

P16-2008-46

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ  
<sup>10</sup>B-СЧЕТЧИКОМ НЕЙТРОНОВ  
В КОМБИНИРОВАННОМ ЗАМЕДЛИТЕЛЕ  
АМБИЕНТНОЙ ДОЗЫ НЕЙТРОНОВ  
В ПОЛЯХ ИЗЛУЧЕНИЯ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ  
УСТАНОВОК ОИЯИ

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

P16-2008-46

Исследование возможности измерения  $^{10}\text{B}$ -счетчиком нейтронов в комбинированном замедлителе амбиентной дозы нейтронов в полях излучения ядерно-физических установок ОИЯИ

Приводятся результаты исследований возможности измерения амбиентного эквивалента дозы нейтронов  $H^*(10)$  прибором на основе борного счетчика нейтронов СНМ-14 в полиэтиленовом замедлителе в полях излучения ядерно-физических установок ОИЯИ. Показано, что прибор может быть использован для измерения этой дозы нейтронов в диапазоне энергий нейтронов от 0,4 эВ до 20 МэВ с погрешностью, не превышающей 46 %, при проведении радиационного контроля в ОИЯИ. Использование поправочных коэффициентов позволяет расширить энергетический диапазон измерения дозы нейтронов  $H^*(10)$  до сотен мегаэлектронвольт. В работе также представлены спектры нейтронов, измеренные в разные годы на установках ОИЯИ, места и условия их измерения.

Работа выполнена в Лаборатории радиационной биологии ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2008

Aleynikov V. E., Beskrovnaia L. G., Mokrov Y. V.

P16-2008-46

The Research for the Neutron Ambient Dose Possibility of Measurement Using the Instrument Based on the  $^{10}\text{B}$ -Counter with Moderator in the Fields at JINR Nuclear-Physics Installation

The results of the research for the neutron ambient dose equivalent  $H^*(10)$  possibility of measurement using the instrument based on the  $^{10}\text{B}$ -counter (CHM-14) with polyethylene moderator in the fields of JINR nuclear-physics installation have been presented. 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 46% in radiation monitoring at JINR. The use of the correction factors can extend the energy range of the measurement of the neutron dose  $H^*(10)$  up to hundreds of MeV. Neutron spectra, which were measured in the fields of nuclear installation of JINR earlier, places and conditions of their measurement, are presented too.

The investigation has been performed at the Laboratory of Radiation Biology, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2008

## ВВЕДЕНИЕ

Согласно нормам радиационной безопасности НРБ-99 [1] облучение персонала техногенными источниками ионизирующего излучения необходимо определять в единицах нормируемых величин, одной из которых является 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 мониторинге окружающей среды и в радиационном контроле 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 МКРЕ-шар. Этот фантом представляет собой шар из тканеэквивалентного материала диаметром 30 см и плотностью 1 г/см<sup>3</sup>. Состав материала (по массе): 76,2 % кислорода, 11,1 % углерода, 10,1 % водорода и 2,6 % азота. Амбиентный эквивалент дозы  $H^*(d)$  в точке поля излучения — это эквивалент дозы, который был бы образован соответствующим расширенным и спрямленным полем в МКРЕ-шаре 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 бы 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 с энергией от  $10^{-8}$  МэВ 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 используется основанный на этом принципе прибор, датчик (детектор) которого состоит из  $^{10}\text{B}$ -счетчика (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

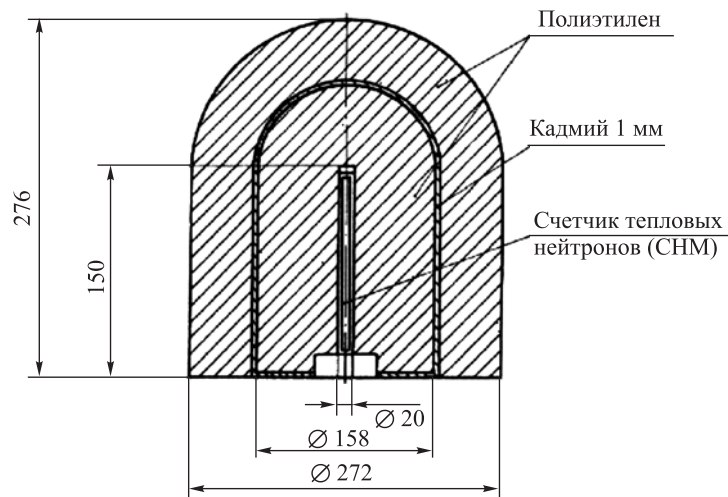


Рис. 1. Борный счетчик нейтронов СНМ-14 в комбинированном замедлителе

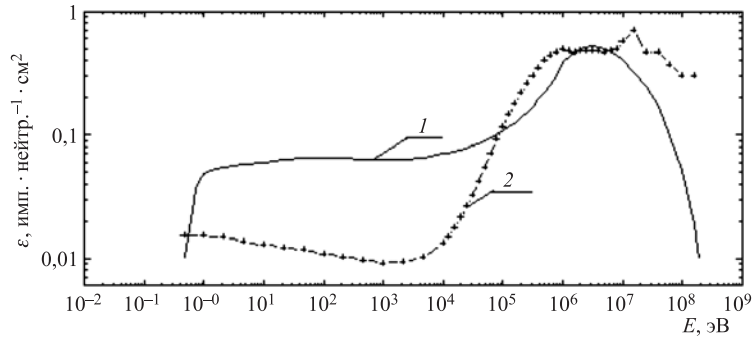


Рис. 2. Энергетическая зависимость чувствительности: 1 — счетчика СНМ-14 в замедлителе, 2 — идеального дозиметра

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 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 дозы и др.), 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 имп. · нейтр.<sup>-1</sup> · см<sup>2</sup> 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 амбиентного эквивалента дозы и которая для Pu-Be-источника нейтронов равна чувствительности СНМ-14 в комбинированном замедлителе. Зависимость  $\varepsilon'(E)$  определялась по формуле

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

где  $h^*(10, E)$  — зависимость удельного амбиентного эквивалента дозы от энергии, Зв · см<sup>2</sup> [4];  $\varepsilon_{\text{Pu-Be}}$  — чувствительность СНМ-14 в комбинированном замедлителе для Pu-Be-источника, имп. · нейтр.<sup>-1</sup> · см<sup>2</sup>;  $h_{\text{Pu-Be}}^*$  — удельный амбиентный эквивалент дозы нейтронов для Pu-Be-источника, равный  $3,8 \cdot 10^{-10}$  Зв · см<sup>2</sup>.

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 мегаэлектронвольт. 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

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

где  $E_1$  и  $E_2$  — границы энергетического диапазона спектра нейтронов;  $\Phi(E)$  — спектр нейтронов с энергией  $E$ , нейтр./МэВ · см<sup>2</sup>.

Действительные значения амбиентного эквивалента дозы рассчитывались по формуле

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

где  $h^*(10, E)$  — зависимость удельного амбиентного эквивалента дозы от энергии, Зв · см<sup>2</sup> [4, 5].

Сравнение величин  $H_m^*(10)$  и  $H_r^*(10)$  проведено путем расчета и анализа коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$ , представляющих собой их отношения.

Коэффициент  $K1$  определяется по формуле

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

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  $K2$  рассчитывается по формуле

$$K2 = \frac{H_r^*(10)}{H_m^*(10)} = \frac{\int_{0,01 \text{ эВ}}^{E_{\text{max}}} h^*(10, E) \cdot \Phi(E) dE}{\frac{h_{\text{Pu-Be}}^*}{\varepsilon_{\text{Pu-Be}}} \cdot \int_{0,4 \text{ эВ}}^{150 \text{ МэВ}} \varepsilon(E) \cdot \Phi(E) dE},$$

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

Значение  $H_r^*(10)$  для коэффициента  $K2$  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  $K2$  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. Подробно места и условия измерения спектров описаны ниже в приложении. 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. 6, 8, 11, 15 в качестве примера приведены некоторые из этих спектров на ядерно-физических установках ОИЯИ (см. приложение).

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Места измерения и номера спектров нейтронов для установок ОИЯИ указаны в таблице. Кроме того, в приложении описаны условия формирования спектров (тип установки, геометрия и материал защиты, вид и энергия первичного излучения, средняя энергия нейтронов в спектре), способ и средства измерения, а на рисунках представлены места определения спектров на установках.

Результаты расчетов коэффициентов  $K1$  и  $K2$  представлены в таблице в соответствии с возрастанием средней энергии спектров нейтронов  $E_{ср}$  на ЯФУ. Во второй колонке таблицы указаны номера точек измерения спектров на установках, показанные на рисунках 7, 9, 10, 12–14, 16, 17 приложения. В третьей колонке указаны установки, места измерений, номера спектров в работах, которые цитируются, и кратко описаны 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, минимальная и максимальная энергии нейтронов в спектре.

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

№ п/п	Номер точки	Установки ОИЯИ	Средняя энергия нейтронов, $E_{ср}$ , эВ	Энергия нейтронов, $E_1 - E_2$ , эВ	Коэффициенты $K_i$	
					$K1$	$K2$
Ускоритель тяжелых ионов У-300						
1	3	Спектр № 3, (ионы $C^{12}$ , 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
2	2	Спектр № 2, (ионы $O^{16}$ , 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
3	1	Спектр № 1, (ионы $N^{15}$ , 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)						
4	1	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
5	3	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



6	5	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
7	2	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
8	1	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
9	4	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
10	2	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)						
11	5	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
12	2п	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
13	6	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
14	4	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
15	1обв.	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
16	2	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
17	1	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
18	1обв.	Спектр № 1обв., 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						
19	5	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

20	3	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
21	1	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
22	4	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
23	2	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
24	6	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

Анализ значений коэффициентов  $K1$  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 коэффициентов  $K1$ , 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 коэффициентов  $K1$  для ускорителя ЛЯР и

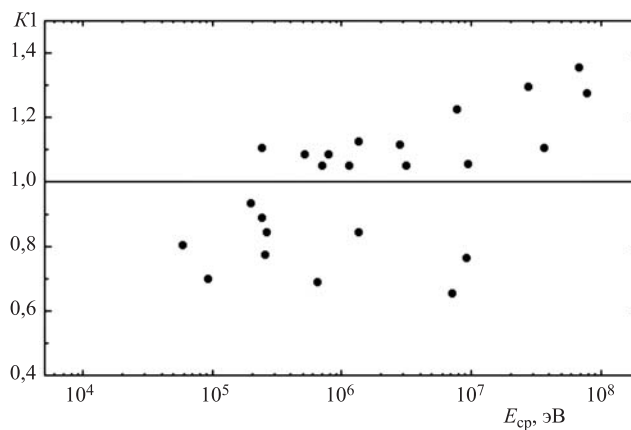


Рис. 3. Значение коэффициента  $K1$

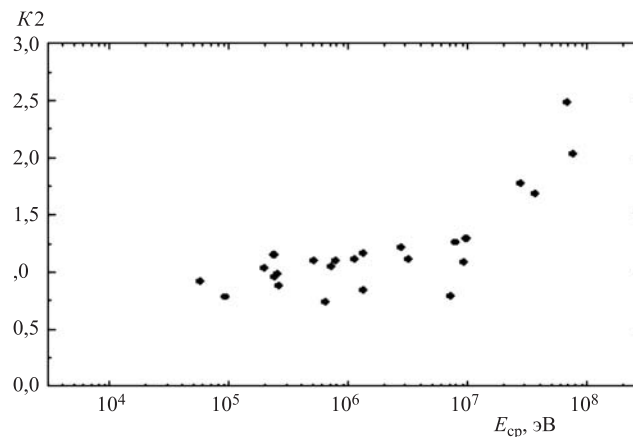


Рис. 4. Значение коэффициента  $K2$

реакторов ЛНФ имеют значения 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  $K1$  имеют значения 0,6–0,7.

На рис. 3 приведены значения коэффициента  $K1$  для спектров с различной средней энергией.

На рис. 4 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 ускорителей ЛЯП 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 значений 2 и выше, что говорит о существенном вкладе в дозу нейтронов с энергией больше 20 МэВ. Для синхрофазотрона значения коэффициентов  $K2$  меньше, чем для фазотрона, и они не превышают значения 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 подо-

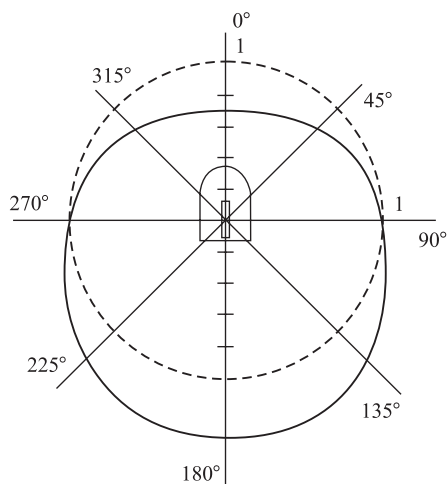


Рис. 5. Угловая зависимость показаний счетчика СНМ-14 в замедлителе

бием этих зависимостей. Однако прибор для измерения  $H^*(10)$  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. 5. 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 амбиентного 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 амбиентной дозы нейтронов.

В качестве дозиметра амбиентной дозы нейтронов с энергией ниже 20 МэВ прибор может использоваться без введения поправочных коэффи-

циентов, 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 амбиентной 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.

## ПРИЛОЖЕНИЕ ОПИСАНИЕ ИСПОЛЪЗУЕМЫХ В РАБОТЕ СПЕКТРОВ НЕЙТРОНОВ НА ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ ОИЯИ

Ниже приводится краткое описание спектров нейтронов и указываются ядерно-физические установки ОИЯИ, где эти спектры получены\*. Также на рисунках в качестве примера приводятся некоторые измеренные спектры нейтронов на этих установках. Приведенная ниже последовательность описания спектров в каждой лаборатории соответствует порядку их расположения в таблице.

### • Лаборатория ядерных реакций (ЛЯР)

Ускоритель (циклотрон) ионов У-300.

1. Спектр нейтронов №3 измерен в помещении циклотрона, когда пучок ионов  $^{12}\text{C}$  с энергией  $\approx 10$  МэВ/нукл. выводился в физическую кабину [8] (рис. 7).
2. Спектр нейтронов №2 измерен в помещении циклотрона, когда пучок ионов  $^{16}\text{O}$  с энергией  $\approx 10$  МэВ/нукл. выводился в физическую кабину [8] (рис. 7).
3. Спектр нейтронов №1 измерен в помещении циклотрона, когда пучок ионов  $^{15}\text{N}$  с энергией  $\approx 10$  МэВ/нукл. выводился в физическую кабину [8] (рис. 7).

---

\*Во всех случаях спектры нейтронов измерены с использованием многошарового спектрометра нейтронов [17] (спектрометра Боннера), кроме измерений на реакторе ИБР-2, в которых спектр измерялся с помощью пороговых и резонансных детекторов. Все спектры восстановлены методом статистической регуляризации [18]. В данной работе рассмотренные спектры соответствовали их среднему значению в коридоре неопределенностей.

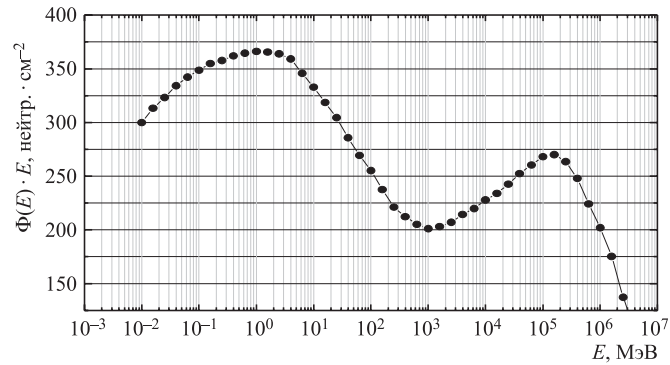


Рис. 6. Спектр нейтронов № 1 на циклотроне У-300

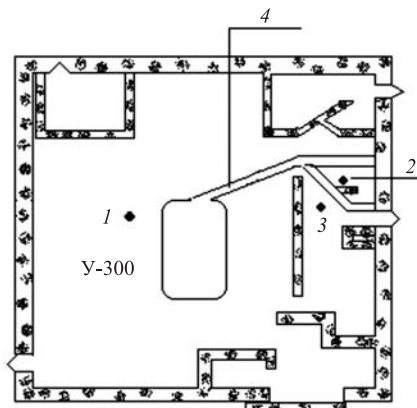


Рис. 7. Геометрия измерений на ускорителе У-300: 1, 2, 3 — места измерений спектров, 4 — ионпровод

• **Лаборатория нейтронной физики (ЛНФ)**

Импульсные быстрые реакторы (ИБР).

1. Реактор ИБР-30. Спектр нейтронов № 1 измерен у входа в зал реактора в районе двух входных защитных дверей реактора, выполненных из чередующихся слоев стали и парафина с добавлением технической буры [9] (рис. 9).
2. Реактор ИБР-30. Спектр нейтронов № 3 измерен в районе нейтронного канала № 3 (на расстоянии  $\approx 4$  м от центра пучка) в экспериментальном

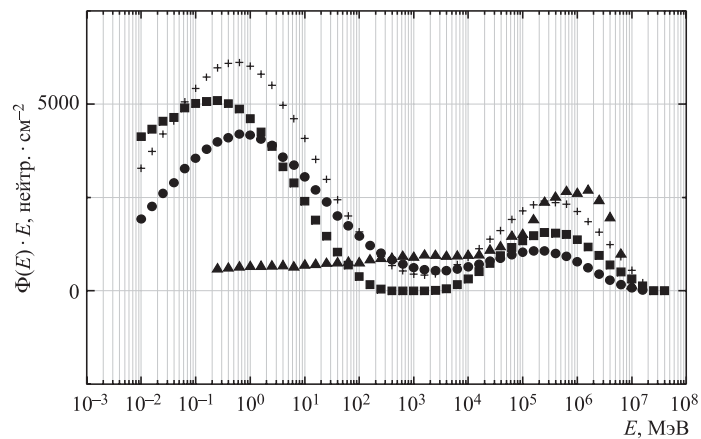


Рис. 8. Спектры нейтронов на импульсных быстрых реакторах (ИБР): ● — спектр № 1, ИБР-30; ■ — спектр № 3, ИБР-30; + — спектр № 5, ИБР-30; ▲ — спектр № 1, ИБР-2

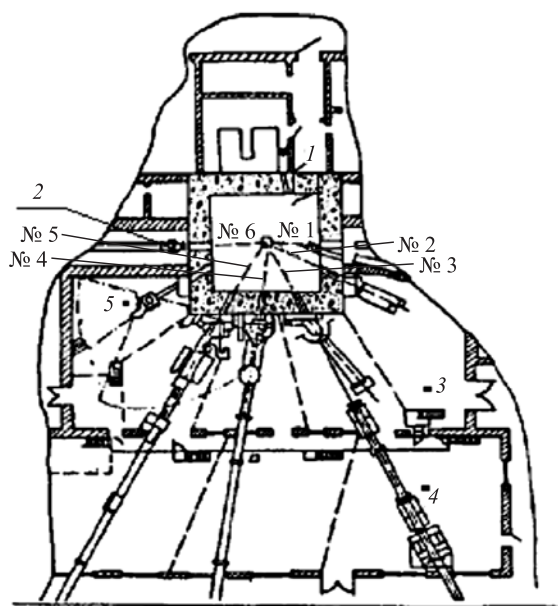


Рис. 9. Геометрия измерений на реакторе ИБР-30: 1, 2, 3, 4, 5 — места измерений спектров, № 1, 2, 3, 4, 5, 6 — номера каналов вывода пучков

зале в поле рассеянного излучения, когда шиберы всех нейтронных каналов, выходящих в экспериментальный зал, были открыты [9] (рис. 9).

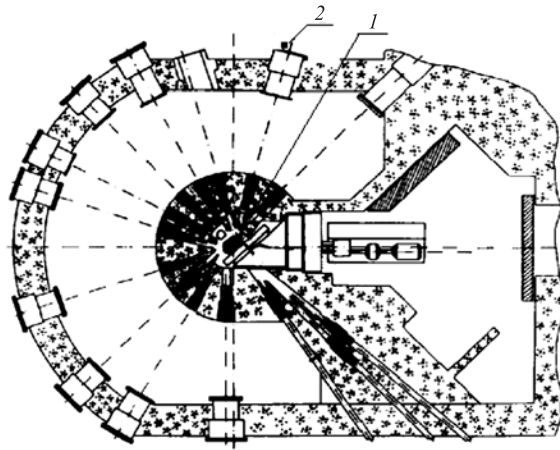


Рис. 10. Геометрия измерений на реакторе ИБР-2: 1, 2 — места измерений спектров

3. Реактор ИБР-30. Спектр нейтронов № 5 измерен в поле рассеянного излучения, когда шиберы всех нейтронных каналов, выходящих в экспериментальный зал, были открыты [9] (рис. 9). Точка измерения находилась наверху водяной защиты спектрометра нейтронов, который был установлен на канале № 7 в экспериментальном зале № 1.
4. Реактор ИБР-2. Спектр нейтронов № 2 измерен в пучке нейтронов канала № 2 на расстоянии 8 м от замедлителя за защитой в период физического пуска реактора без теплоносителя [10] (рис. 10). Спектр измерен с помощью пороговых и резонансных детекторов.
5. Реактор ИБР-2. Спектр нейтронов № 1 измерен на поверхности замедлителя реактора в пучке нейтронов канала № 2 в период физического пуска реактора без теплоносителя [10] (рис. 10). Спектр измерен с помощью пороговых и резонансных детекторов.
6. Реактор ИБР-30. Спектр нейтронов № 4 измерен в районе нейтронного канала № 3 (на расстоянии 1,5 м от центра пучка) в экспериментальном зале в поле рассеянного излучения, когда шиберы всех нейтронных каналов, выходящих в экспериментальный зал, были открыты [9] (рис. 9).
7. Реактор ИБР-30. Спектр нейтронов № 2 измерен в центре нейтронного канала № 6 реактора вблизи механического шибера, сделанного из чередующихся слоев стали, свинца, парафина, карбида бора и расположенного между залом реактора и каналом № 6. Нейтроновод диаметром 400 мм канала № 6 в стене реактора заполнен водой [9] (рис. 9).



• **Лаборатория ядерных проблем (ЛЯП)**

Ускоритель протонов на энергию 660 МэВ.

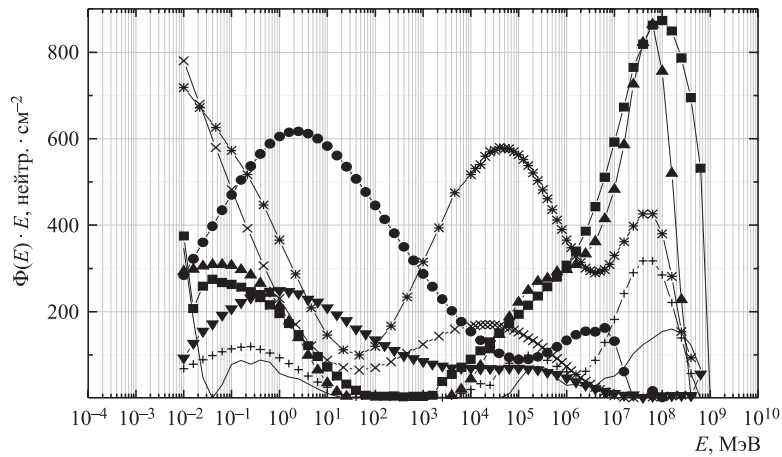


Рис. 11. Спектры нейтронов на синхроциклотроне (фазотроне): ● — спектр № 2п; ■ — спектр № 1обв.; ▲ — спектр № 1<sup>а</sup>обв.; ▼ — спектр № 6; — — спектр № 1; + — спектр № 2; × — спектр № 5; \* — спектр № 4

1. Спектр нейтронов № 5 измерен [11, 12] в цокольном этаже фазотрона, точка измерения находилась в лабиринте туннеля под ускорителем, который имеет боковую и потолочную защиту из тяжелого бетона толщиной 2 и 1 м соответственно (рис. 12). При измерениях пучок протонов

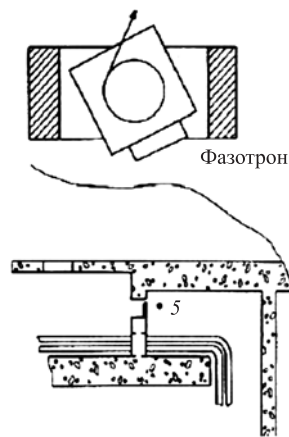


Рис. 12. Геометрия измерений на ускорителе ЛЯП: 5 — место измерения спектра

выводился на внутреннюю толстую бериллиевую мишень, источником нейтронов являлось вторичное излучение, выходящее из камеры ускорителя, конструкционных материалов и толстой мишени.

2. Спектр нейтронов № 2п измерен на крыше пристройки ускорителя в районе оконных проемов синхроциклотрона (рис. 13). Протоны с энергией 660 МэВ ускорялись в режиме «прямого» поля и установленной внутренней  $\mu$ -мезонной мишенью. В точку измерения попадало рассеянное излучение, образованное в экспериментальном помещении и вышедшее через большие проемы окон [13].
3. Спектр нейтронов № 6 измерен в экспериментальном зале № 4, расположенном рядом с помещением ускорителя, за 4-метровой с проемами бетонно-чугунной защитой ускорителя [13] (рис. 13).
4. Жесткое опорное поле. Спектр нейтронов № 4 измерен за 2-метровой бетонной защитой фазотрона, на которую падает вторичное излучение из камеры ускорителя и мишенной станции с толстой бериллиевой мишенью, поле излучения содержит значительную долю высокоэнергетических нейтронов [11, 12] (рис. 13).

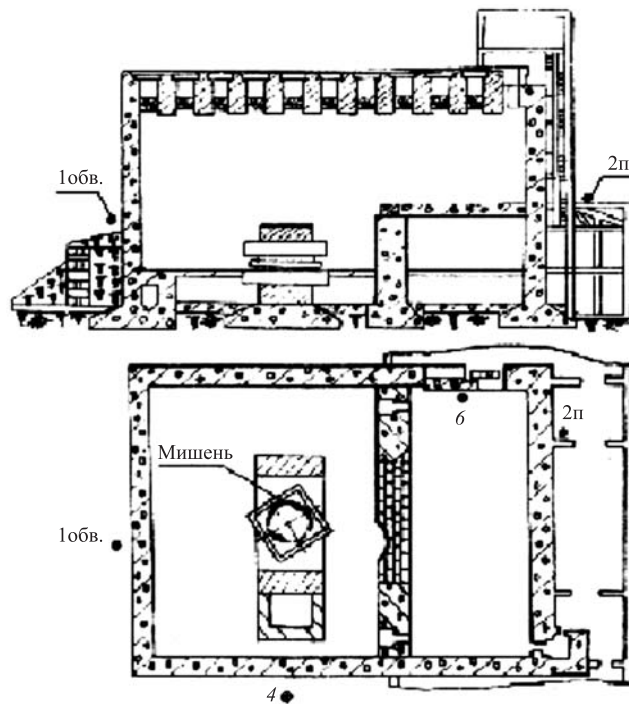


Рис. 13. Геометрия измерений на ускорителе ЛЯП: 1обв., 2п, 4 и 6 — места измерений спектров

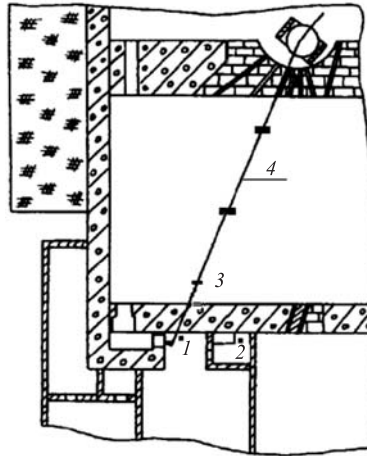


Рис. 14. Геометрия измерений на ускорителе ЛЯП: 1, 2 — места измерений спектров, 3 — расположение толстой Cu-мишени, 4 — пучок протонов

5. Спектр нейтронов № 1<sup>а</sup> обв. измерен на грунтовой обваловке синхроциклотрона за сплошной двухметровой бетонной защитой (там же, где и спектр № 1 обв.) при «обратном поле», когда протоны с энергией 350 МэВ взаимодействовали с внутренней Ве-мишенью [13] (рис. 13). Источником нейтронов являлось вторичное излучение, выходящее из камеры ускорителя, конструкционных материалов и толстой Ве-мишени.
6. Спектр нейтронов № 2 измерен при тех же условиях, что и спектр № 1 (см. ниже), но точка измерения находилась за бетонной защитой на расстоянии  $\approx 5$  м от точки, в которой измерялся спектр № 1 [13, 14] (рис. 14).
7. Спектр нейтронов № 1 измерен за двухметровой бетонной защитой в экспериментальном зале в точке, находящейся в месте пересечения стены защиты и направления движения пучка протонов с энергией 660 МэВ. При этом 78 % пучка протонов взаимодействовало с толстой медной мишенью диаметром 12 см и длиной 30 см, расположенной на пучке протонов на расстоянии 86 см от защиты, а 22 % пучка протонов падало на двухметровую бетонную защиту [13, 14] (рис. 14).
8. Очень жесткий спектр нейтронов № 1 обв. измерен на грунтовой обваловке синхроциклотрона за сплошной двухметровой бетонной защитой при «обратном поле», когда протоны с энергией 660 МэВ взаимодействовали с внутренней Ве-мишенью [13, 15] (рис. 13). Источником нейтронов являлось вторичное излучение, вышедшее из камеры ускорителя, конструкционных материалов и толстой Ве-мишени.

• **Лаборатория высоких энергий (ЛВЭ)**

Ускоритель на энергию 10 ГэВ по протонам.

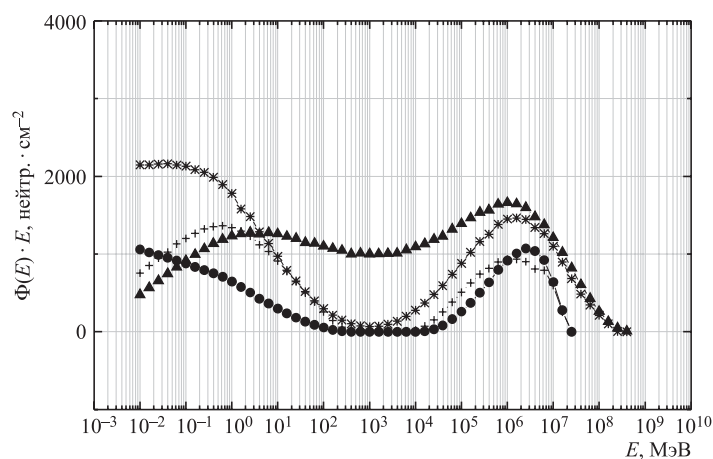


Рис. 15. Спектры нейтронов на синхрофазотроне: \* — спектр № 1; ● — спектр № 3; ▲ — спектр № 4; + — спектр № 5

Спектры № 3–6 измерялись в режиме, когда пучок протонов с энергией 10 ГэВ выводился из синхрофазотрона системой медленного вывода и транспортировался в экспериментальный зал, отделенный от зала синхрофазотрона 8-метровой бетонной стеной, затем пучок протонов поглощался ловушкой.

1. Спектр нейтронов № 5 измерен в районе вывода пучка протонов синхрофазотрона в экспериментальное помещение, в котором находилась ловушка протонов [13, 16] (рис. 16).
2. Спектр нейтронов № 3 измерен в экспериментальном помещении (там же, где и спектр № 4, но в геометрии дополнительной (усиленной) защиты) [13, 16] (рис. 16).
3. Спектр № 1 нейтронов измерен в районе линейного промежутка синхрофазотрона. Источником излучения являлась камера ускорения [13, 15] (рис. 17).
4. Спектр нейтронов № 4 измерен в экспериментальном помещении, в котором находилась ловушка протонов. Измерен в том же месте, где и спектр № 3, но без дополнительной защиты [13, 16] (рис. 16).
5. Спектр нейтронов № 2 измерен в районе линейного промежутка синхрофазотрона. Источником излучения являлась камера ускорения [13, 15] (рис. 17).

6. Спектр нейтронов №6 измерен в районе вывода пучка протонов синхрофазотрона в экспериментальное помещение, за ловушкой протонов [13, 16] (рис. 16).

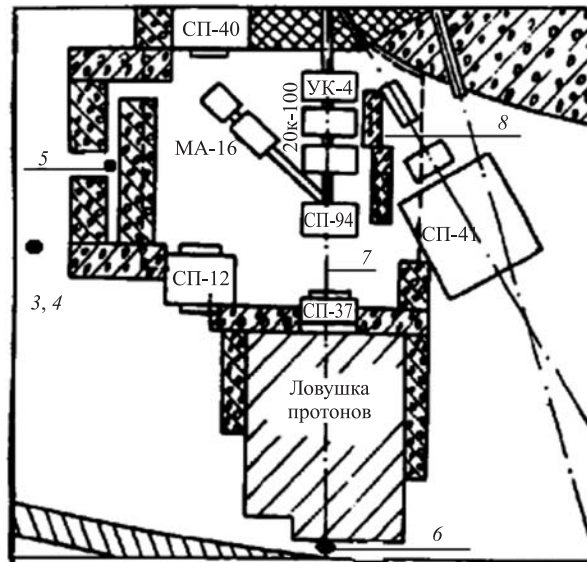


Рис. 16. Геометрия измерений на синхрофазотроне: 3, 4, 5, 6 — места измерений спектров; 7 — пучок протонов; 8 — дополнительная защита

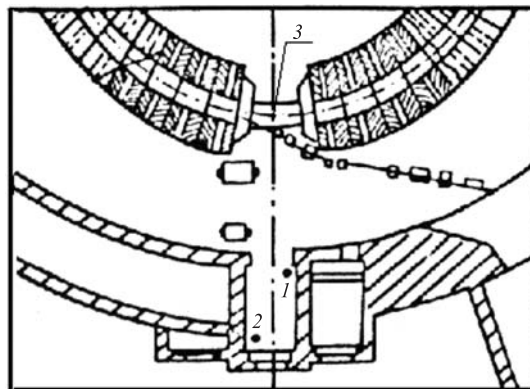


Рис. 17. Геометрия измерений на синхрофазотроне: 1, 2 — места измерений спектров, 3 — пучок протонов

## ЛИТЕРАТУРА

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, Ч. 2. М.: Энергоатомиздат, 1994.
3. Assessment of Occupational Exposure due to External Sources of Radiation, IAEA Safety Guide, IAEA, Vienna, 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 // Radiat. Prot. Dosim. 1997. V. 70, No. 1–4. P. 383–386.
6. *Бучнев В. Н. и др.* Сообщение ОИЯИ Р3-85-428, Дубна, 1985. 7 с.
7. *Бучнев В. Н., Комочков М. М., Мокров Ю. В.* Сообщение ОИЯИ Р16-86-491. Дубна, 1986, 8 с.
8. *Комендантова Г. А. и др.* Препринт ОИЯИ 16-12858. Дубна, 1979. 8 с.
9. *Архипов В. А. и др.* Сообщение ОИЯИ 16-11817. Дубна, 1978. 11 с.
10. *Архипов В. А. и др.* Сообщение ОИЯИ Р13-12466. Дубна, 1979. 16 с.
11. *Алейников В. Е. и др.* 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.* Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Дубна: ОИЯИ, 1978.
14. *Алейников В. Е., Комочков М. М., Крючков В. П.* Препринт ОИЯИ Р16-8179. Дубна, 1974. 11 с.
15. *Алейников В. Е., Гердт В. П., Комочков М. М.* Препринт ОИЯИ Р16-8176. Дубна, 1974. 10 с.
16. *Алейников В. Е. и др.* Сообщение ОИЯИ 16-8583. Дубна, 1975. 15 с.
17. *Алейников В. Е., Гердт В. П., Комочков М. М.* Препринт ОИЯИ Р16-6791. Дубна, 1972. 8 с.
18. *Туровцева Л. С., Турчин В. Ф.* Препринт ИПМ № 30, М., 1971. 6 с.

Получено 7 апреля 2008 г.

Редактор *Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 27.06.2008.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 1,82. Тираж 230 экз. Заказ № 56216.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)