

## ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.074.8

### ПАССИВНЫЙ ДОЗИМЕТР НЕЙТРОНОВ ДЛЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСКОРИТЕЛЕЙ

© 2020 г. А. М. Мамаев<sup>а</sup>, В. Н. Пелешко<sup>а</sup>, Е. Н. Савицкая<sup>а,\*</sup>,  
А. В. Санников<sup>а,\*\*</sup>, М. М. Сухарев<sup>а</sup>, С. Э. Сухих<sup>а</sup>

<sup>а</sup> *Институт физики высоких энергий им. А.А. Логунова Национального исследовательского центра  
“Курчатовский институт”  
Россия, 142281, Протвино Московской обл., ул. Победы, 1*

*\*e-mail: savitskaya@ihep.ru*

*\*\*e-mail: sannikov@ihep.ru*

Поступила в редакцию 01.10.2019 г.

После доработки 11.10.2019 г.

Принята к публикации 18.10.2019 г.

Описан пассивный дозиметр нейтронов (п.д.н.) для высокоэнергетических ускорителей. В качестве детектора тепловых нейтронов применяется слайд индивидуального дозиметра ДВГН-01, размещенный в центре полиэтиленового замедлителя. Замедлитель содержит свинцовую вставку, повышающую чувствительность дозиметра к высокоэнергетическим нейтронам, и кадмиевый фильтр. Выполнены расчеты по оптимизации параметров конструкции дозиметра с точки зрения энергетической зависимости чувствительности в диапазоне энергий от тепловой до 1 ГэВ. Расчетные данные согласуются с экспериментальными результатами, полученными в низкоэнергетических опорных полях нейтронов. Проведены сравнительные измерения с помощью п.д.н. и низкоэнергетического пассивного дозиметра в полях нейтронов за защитой протонного ускорителя У-70 ИФВЭ на 70 ГэВ.

DOI: 10.31857/S0032816220020123

#### ВВЕДЕНИЕ

Пассивные дозиметры нейтронов на основе термолюминесцентных детекторов тепловых нейтронов в шаровых или цилиндрических полиэтиленовых замедлителях широко применяются на ядерных установках для измерения Ambientного эквивалента дозы нейтронов. Однако при использовании таких дозиметров за защитами высокоэнергетических ускорителей недостатком их является низкая чувствительность к нейтронам с энергией выше 20 МэВ, что может приводить к значительной недооценке дозы нейтронов [1].

В данной работе описана конструкция пассивного дозиметра нейтронов (п.д.н.) с комбинированным замедлителем, применение которого позволяет устранить указанный выше недостаток и расширить энергетический диапазон дозиметра. Комбинированный замедлитель содержит свинцовую вставку и кадмиевый фильтр внутри полиэтиленового замедлителя. Свинцовый конвертер, предложенный впервые в работе [2], повышает чувствительность дозиметра к высокоэнергетическим нейтронам за счет размножения нейтронов в реакциях ( $n, 2n$ ), ( $n, 3n$ ) и т.д. Кадмиевый фильтр выравнивает энергетическую зави-

симость чувствительности в низкоэнергетической области.

В качестве детектора тепловых нейтронов аналогично низкоэнергетическому пассивному дозиметру эффективной дозы (д.э.д.) нейтронов [3] применен слайд индивидуального дозиметра ДВГН-01 [4], содержащий термолюминесцентные детекторы  ${}^7\text{LiF}$  и  ${}^6\text{LiF}$ , что позволило использовать стандартную калибровку и обсчет детекторов на автоматизированном комплексе АКЖДК-301 [5]. Конструкция дозиметра была оптимизирована на основе расчетов по программам [6, 7]. Изготовлены опытные образцы п.д.н. и проведены измерения в низкоэнергетических опорных полях нейтронов и высокоэнергетических полях за защитой ускорителя У-70 ИФВЭ на 70 ГэВ. Проведено сравнение результатов с расчетными данными и экспериментальными результатами, полученными с помощью д.э.д.

#### ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ФУНКЦИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ П.Д.Н.

За основу конструкции п.д.н. был принят один из вариантов конструкции активного дозиметра нейтронов для высокоэнергетических ускорите-

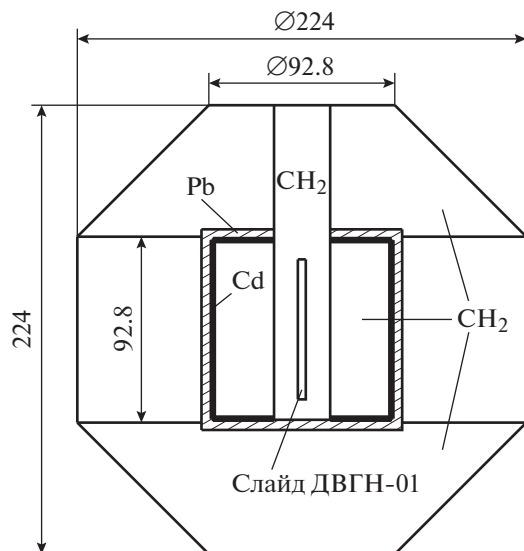


Рис. 1. Схематическое изображение конструкции п.д.н. в разрезе.

лей [8]. Выбран наиболее технологичный вариант полиэтиленового замедлителя в виде усеченного цилиндра, торцы которого срезаны коническими поверхностями под углом  $45^\circ$ . Такая конструкция обеспечивает минимальную анизотропию чувствительности. Оптимальные размеры усеченного цилиндра: высота и диаметр равны 22.4 см. Внешние размеры цилиндрической свинцовой вставки составляют  $\text{Ø}10 \times 10$  см, ее толщина 8 мм. Вместо борного фильтра [8] использован кадмиевый фильтр толщиной 0.5 мм с площадью перфорации 28%.

Схематическое изображение конструкции п.д.н. представлено на рис. 1. Внешний полиэтиленовый замедлитель дозиметра состоит из верхней и нижней частей в виде усеченных конусов и центральной цилиндрической части. Внутри внешнего замедлителя размещены свинцовый конвертер, кадмиевый фильтр, внутренний полиэтиленовый замедлитель и цилиндрическая полиэтиленовая вставка диаметром 28 мм с полостью для слайда ДВГН-01. Вся конструкция скреплена четырьмя полиэтиленовыми болтами. Масса п.д.н. со стальной ручкой для переноски дозиметра и тремя дюралюминиевыми ножками составляет менее 10 кг.

Слайд ДВГН-01 содержит термолюминесцентные детекторы  ${}^7\text{LiF}$  и  ${}^6\text{LiF}$ . Первый из них регистрирует только  $\gamma$ -кванты и заряженные частицы, второй — те же частицы и нейтроны. Отклик ДВГН-01 к нейтронам определяется по разности показаний детекторов. Расчеты функции чувствительности (ф.ч.) при изотропном облучении п.д.н. нейтронами проводились по программам

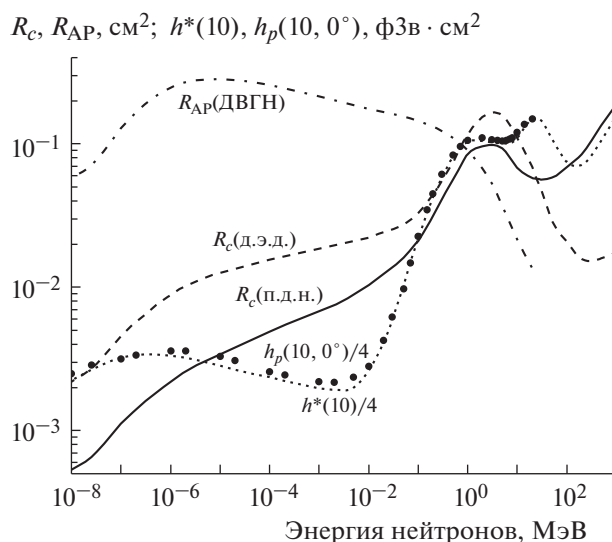


Рис. 2. Энергетические зависимости: чувствительности  $R_c$  п.д.н. и д.э.д. при изотропном облучении; ф.ч.  $R_{AP}$  при направленном облучении слайда в cassette ДВГН-01 на плоском фантоме из оргстекла; удельных AMBIENTНОГО  $h^*(10)$  и индивидуального  $h_p(10, 0^\circ)$  эквивалентов дозы нейтронов [9, 10].

[6, 7]. Методика расчета для пары детекторов  ${}^6\text{LiF}$ – ${}^7\text{LiF}$  описана в работе [4]. Полученная ф.ч.  $R_c(E)$  для описанной выше конструкции п.д.н. в единицах  $(n, \alpha)$ -реакций в детекторе  ${}^6\text{LiF}$  на единичный флюенс нейтронов показана на рис. 2. Здесь же приведена ф.ч. д.э.д., рассчитанная по программам [6, 7], и даны энергетические зависимости удельных AMBIENTНОГО ( $h^*(10)$  [9, 10]) и индивидуального ( $h_p(10, 0^\circ)$  [9]) эквивалентов дозы нейтронов.

Дозиметр эффективной дозы представляет собой слайд ДВГН-01, размещенный в центре шарового полиэтиленового замедлителя диаметром 25.4 см. Чувствительность п.д.н. к тепловым и промежуточным нейтронам по отношению к чувствительности д.э.д. до четырех раз ниже, к быстрым — в полтора раза ниже, а к высокоэнергетическим — до десяти раз выше. Различие ф.ч. п.д.н. и д.э.д. при высоких энергиях обусловлено влиянием свинцового конвертера, а при низких энергиях — поглощением тепловых нейтронов кадмиевым фильтром п.д.н. Несмотря на то что последний снижает чувствительность п.д.н., его применение позволяет значительно уменьшить разброс дозовой чувствительности в различных нейтронных спектрах, а также размеры и массу прибора.

**ГРАДУИРОВОЧНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ П.Д.Н. И Д.Э.Д. В ПОЛЯХ НЕЙТРОНОВ С ПРОТЯЖЕННЫМИ СПЕКТРАМИ**

Процедура оптимизации конструкции п.д.н. включала в себя свертку ф.ч.  $R_c(E)$  со спектрами  $\varphi_i(E)$  из имеющейся у нас библиотеки нейтронных спектров и расчет градуировочных коэффициентов  $c_i^*$  п.д.н. для этих спектров:

$$c_i^* = \frac{H_i^*(10)}{H_{ci}} = \frac{\int h^*(10, E)\varphi_i(E)dE}{c \int R_c(E)\varphi_i(E)dE},$$

где

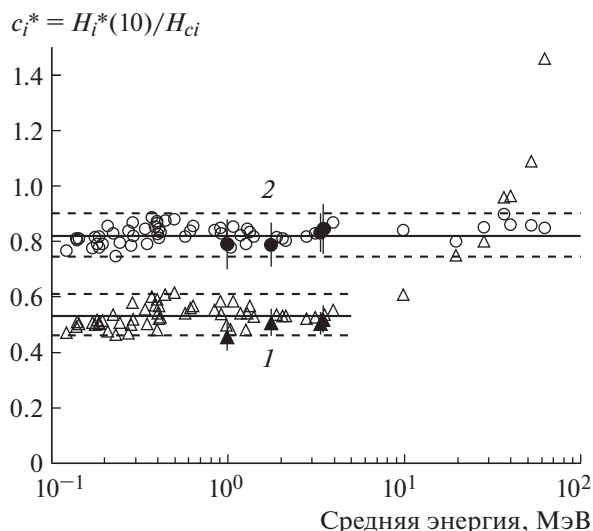
$$c = \frac{H_p^{rp}(10, 0^\circ)}{H_{двгн(АР)}^{rp}} = \frac{\int h_p(10, 0^\circ, E)\varphi_{гр}(E)dE}{\int R_{АР}(E)\varphi_{гр}(E)dE}.$$

Здесь  $H_{ci}$  – показание слайда в единицах индивидуального эквивалента дозы нейтронов  $H_p(10, 0^\circ)$  для спектра  $\varphi_i(E)$ , а  $\varphi_{гр}(E)$  – спектр нейтронов [11] установки УКПН-1М с источником  $^{239}\text{Pu}-\text{Be}$ , используемой в ИФВЭ для градуировки и поверки дозиметрических приборов.

Градуировочный коэффициент  $c$  по индивидуальному эквиваленту дозы нейтронов рассчитывался для условий стандартной градуировки слайдов в кассете ДВГН-01 на плоскопараллельном фантоме из оргстекла с размерами  $30 \times 30 \times 15$  см в поле нейтронов установки УКПН-1М. Энергетическая зависимость чувствительности при передне-задней (anterior-posterior) геометрии облучения  $R_{АР}(E)$  для условий градуировки рассчитана в настоящей работе по программе [6] и приведена на рис. 2.

Библиотека нейтронных спектров включает в себя низкоэнергетические спектры за защитами реакторов, фильтрованные и нефилтрованные спектры радионуклидных источников, а также высокоэнергетические спектры за защитами ускорителей. Не использовались спектры за стальными защитами, не характерными для условий работы персонала.

Оптимальные параметры конструкции п.д.н., включающие в себя внешние размеры полиэтиленового замедлителя, внешние размеры и толщину свинцового конвертера, а также площадь перфорации кадмиевого фильтра, выбирались из условия минимального разброса градуировочных коэффициентов  $c_i^*$  для спектров со средними энергиями надкадмиевых нейтронов 0.1–60 МэВ. Результаты расчета градуировочных коэффициентов для описанной выше конструкции п.д.н. с функцией чувствительности  $R_c(E)$  (рис. 2) приведены на рис. 3 в зависимости от средней энергии



**Рис. 3.** Градуировочные коэффициенты д.э.д. (1) и п.д.н. (2) в зависимости от средней энергии спектра нейтронов: светлые точки – расчетные значения, сплошные и штриховые линии – средние величины с коридором неопределенностей; черные точки – экспериментальные значения  $c_i^*$  в опорных полях ОП-2017.

спектра. Там же показаны рассчитанные в настоящей работе значения  $c_i^*$  для д.э.д.

Результаты для средней энергии  $>5$  МэВ соответствуют высокоэнергетическим спектрам за защитой ускорителей, остальные данные – низкоэнергетические спектры. Среднее значение  $\bar{c}^*$  для д.э.д. в низкоэнергетических спектрах равно 0.53, разброс относительно среднего составляет  $\pm 15\%$  ( $\sigma = 7.5\%$ ). В высокоэнергетических полях нейтронов значения  $c_i^*$  систематически возрастают с ростом средней энергии спектра нейтронов, так как дозовая чувствительность д.э.д. падает. Среднее значение  $\bar{c}^*$  для п.д.н. равно 0.82 с разбросом  $\pm 10\%$  во всем диапазоне энергий. Уменьшение разброса чувствительности п.д.н. по сравнению с д.э.д. для низкоэнергетических спектров достигается за счет применения кадмиевого фильтра, а для высокоэнергетических – благодаря свинцовому конвертеру.

**ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ П.Д.Н. И Д.Э.Д. В ОПОРНЫХ ПОЛЯХ НЕЙТРОНОВ ОП-2017 И АНИЗОТРОПИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ П.Д.Н.**

Для проверки расчетных данных, приведенных на рис. 3, была измерена чувствительность п.д.н. и д.э.д. в опорных полях нейтронов ОП-2017 ИФВЭ [11] на основе радионуклидного источника  $^{239}\text{Pu}-\text{Be}$ . Источник размещали со стороны боковой поверхности п.д.н., слайд – перпендикулярно пучку, а детекторы – перед никелевой

**Таблица 1.** Экспериментальные значения градуировочных коэффициентов  $c_i^* = H_i^*(10)/H_{ci}$  для д.э.д. и п.д.н. при условии стандартного облучения в опорных полях нейтронов ОП-2017 [11] на основе радионуклидного источника  $^{239}\text{Pu}-\text{Be}$

Описание	$\bar{E}$ , МэВ	$c_i^*$	
		Д.э.д.	П.д.н.
Источник $^{239}\text{Pu}-\text{Be}$ без защиты	3.47	$0.52 \pm 0.05$	$0.85 \pm 0.09$
Источник в установке УКПН-1М	3.36	<b><math>0.51 \pm 0.04</math></b>	<b><math>0.83 \pm 0.07</math></b>
Источник в установке УКПН-1М с тепловой насадкой	1.75	$0.51 \pm 0.05$	$0.79 \pm 0.08$
Источник за поглощающим конусом <sup>1</sup> на расстоянии 1.5 м	0.99	$0.46 \pm 0.05$	$0.79 \pm 0.09$

<sup>1</sup>усеченный конус из борированного полиэтилена (5% ест. бора) длиной 500 мм и с диаметрами оснований 85 и 210 мм по ГОСТ 8.521-84, предназначенный для полного поглощения прямых нейтронов из источника и измерения вклада рассеянного излучения

подложкой термолюминесцентных детекторов (стандартное облучение). Расстояние между центрами источника и детектора составляло 1 м во всех случаях, кроме поля № 4. Результаты измерений представлены на рис. 3 и в табл. 1 в виде градуировочных коэффициентов  $c_i^* = H_i^*(10)/H_{ci}$ . Значения мощности амбиентного эквивалента дозы взяты по данным работы [11], полученным с помощью спектрометра Боннера, градуированного в поле № 2.

В качестве погрешностей результатов приводятся среднеквадратичные отклонения значений  $c_i^*$ , которые рассчитывались с учетом основной погрешности измерений  $H_{ci}$  на АКВДК-301 ( $\sigma = 7.5\%$ ) и погрешностей амбиентного эквивалента дозы  $H_i^*(10)$ . Последняя составляла 5% в поле № 2 по данным поверки [12], в остальных полях — от 6.9% до 7.8% по результатам измерений спектрометром Боннера [11].

Экспериментальные данные для д.э.д. и п.д.н. находятся в пределах коридоров расчетных значений для разных спектров. Результаты измерений  $c^*$  в градуировочном поле УКПН-1М (№ 2) близки к средним расчетным величинам. Полученные экспериментальные значения ( $c_{дэд}^* = 0.51$  и  $c_{пдн}^* = 0.83$ ) использовались далее в расчетах амбиентного эквивалента дозы нейтронов по показаниям д.э.д. и п.д.н. за защитой ускорителя:  $H^*(10) = c^*H_c$ .

В поле УКПН-1М была проверена также анизотропия дозовой чувствительности п.д.н. при облучении в различных положениях относительно стандартного. Выполнено: 1) облучение сбоку, слайд расположен перпендикулярно пучку с детекторами за никелевой подложкой; 2) облучение сбоку, слайд расположен параллельно пучку. Кроме экспозиций со стороны боковой поверхности п.д.н., проведены также облучения: 3) сверху и 4) снизу. В этих случаях ориентация слайда не имеет значения из-за аксиальной симметрии. Результаты измерений приведены в табл. 2. Результаты, полученные в первых трех положениях, со-

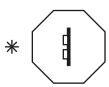
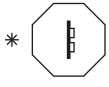

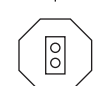
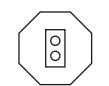
гласуются с данными для стандартного положения в пределах 1%. При облучении снизу дозовая чувствительность на 7% ниже. Это отклонение находится, однако, в пределах погрешности измерений.

#### ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ П.Д.Н. И Д.Э.Д. ЗА ЗАЩИТОЙ ПРОТОННОГО СИНХРОТРОНА ИФВЭ У-70

Сравнительные измерения с помощью п.д.н. и д.э.д. проводились, как правило, при одновременном облучении дозиметров на подставках высотой 1 м на расстояниях ~0.5 м друг от друга и ~1 м от ближайшего радиационного монитора, находившегося на полу. Последний представляет собой стационарный детектор нейтронов автоматизированной системы радиационного контроля ИФВЭ. Измерения проводились в экспериментальном зале 1БВ. Расположение точек измерения показано на рис. 4. Точки измерения были разделены на три группы: 1) верхняя защита; 2) боковая защита; 3) временный радиобиологический стенд. Полученные значения амбиентного эквивалента дозы нейтронов  $H^*(10)$  по показаниям д.э.д. и п.д.н. приведены в табл. 3. В последней колонке таблицы представлены отношения значений  $H^*(10)$ , измеренных двумя дозиметрами. Эти отношения служат характеристикой жесткости спектра нейтронов, которая обсуждается ниже.

Точка РМ-58 за верхней защитой представляет для нас особый интерес, так как при работе внутренних бериллиевых мишеней 24 и 27 кольцевого зала У-70 она является мощным источником высокоэнергетических нейтронов со стабильными характеристиками. В этой точке были проведены два сравнительных измерения д.э.д. и п.д.н.: а) при одновременном облучении и б) при раздельном облучении с мониторингом по показаниям радиационного монитора. Полученные значения жесткости спектра практически одинаковы

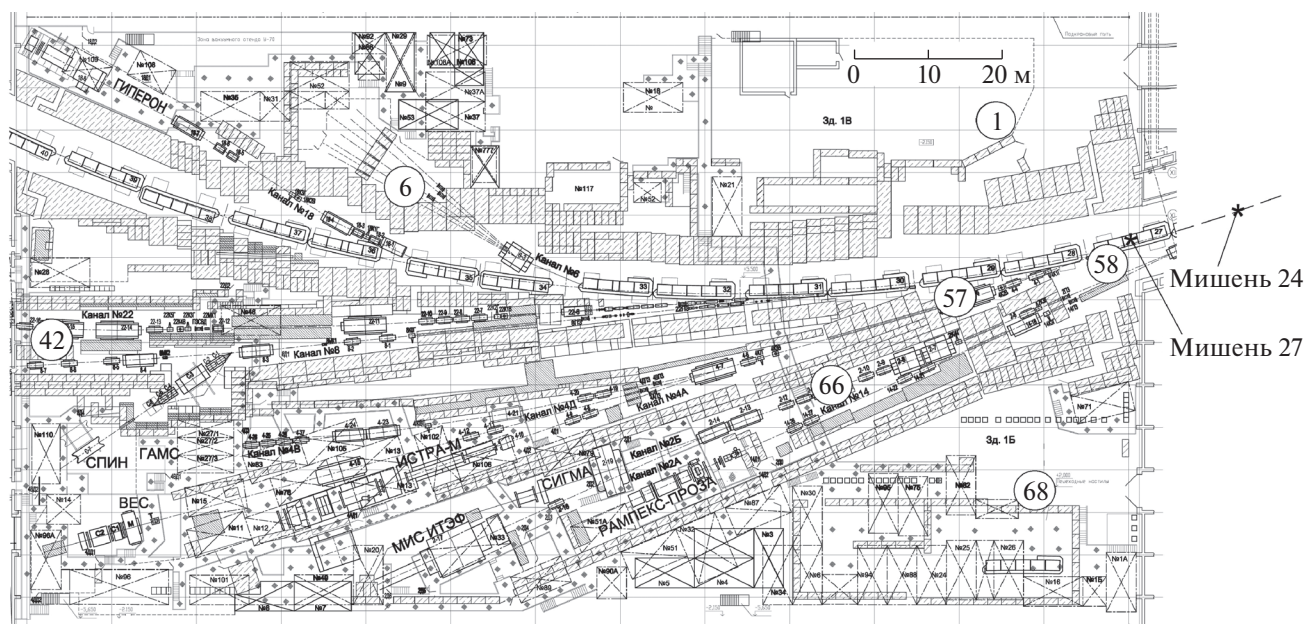
**Таблица 2.** Дозовая чувствительность п.д.н.  $r_i^* = H_{ci}/H_i^*(10)$  при облучении в поле УКПН-1М при различных положениях относительно стандартного (облучение сбоку, детекторы перед подложкой)

Условия облучения	Схема относительного расположения источника (*) и слайда в п.д.н.	$r_i^*/r_0^*$
Стандартное облучение		
Облучение сбоку, детекторы за подложкой		1.01
Облучение сбоку, слайд параллельно пучку		0.99
Облучение сверху		0.99
Облучение снизу		0.93

в обоих случаях, среднее значение равно  $\eta = H_{\text{пдн}}^*/H_{\text{дэд}}^* = 1.52$ .

В работе [1] вблизи точки РМ-58 в тех же условиях работающих мишеней 24 и 27 измерен спектр нейтронов с помощью индиевого спектрометра Боннера и углеродного активационного детектора и рассмотрены перспективы использова-

ния этого поля в качестве высокоэнергетического опорного поля нейтронного излучения. Согласно полученным из спектра данным, вклад высокоэнергетических нейтронов с  $E > 20$  МэВ в амбиентный эквивалент дозы нейтронов составляет более половины (56%). Рассчитанное по спектру отношение амбиентных доз по показаниям рас-



**Рис. 4.** Схема размещения стационарных радиационных мониторов (номера радиационных мониторов указаны в кружках) вблизи точек измерения п.д.н. и д.э.д. в экспериментальном зале 1БВ. Справа показано расположение мишеней 24 и 27.

**Таблица 3.** Результаты сравнительных измерений амбиентного эквивалента дозы нейтронов дозиметрами д.э.д. и п.д.н. в экспериментальном зале 1БВ протонного синхротрона У-70

Условия измерений	Точка	Источник нейтронов или расположение точки измерения	$H^*(10)$ , мЗв		$\eta = \frac{H_{\text{пдн}}^*}{H_{\text{дэд}}^*}$
			д.э.д.	п.д.н.	
Верхняя защита	PM-58	а) Мишени 24+27	10.2	15.6	1.53
		б) Мишени 24+27	4.63	6.97	1.51
		в) Мишень 27	4.33	5.98	1.38
	PM-57	Мишени 24+27	1.41	2.27	1.61
		Мишень 27	1.95	2.79	1.43
		Верхняя защита 8-го канала	0.449	0.742	1.65
Боковая защита	PM-1	Вход в кольцевой зал ускорителя	0.963	0.8	0.83
	PM-68	Вблизи домика 26	0.334	0.375	1.12
	PM-66	Переход через 2-й канал	0.617	0.83	1.35
Временный радиобиологический стенд	PM-6 30° к пучку	Водный фантом, облучаемый ионами $^{12}\text{C}$ 450 МэВ/нуклон	3.54	7.26	2.05
	PM-6 90° к пучку	То же	2.03	2.74	1.35

Примечание.  $H_{\text{дэд}}^* = 0.51H_c$ ,  $H_{\text{пдн}}^* = 0.83H_c$ .

смаатриваемых дозиметров равно  $\eta = 1.54$ , что близко к результатам измерений (см. табл. 3).

В той же точке PM-58 проведены измерения при одной работающей мишени 27. В этом случае параметр жесткости спектра нейтронов снижен до 1.38. Возможным объяснением может быть то, что мишень 27 находится значительно ближе к PM-58, чем мишень 24. Угол между пучком протонов и направлением от мишени 27 к точке измерения при этом гораздо больше, чем в случае мишени 24. Наиболее жесткий компонент излучения имеет выраженную направленность под малыми углами к пучку, что может обуславливать более жесткий спектр нейтронов от мишени 24 по сравнению с мишенью 27.

Отношение доз  $H_{\text{пдн}}^*/H_{\text{дэд}}^*$  в точке PM-57 при работе внутренних мишеней 24 и 27 равно 1.61, что несколько больше соответствующей величины для точки PM-58. В случае одной работающей мишени 27 жесткость спектра также немного больше, чем в точке PM-58 при тех же условиях. Это можно объяснить тем, что расстояние от мишени 27 до PM-57 на 22 м больше, чем до PM-58, в связи с чем углы между пучком протонов и направлениями от мишеней в точке PM-57 меньше, чем в точке PM-58. Наиболее жесткий спектр с параметром  $\eta = 1.65$  за верхней защитой наблюдается в точке PM-42 в начале канала № 8.

Самый мягкий спектр нейтронов формируется в точке PM-1 вблизи входа в кольцевой зал ускорителя, представляющего собой транспортный лабиринт, генерирующий спектр многократно рассеянных нейтронов с большим вкладом тепловых нейтронов. В этой точке п.д.н., по-видимому,

занижает амбиентную дозу нейтронов. В точке PM-68 с противоположной от PM-1 стороны боковой защиты дозы по показаниям двух дозиметров близки друг к другу, что свидетельствует о малом вкладе высокоэнергетических нейтронов. Более жесткий спектр в точке PM-66 с параметром  $\eta = 1.35$  объясняется, по нашему мнению, тем, что эта точка находится над открытым каналом № 2, через который от мишеней проникают высокоэнергетические частицы.

Временный радиобиологический стенд создан для изучения биологического действия ионов углерода. Измерения с помощью д.э.д. и п.д.н. проводились под двумя углами к пучку при облучении водного фантома полного поглощения ядрами углерода с энергией 450 МэВ/нуклон. Под углом 30° наблюдается максимальное значение параметра жесткости спектра:  $\eta = 2.05$ . Спектр нейтронов под углом 90° значительно мягче, о чем свидетельствует величина параметра  $\eta = 1.35$ . Нужно отметить, что условия облучения на стенде отличались от других точек отсутствием биологической защиты между источником нейтронов и точкой измерения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Пассивный дозиметр нейтронов для высокоэнергетических ускорителей разработан на основе оптимизационных расчетов энергетической зависимости чувствительности дозиметра и его чувствительности в полях нейтронов с протяженными спектрами. Расчетные данные для п.д.н. даны в сравнении с аналогичными результатами

для низкоэнергетического пассивного д.э.д. нейтронов.

Измерения в опорных полях нейтронов ОП-2017 показали удовлетворительное согласие с расчетными результатами. Установлены значения градуировочных коэффициентов для п.д.н. и д.э.д., которые использовались далее для определения AMBIENTНОГО эквивалента дозы нейтронов по показаниям дозиметров. Сравнительные экспериментальные исследования дозиметров проводились за верхней и боковой защитами протонного синхротрона У-70 ИФВЭ, а также на временном радиобиологическом стенде.

Диапазон параметра жесткости спектра нейтронов  $\eta = H_{\text{пдн}}^* / H_{\text{дэд}}^*$  составил 0.83–1.35 за боковой защитой, 1.38–1.65 за верхней защитой и 1.35–2.05 на временном радиобиологическом стенде. Полученные результаты позволяют сделать практические выводы относительно условий использования п.д.н. и д.э.д. за защитой У-70. Пассивный дозиметр нейтронов необходимо применять при измерениях за верхней защитой и в зонах каналов вывода вторичных частиц за боковой защитой. В условиях мягких спектров за боковой защитой низкоэнергетический д.э.д. дает адекватную оценку AMBIENTНОГО эквивалента дозы нейтронов.

Кроме У-70, п.д.н. и д.э.д. предполагается использовать также для мониторинга полей излучения циклотрона С-70 строящегося Радиоизотопного центра ядерной медицины [13].

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Соглашения о предоставлении субсидии от 27.06.2019 г. № 075.15.2019.1393, идентификатор соглашения RFMEFI60717X0193.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крупный Г.И., Пелешко В.Н., Расцветалов Я.Н., Савицкая Е.Н., Санников А.В. // Атомная энергия. 2009. Т. 107. № 3. С. 159.
2. Birattari C., Ferrari A., Nucetelli C., Pelliccioni M., Silari M. // Nucl. Instr. and Methods. 1990. V. A297. P. 250.  
[https://doi.org/10.1016/0168-9002\(90\)91373-J](https://doi.org/10.1016/0168-9002(90)91373-J)
3. Санников А.В., Пелешко В.Н., Савицкая Е.Н., Другаченко С.А., Сухарев М.М., Сухих С.Э. Препринт ИФВЭ 2008-1. Протвино, 2008.
4. Санников А.В., Лебедев В.Н., Кустарев В.Н., Савицкая Е.Н., Спириев Е.Г. // АНРИ. 2005. № 3. С. 50.
5. Комплекс автоматизированный индивидуального дозиметрического контроля АКИДК-301. Руководство по эксплуатации. Ангарск, 2001.
6. Savitskaya E.N., Sannikov A.V. // Atomic Energy. 2017. V. 122. P. 51.  
<https://doi.org/10.1007/s10512-017-0235-y>
7. Sannikov A.V., Savitskaya E.N. // Nucl. Instrum. and Methods. Phys. Res. 2000. V. A450. P. 127.  
[https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(99\)00795-0](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(99)00795-0)
8. Пелешко В.Н., Савицкая Е.Н., Санников А.В. // ПТЭ. 2015. № 4. С. 24.  
<https://doi.org/10.7868/S0032816215040084>
9. ICRP Publication 74. Ann. ICRP 26. Oxford: Pergamon Press, 1996.
10. Sannikov A.V., Savitskaya E.N. // Radiat. Prot. Dosim. 1997. V. 70. P. 383.  
<https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a031982>
11. Пелешко В.Н., Савицкая Е.Н., Санников А.В., Сухарев М.М., Музверов А.Г. // Атомная энергия. 2019. Т. 126. № 5. С. 275.
12. Свидетельство о поверке № 4.410-3002-16 “Установка поверочная нейтронного излучения УКПН-1М”. ФГУП ВНИИФТРИ. 23.12.2016 г.
13. Радиоизотопный центр ядерной медицины. Проектная документация 05-04/17-П-Ц70. ЗАО НПО “Спецпроект”, СПб., 2017.