3	4	5
Спектр № 2п, у оконных проемов, за защитой ускорителя [13]	$3,28 \cdot 10^5$	$1,00 \cdot 10^{-2}$ – $1,58 \cdot 10^8$	0,69	0,74
Спектр № 6, за 4-метровой бетонно-чугунной защитой, экспериментальный зал № 4 [13]	$7,34 \cdot 10^6$	$1,00 \cdot 10^{-2}$ – $6,31 \cdot 10^8$	0,65	0,79
Жесткое опорное поле, спектр № 4, за 2-метровой бетонной защитой [11, 12]	$9,30 \cdot 10^6$	$4,64 \cdot 10^{-3}$ – $3,98 \cdot 10^8$	1,05	1,29
Спектр № 1 <sup>а</sup> обв., Ве-мишень, за 2-метровой бетонной защитой, энергия протонов $E_p = 350$ МэВ [13]	$2,78 \cdot 10^7$	$1,00 \cdot 10^{-2}$ – $3,98 \cdot 10^8$	1,29	1,77
Спектр № 2, толстая медная мишень, за 2-метровой бетонной защитой, экспериментальный зал [13, 14]	$3,68 \cdot 10^7$	$1,00 \cdot 10^{-2}$ – $6,31 \cdot 10^8$	1,10	1,68
Спектр № 1, толстая медная мишень, за 2-метровой бетонной защитой, экспериментальный зал [13, 14]	$6,00 \cdot 10^7$	$1,00 \cdot 10^{-2}$ – $6,31 \cdot 10^8$	1,35	2,48
Спектр № 1 обв., Ве-мишень, за 2-метровой бетонной защитой, $E_p = 660$ МэВ [13, 15]	$7,78 \cdot 10^7$	$1,00 \cdot 10^{-2}$ – $6,31 \cdot 10^8$	1,27	2,03
Среднее значение коэффициентов			1,02	1,47
Ускоритель на энергию 10 ГэВ по протонам — синхрофазотрон				
Спектр № 5, район вывода пучка [13, 16]	$1,12 \cdot 10^6$	$1,00 \cdot 10^{-2}$ – $1,00 \cdot 10^8$	1,05	1,11
Спектр № 3, район вывода пучка [13, 16]	$1,30 \cdot 10^6$	$1,00 \cdot 10^{-2}$ – $1,00 \cdot 10^8$	1,12	1,16
Спектр № 1, район линейного промежутка [13, 15]	$2,84 \cdot 10^6$	$1,00 \cdot 10^{-2}$ – $3,98 \cdot 10^8$	1,11	1,21
Спектр № 4, район вывода пучка [13, 16]	$3,15 \cdot 10^6$	$1,00 \cdot 10^{-2}$ – $3,98 \cdot 10^8$	1,05	1,11
Спектр № 2, район линейного промежутка [13, 15]	$7,53 \cdot 10^6$	$1,00 \cdot 10^{-2}$ – $1,00 \cdot 10^8$	1,22	1,26
Спектр № 6, район вывода пучка [13, 16]	$9,37 \cdot 10^6$	$2,51 \cdot 10^{-2}$ – $6,31 \cdot 10^8$	0,76	1,08
Среднее значение коэффициентов			1,05	1,16

Более подробно места измерения, условия измерения спектров нейтронов описаны в [17]. Анализ значений коэффициента  $K1$  показывает, что для большинства рассмотренных спектров (95 % из всего их количества) его среднее значение равно  $1,0 \pm 0,3$ . Это говорит о том, что данный прибор может использоваться в качестве измерителя амбиентного эквивалента дозы нейтронов для широкого класса спектров за защитой ЯФУ с дополнительной погрешностью, обусловленной его ЭЗЧ, не превышающей 30 %. Если известна средняя энергия спектра нейтронов в месте измерений и условия его формирования, то коэффициент  $K1$  может использоваться для более точного определения  $H^*(10)$  в соответствии с данными, приведенными в таблице.

Значения коэффициента  $K1$ , полученные для различных спектров нейтронов на установках ОИЯИ (см. таблицу), позволяют ввести поправку к показаниям дозиметра нейтронов на каждой установке и получить более точное значение дозы. Средние значения

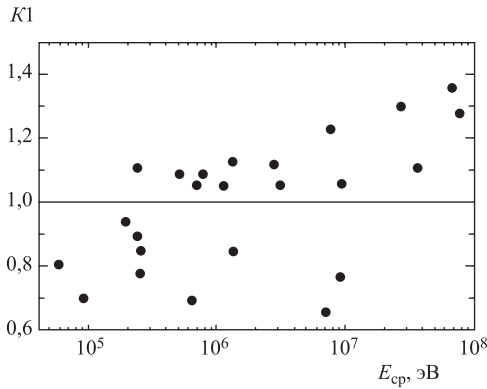


Рис. 4. Значение коэффициента  $K1$

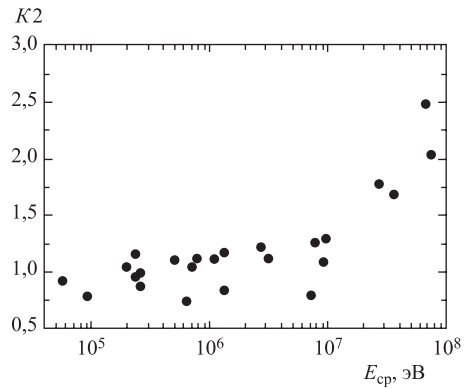


Рис. 5. Значение коэффициента  $K2$

коэффициента  $K1$  для ускорителя ЛЯР и реакторов ЛНФ 0,91 и 0,94 соответственно. Для фазотрона ЛЯП и для ускорителя ЛВЭ, за защитой которых средняя энергия спектров нейтронов значительно выше, эти коэффициенты близки к единице. Однако для мягких спектров за защитой этих ускорителей значения коэффициента  $K1$  равны 0,6–0,7.

На рис. 4 приведены значения коэффициента  $K1$  для спектров с различной средней энергией.

На рис. 5 и в таблице представлены значения коэффициента  $K2$  для различных спектров нейтронов. Коэффициент  $K2$ , как выше уже было сказано, характеризует возможность использования прибора как дозиметра для приближенной оценки амбиентного эквивалента дозы нейтронов во всем диапазоне энергий рассматриваемых спектров.

Как и следовало ожидать, значения  $K2$  для ускорителя ЛЯР и реакторов ЛНФ практически не отличаются от значений  $K1$ . Для ускорителей ЛЯП и ЛВЭ коэффициенты  $K2$  выше  $K1$ , их различие тем больше, чем больше средняя энергия спектра. Для жестких спектров за защитой фазотрона значения коэффициента  $K2$  могут достигать 2 и выше, что говорит о существенном вкладе в дозу нейтронов с энергией больше 20 МэВ. Для синхрофазотрона значения коэффициента  $K2$  меньше, чем для фазотрона, и они не превышают 1,26 для одного из самых жестких из измеренных спектров.

Выше рассмотрена возможность использования данного прибора в качестве дозиметра амбиентной дозы с точки зрения соответствия его ЭЗЧ энергетической зависимости удельного амбиентного эквивалента дозы и оценены возникающие при этом погрешности, обусловленные неполным подобием этих зависимостей. Однако прибор для измерения

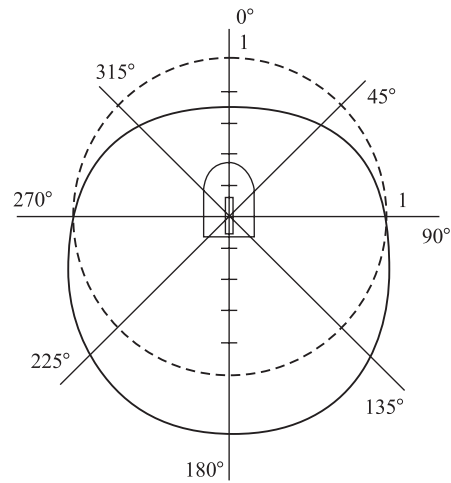


Рис. 6. Угловая зависимость показаний счетчика СММ-14 в замедлителе



$H^*(10)$  кроме удовлетворительной энергетической зависимости должен иметь, исходя из определения этой величины, изотропную чувствительность. Угловая зависимость показаний дозиметра нейтронов определена экспериментально для радионуклидного Pu-Be источника нейтронов на поверочной установке с использованием экранирующего конуса для учета вклада в показания прибора рассеянного излучения. Погрешность измерений не превышала 7%. Угловая зависимость показаний дозиметра нейтронов приведена сплошной линией на рис. 6. Пунктирной линией на этом рисунке показана изотропная угловая зависимость.

Максимальная погрешность, обусловленная анизотропией чувствительности прибора, составляет около 35% (максимальное отличие от единицы).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе показана возможность использования прибора на основе борного счетчика СНМ-14 в комбинированном замедлителе для измерения AMBIENTНОГО эквивалента дозы нейтронов  $H^*(10)$  для широкого класса спектров (24 спектра) за защитой ядерно-физических установок ОИЯИ. Рассчитаны с использованием энергетической зависимости чувствительности прибора и спектров нейтронов поправочные коэффициенты для нахождения с их помощью по показаниям приборов значений AMBIENTНОЙ дозы.

В качестве дозиметра AMBIENTНОЙ дозы нейтронов с энергией ниже 20 МэВ прибор может использоваться без введения поправочных коэффициентов, обусловленных его ЭЗЧ, с погрешностью, не превышающей 30%. С учетом анизотропии чувствительности прибора его максимально возможная суммарная погрешность может составлять 46%.

При известных средних энергиях спектра нейтронов и условиях его формирования использование поправочных коэффициентов позволяет определять  $H^*(10)$  с меньшей погрешностью.

Как дозиметр AMBIENTНОЙ дозы нейтронов в диапазоне энергий от  $10^{-8}$  до  $10^3$  МэВ прибор может использоваться с введением поправочных коэффициентов, находящихся в диапазоне от 0,9 до 2,5, в зависимости от жесткости (средней энергии) спектра. Несмотря на то, что некоторые установки, спектры нейтронов которых использовались в настоящей работе, уже не существуют или модернизированы, полученные результаты могут использоваться как для модернизированных установок (фазотрон, ИБР-2М), так и для новых установок (ускоритель нуклотрон, ускорители ЛЯР). Это обусловлено тем, что использованные спектры рассматривались в широком диапазоне от очень мягких до самых жестких, поэтому с достаточно большой вероятностью можно предположить, что и спектры нейтронов на модернизированных и новых установках также будут находиться в этом же диапазоне.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 2.6.1.758-99. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99): Гигиенические нормативы. М.: Центр санитарно-эпидемиологического нормирования, гигиенической сертификации и экспертизы Минздрава России, 1999. 116 с.
2. Радиационная безопасность. Рекомендации МКРЗ 1990. Ч.1, 2. М.: Энергоатомиздат, 1994.

3. Assessment of Occupational Exposure due to External Sources of Radiation. IAEA Safety Guide. Vienna: IAEA, 1999.
4. Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External Radiation. ICRU Report 57. Bethesda, 1998.
5. *Sannikov A. V., Savitskaya E. N.* Ambient Dose Equivalent Conversion Factors for High Energy Neutrons Based on the ICRP 60 Recommendations // Rad. Prot. Dosim. 1997. V. 70, No. 1–4. P. 383–386.
6. *Бучнев В. Н. и др.* Определение чувствительности СМ-14 с комбинированным замедлителем при энергии нейтронов 14,2 МэВ. Сообщ. ОИЯИ Р3-85-428. Дубна, 1985. 7 с.
7. *Бучнев В. Н., Комочков М. М., Мокров Ю. В.* Энергетические зависимости чувствительности и погрешности некоторых дозиметров нейтронов. Сообщ. ОИЯИ Р16-86-491. Дубна, 1986. 8 с.
8. *Комендантова Г. А. и др.* Исследование адекватности показаний индивидуальных фотоэмульсионных дозиметров эквивалентной дозе нейтронов вблизи ускорителей тяжелых ионов. Препринт ОИЯИ 16-12858. Дубна, 1979. 8 с.
9. *Архипов В. А. и др.* Исследование адекватности показаний фотоэмульсионных и сцинтилляционных детекторов эквивалентной дозе в полях рассеянного излучения ИБР-30. Сообщ. ОИЯИ 16-11817. Дубна, 1978. 11 с.
10. *Архипов В. А. и др.* Физический пуск реактора ИБР-2. Измерение спектра нейтронов утечки. Сообщ. ОИЯИ Р13-12466. Дубна, 1979. 16 с.
11. *Алейников В. Е. и др.* Опорные поля нейтронного излучения для метрологического обеспечения радиационного контроля. Препринт ОИЯИ Р16-92-36. Дубна, 1992. 12 с.
12. Compendium of Neutron Spectra and Detector Response for Radiation Protection Purpose. Technical Report Series No. 403. IAEA. Vienna, 2001. P. 163.
13. *Алейников В. Е.* Дис. . . . канд. физ.-мат. наук. Дубна: ОИЯИ, 1978.
14. *Алейников В. Е., Комочков М. М., Крючков В. П.* Экспериментальная проверка методов расчета защиты ускорителей протонов. Препринт ОИЯИ Р16-8179. Дубна, 1974. 11 с.
15. *Алейников В. Е., Гердт В. П., Комочков М. М.* Энергетические спектры нейтронов за защитой ускорителей протонов на высокие энергии. Препринт ОИЯИ Р16-8176. Дубна, 1974. 10 с.
16. *Алейников В. Е. и др.* Радиационная обстановка в районе канала медленного вывода протонов из синхрофазотрона на энергию 10 ГэВ. Сообщ. ОИЯИ 16-8583. Дубна, 1975. 15 с.
17. *Алейников В. Е., Бескровная Л. Г., Мокров Ю. В.* Исследование возможности измерения  $^{10}\text{B}$ -счетчиком нейтронов в комбинированном замедлителе амбиентной дозы нейтронов в полях излучения ядерно-физических установок ОИЯИ. Сообщ. ОИЯИ Р16-2008-46. Дубна, 2008. 17 с.

Получено 29 февраля 2008 г.