



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»**

Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»

Препринт 2019–8

А.М. Мамаев, В.Н. Пелешко, Е.Н. Савицкая,
А.В. Санников, М.М. Сухарев, С.Э. Сухих

**Пассивный дозиметр нейтронов
с расширенным диапазоном энергий
для высокоэнергетических ускорителей**

Направлено в *ПТЭ*

Протвино 2019

Аннотация

Мамаев А.М., Пелешко В.Н., Савицкая Е.Н., Санников А.В., Сухарев М.М., Сухих С.Э. Пассивный дозиметр нейтронов с расширенным диапазоном энергий для высокоэнергетических ускорителей: Препринт НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ 2019-8. – Протвино, 2019. – 13 с., 3 рис., 3 табл., библиогр.: 13.

Представлен пассивный дозиметр нейтронов 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 сравниваются с экспериментальными результатами, полученными в низкоэнергетических опорных полях нейтронов и в высокоэнергетических полях нейтронов за защитой ускорителя ИФВЭ У-70.

Abstract

Mamaev A.M., Peleshko V.N., Savitskaya E.N., Sannikov A.V., Sukharev M.M., Sukhikh S.E. A Passive Neutron Dosimeter with Extended Energy Range for High Energy Accelerators: NRC «Kurchatov Institute» – IHEP Preprint 2019-8. – Protvino, 2019. – p. 13, figs. 3, tables 3, refs.: 13.

A passive neutron dosimeter for high-energy accelerators is presented. A slide of the DVGН-01 individual dosimeter, placed in the centre of polyethylene moderator, is used as a thermal neutron detector. The moderator includes a lead insertion, increasing dosimeter sensitivity to high-energy neutrons, and cadmium filter. Optimization calculations of the dosimeter design parameters have been performed in terms of the energy response dependence in the energy range from thermal to 1 GeV. The results of calculations are compared with the experimental data obtained in the low-energy neutron reference fields and in the high-energy neutron fields outside the shield of the U-70 IHEP accelerator.

Введение

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

В данной работе приведено описание конструкции пассивного дозиметра нейтронов (ПДН) 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 зависимость чувствительности в низкоэнергетической области.

В качестве детектора тепловых нейтронов аналогично низкоэнергетическому пассивному дозиметру нейтронов ДЭД [3] применяется слайд индивидуального дозиметра ДВГН-01 [4], что позволяет использовать стандартную калибровку и обсчет детекторов на автоматизированном комплексе АКИДК-301 [5]. Конструкция дозиметра была оптимизирована на основе расчетов по программам [6, 7] для поиска минимального разброса дозовой чувствительности в полях излучения со средней энергией спектра

нейтронов от 0,1 МэВ до 60 МэВ. Изготовлены опытные образцы дозиметров ПДН и проведены измерения в низкоэнергетических опорных полях нейтронов и высокоэнергетических полях за защитой ускорителя ИФВЭ У-70 на 70 ГэВ. Результаты сравниваются с расчетными данными и экспериментальными данными, полученными с помощью ДЭД.

Описание конструкции и функция чувствительности ПДН

За основу конструкции ПДН был принят один из вариантов конструкции дозиметра нейтронов для высокоэнергетических ускорителей [8] на основе сцинтилляционного детектора с литиевым стеклом. Выбран наиболее технологичный вариант полиэтиленового замедлителя в виде усеченного прямоугольного цилиндра со срезанными торцами цилиндра под углом 45° коническими поверхностями, обеспечивающий минимальную анизотропию чувствительности. Оптимальные размеры усеченного цилиндра – высота и диаметр равны 22,4 см. Внешние размеры цилиндрической свинцовой вставки составляют $\text{Ø}10 \times 10 \text{ см}^2$ и толщина 8 мм. Вместо борного фильтра [8] использован кадмиевый фильтр толщиной 0,5 мм с площадью перфорации 28%.

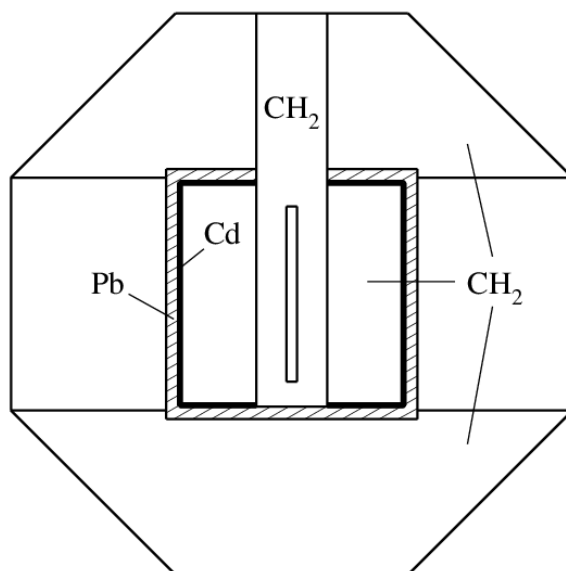


Рис. 1. Схематическое изображение конструкции ПДН в разрезе.

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

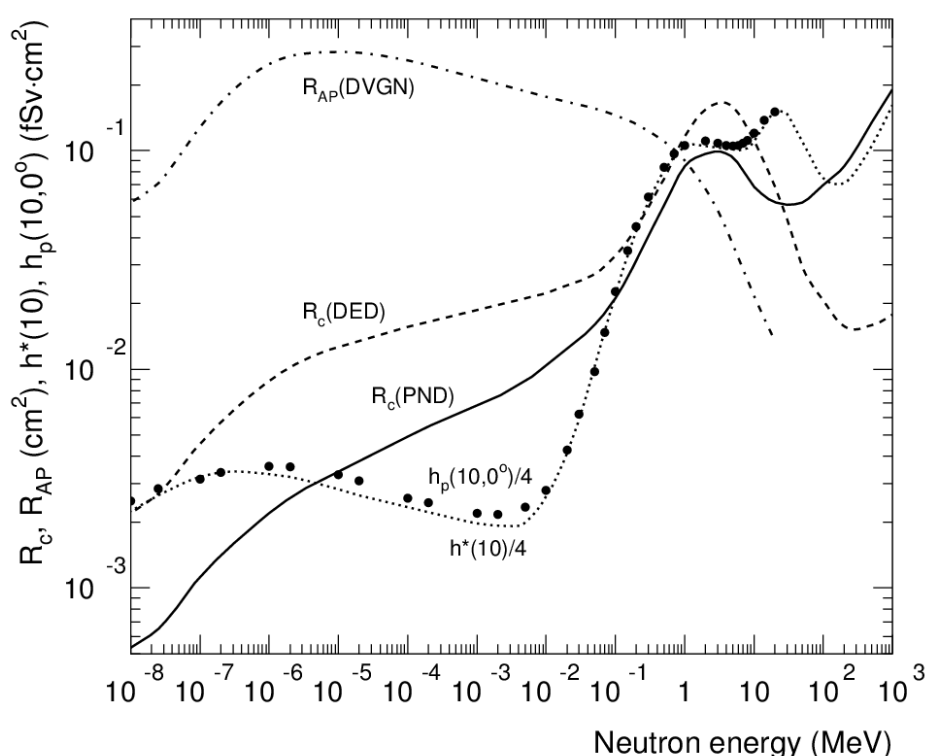


Рис. 2. R_c – функции чувствительности пассивных дозиметров нейтронов ПДН и ДЭД при изотропном облучении. R_{AP} – ФЧ при направленном облучении слайда в кассете ДВГН-01 на плоском фантоме из оргстекла. $h^*(10)$ и $h_p(10,0^\circ)$ – энергетические зависимости удельных амбиентного и индивидуального эквивалентов дозы нейтронов соответственно [9, 10].

Расчеты функции чувствительности (ФЧ) при изотропном облучении ПДН нейтронами проводились по программам [6, 7]. Методика расчета для пары ТЛД ${}^6\text{LiF}$ - ${}^7\text{LiF}$ описана в работе [4]. Полученные результаты $R_c(E)$ для описанной выше конструкции

ПДН в единицах (n,α) -реакций в ТЛД ${}^6\text{LiF}$ на единичный флюенс нейтронов показаны на рис. 2. Там же приведена ФЧ ДЭД, также рассчитанная по программам [6, 7], и энергетические зависимости удельных амбиентного эквивалента дозы нейтронов $h^*(10)$ [9, 10] и индивидуального эквивалента дозы нейтронов $h_p(10,0^\circ)$ [9].

ДЭД представляет собой слайд ДВГН-01, размещенный в центре шарового полиэтиленового замедлителя диаметром 25,4 см. Чувствительность ПДН по отношению к ДЭД к тепловым и промежуточным нейтронам до четырех раз ниже, к быстрым – в полтора раза ниже, а к высокоэнергетическим – до десяти раз выше. Различие ФЧ ПДН и ДЭД при высоких энергиях объясняется влиянием свинцового конвертера, а при низких энергиях – поглощением тепловых нейтронов кадмиевым фильтром ПДН. Несмотря на то, что последний снижает чувствительность ПДН, его применение позволяет значительно уменьшить разброс дозовой чувствительности, а также размеры и массу прибора [8].

Градуировочные коэффициенты ПДН и ДЭД для протяженных спектров нейтронов

Процедура оптимизации конструкции ПДН включала в себя свертку ФЧ $R_c(E)$ со спектрами $\varphi_i(E)$ из имеющейся у нас библиотеки нейтронных спектров и расчет градуировочных коэффициентов ПДН для этих спектров:

$$c_i^* = \frac{H_i^*(10)}{H_{ci}} = \frac{\int h^*(10)(E)\varphi_i(E)dE}{c \int R_c(E)\varphi_i(E)dE}, \text{ где} \quad (1)$$

$$c = \frac{H_p^{rp}(10,0^\circ)}{H_{ДВГН}^{rp}(AP)} = \frac{\int h_p(10,0^\circ)(E)\varphi_{rp}(E)dE}{\int R_{AP}(E)\varphi_{rp}(E)dE}. \quad (2)$$

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

Градуировочный коэффициент c по индивидуальному эквиваленту дозы нейтронов рассчитывался для условий стандартной градуировки слайдов в кассете

ДВГН-01 [4] на плоскопараллельном фантоме из оргстекла размерами $30 \times 30 \times 15 \text{ см}^3$ в поле нейтронов установки УКПН-1М с источником $^{239}\text{Pu} - \text{Be}$. Энергетическая зависимость чувствительности $R_{AP}(E)$ для условий градуировки рассчитана в настоящей работе по программе [6] и показана на рис. 2.

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

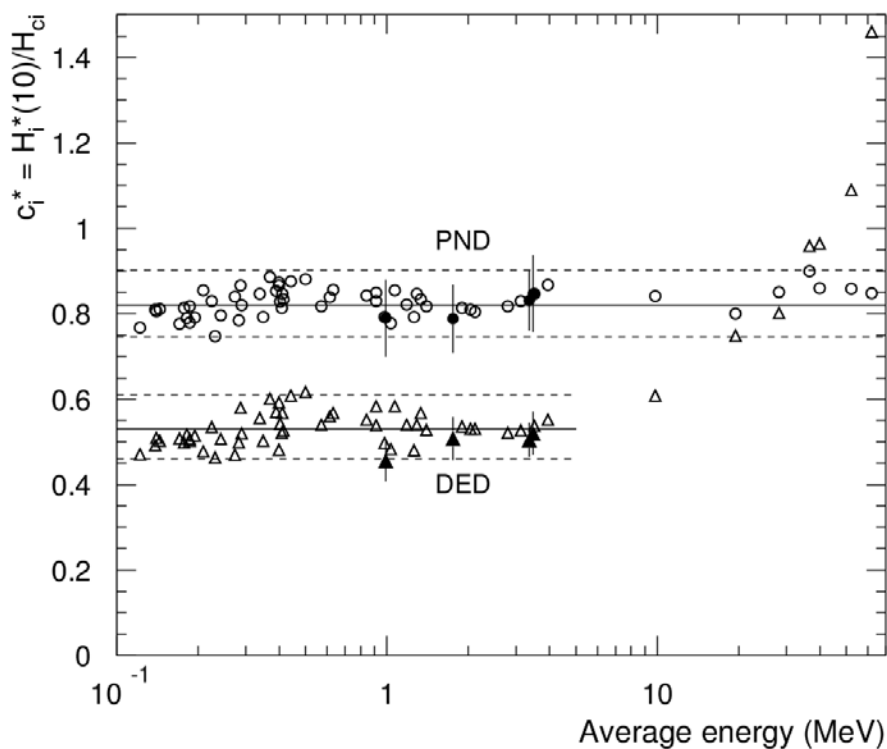


Рис. 3. Расчетные градуировочные коэффициенты пассивных дозиметров ДЭД (Δ) и ПДН (\circ) в зависимости от средней энергии спектра нейтронов. Сплошные и штриховые линии – средние величины с коридором неопределенностей. Экспериментальные значения c_i^* в опорных полях ОП-2017 – ДЭД (\blacktriangle) и ПДН (\bullet).

Выбор оптимальных параметров конструкции ПДН, включающих в себя внешние размеры полиэтиленового замедлителя, внешние размеры и толщину свинцового конвертера, а также площадь перфорации кадмиевого фильтра, делался из условия ми-

нимального разброса градуировочных коэффициентов c_i^* для спектров со средними энергиями надкадмиевых нейтронов от 0,1 МэВ до 60 МэВ. Результаты расчета градуировочных коэффициентов для описанной выше конструкции ПДН с функцией чувствительности $R_c(E)$ (рис. 2) приведены на рис. 3 в зависимости от средней энергии спектра. Там же показаны рассчитанные в настоящей работе значения c_i^* для ДЭД.

Результаты для средней энергии более 5 МэВ соответствуют высокоэнергетическим спектрам за защитой ускорителей. Остальные данные – низкоэнергетические спектры. Среднее значение \bar{c}^* для ДЭД в низкоэнергетических спектрах равно 0,53, разброс относительно среднего составляет $\pm 15\%$. В высокоэнергетических полях нейтронов значения c_i^* систематически возрастают с ростом средней энергии нейтронов, так как дозовая чувствительность ДЭД падает. Среднее значение \bar{c}^* для ПДН равно 0,82 с разбросом $\pm 10\%$ во всем диапазоне энергий. Уменьшение разброса чувствительности ПДН по сравнению с ДЭД для низкоэнергетических нейтронов достигается за счет применения кадмиевого фильтра, а для высокоэнергетических нейтронов – благодаря свинцовому конвертеру.

Градуировочные коэффициенты ПДН и ДЭД в опорных полях нейтронов ОП-2017

Для проверки расчетных данных, приведенных на рис. 3, были выполнены измерения чувствительности ПДН и ДЭД в опорных полях нейтронов ИФВЭ ОП-2017 [11] на основе радионуклидного источника $^{239}\text{Pu} - \text{Be}$. Результаты измерений представлены на рис. 3 и в табл. 1 в виде градуировочных коэффициентов $c_i^* = H_i^*(10) / H_{ci}$. Расстояние между центрами источника и детектора составляло 1 м во всех случаях, кроме поля № 4. 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 АКЖДК-301 [5] ($1\sigma = 7,5\%$) 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 ДЭД и ПДН находятся в пределах коридоров расчетных значений для разных спектров. Результаты измерений c^* для ДЭД и ПДН в градуировочно-поверочном поле УКПН-1М (№ 2) близки к средним расчетным величинам. Эти экспериментальные значения ($c_{\text{ДЭД}}^* = 0,51$ и $c_{\text{ПДН}}^* = 0,83$) использовались далее в расчетах амбиентного эквивалента дозы нейтронов по показаниям ДЭД и ПДН за защитой ускорителя: $H^*(10) = c^* \cdot H_c$.

Таблица 1. Экспериментальные значения градуировочных коэффициентов $c_i^* = H_i^*(10)/H_{ci}$ для ДЭД и ПДН в опорных полях нейтронов ОП-2017.

№	Описание	\bar{E} , МэВ	c_i^*	
			ДЭД	ПДН
1	Источник $^{239}\text{Pu-Be}$ без защиты	3,47	$0,52 \pm 0,05$	$0,85 \pm 0,09$
2	Источник в градуировочно-поверочной установке УКПН-1М	3,36	$0,51 \pm 0,04$	$0,83 \pm 0,07$
3	Источник в градуировочно-поверочной установке УКПН-1М с тепловой насадкой	1,75	$0,51 \pm 0,05$	$0,79 \pm 0,08$
4	Источник за поглощающим конусом на расстоянии 1,5 м	0,99	$0,46 \pm 0,05$	$0,79 \pm 0,09$

Анизотропия чувствительности ПДН

В поле УКПН-1М (№ 2) была проверена также анизотропия дозовой чувствительности дозиметра ПДН при облучении в различных положениях относительно стандартного. Стандартным являлось облучение сбоку с расположением слайда перпендикулярно пучку и детекторами, направленными к пучку. Выполнено также: 1) облучение сбоку с детекторами, направленными от пучка; 2) то же, слайд параллельно пучку. Кроме экспозиций со стороны боковой поверхности ПДН проведены также облучения:

3) сверху и 4) снизу. В этих случаях ориентация слайда не имеет значения из-за аксиальной симметрии. Результаты измерений показаны в табл. 2. Результаты в положениях 1), 2) и 3) согласуются с данными для стандартного положения в пределах 1%. При облучении снизу дозовая чувствительность на 7% ниже. Это отклонение находится, однако, в пределах погрешности измерений (табл. 1).

Таблица 2. Дозовая чувствительность ПДН $r_i^* = H_{ci}^* / H_i^*(10)$ при облучении в различных положениях относительно стандартного (облучение сбоку, детекторы направлены к пучку).

№	Условия облучения	r_i^* / r_0^*
1	Облучение сбоку, детекторы от пучка	1,01
2	Облучение сбоку, слайд параллельно пучку	0,99
3	Облучение сверху	0,99
4	Облучение снизу	0,93

Экспериментальные исследования относительной чувствительности ПДН и ДЭД за защитой протонного синхротрона ИФВЭ У-70

Сравнительные измерения с помощью ПДН и ДЭД проводились, как правило, при одновременном облучении дозиметров на подставках высотой 1 м на расстоянии ~0,5 м друг от друга и на расстоянии ~1 м от ближайшего радиационного монитора (РМ), находившегося на полу. Точки измерения разделены на три группы: а) верхняя защита; б) боковая защита; в) временный радиобиологический стенд (ВРБС) для изучения биологического действия ионов углерода. Значения амбиентного эквивалента дозы нейтронов $H^*(10)$ по показаниям ДЭД и ПДН 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 в дальнейшем.

Точка РМ-58 за верхней защитой представляет для нас особый интерес, так как при работе внутренних 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 ДЭД и ПДН: а) одновременное облучение и б) раздельное облучение с мониторингом по показаниям РМ. Полученные результаты жесткости спектра практически одинаковы в обоих случаях, среднее значение равно $\eta = H_{\text{ПДН}}^* / H_{\text{ДЭД}}^* = 1,52$.

Таблица 3. Результаты сравнительных измерений амбиентного эквивалента дозы нейтронов дозиметрами ДЭД и ПДН в экспериментальном зале протонного синхротрона У-70.

Условия измерений	Точка	Источник нейтронов или расположение точки измерения	$H^*(10)$, мЗв		$\eta = \frac{H_{\text{ПДН}}^*}{H_{\text{ДЭД}}^*}$
			ДЭД ^{xx}	ПДН ^{xx}	
Верхняя защита	РМ-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
	РМ-57	Мишени 24+27	1,41	2,27	1,61
		Мишень 27	1,95	2,79	1,43
	РМ-42	Верхняя защита 8 канала	0,449	0,742	1,65
Боковая защита	РМ-1	Вход в кольцевой зал ускорителя	0,963	0,8	0,83
	РМ-68	Вблизи домика 26	0,334	0,375	1,12
	РМ-66	Переход через 2 канал	0,617	0,83	1,35
ВРБС ^x	30° к пучку	Водный фантом, облучаемый ионами ¹² C 450 МэВ/нуклон	3,54	7,26	2,05
	90° к пучку	То же	2,03	2,74	1,35

^x временный радиобиологический стенд

^{xx} $H_{\text{ДЭД}}^* = 0,51 \cdot H_c$, $H_{\text{ПДН}}^* = 0,83 \cdot H_c$

В работе [1] вблизи 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 использования этого поля в качестве высокоэнергетического опорного поля нейтронного излучения. В соответствии с полученными из спектра данными вклад высокоэнергетических нейтронов с $E > 20$ МэВ в AMBIENTНЫЙ эквивалент дозы нейтронов составляет более половины (56%). Рассчитанное по спектру [1] отношение AMBIENTНЫХ доз по показаниям рассматриваемых дозиметров равно $\eta = 1,54$, что близко к результатам измерений (табл. 3).

В той же точке РМ-58 проведены измерения при одной работающей мишени 27. В этом случае параметр жесткости спектра нейтронов снижается до 1,38. Возможным объяснением является то, что мишень 27 находится значительно ближе к РМ-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 ПДН/ДЭД в точке РМ-57 при работе внутренних мишеней 24 и 27 равно 1,61, что несколько больше соответствующей величины для точки РМ-58. В случае одной работающей мишени 27 жесткость спектра также немного больше, чем в точке РМ-58 при тех же условиях. Это можно объяснить тем, что расстояние от мишени 27 до РМ-57 на 22 метра больше, чем до РМ-58, в связи с чем углы между пучком протонов и направлениями от мишеней в точке РМ-57 меньше, чем в точке РМ-58. Наиболее жесткий спектр с параметром $\eta = 1,65$ за верхней защитой наблюдается в точке РМ-42 в начале канала 8.

Самый мягкий спектр нейтронов формируется в точке РМ-1 вблизи входа в кольцевой зал ускорителя, представляющего собой транспортный лабиринт, генерирующий спектр многократно рассеянных нейтронов с большим вкладом тепловых нейтронов. В этой точке ПДН, возможно, занижает AMBIENTНУЮ дозу нейтронов. В точке РМ-68 с противоположной от РМ-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 РМ-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 (ВРБС) создан для изучения биологического действия ионов углерода. Измерения с помощью ДЭД и ПДН проводились под двумя углами к пучку при облучении водного фантома полного поглощения ядрами углерода энергией 450 МэВ. 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 ВРБС отличались от других точек отсутствием биологической защиты между источником нейтронов и точкой измерения.

Заключение

Пассивный дозиметр нейтронов (ПДН) для высокоэнергетических ускорителей разработан на основе оптимизационных расчетов энергетической зависимости чувствительности дозиметра и его чувствительности для протяженных спектров нейтронов. Расчетные данные для ПДН сравниваются с аналогичными результатами для низкоэнергетического пассивного дозиметра нейтронов ДЭД.

Измерения в опорных полях нейтронов ОП-2017 показали удовлетворительное согласие с расчетными результатами. Установлены значения градуировочных коэффициентов для ПДН и ДЭД, которые использовались далее в определении амбиентного эквивалента дозы нейтронов. Сравнительные экспериментальные исследования дозиметров проводились за верхней и боковой защитами протонного синхротрона ИФВЭ У-70, а также на временном радиобиологическом стенде для изучения биологического действия ионов углерода.

Диапазон параметра жесткости спектра нейтронов $\eta = H_{\text{ПДН}}^* / H_{\text{ДЭД}}^*$ составляет 0,83-1,35 за боковой защитой, 1,38-1,65 за верхней защитой и 1,35-2,05 на ВРБС. Полученные результаты позволяют сделать практические выводы относительно условий использования ПДН и ДЭД за защитой У-70. ПДН необходимо применять в измерениях

за верхней защитой и в зонах каналов вывода вторичных частиц за боковой защитой. В других условиях мягких спектров за боковой защитой низкоэнергетический дозиметр ДЭД дает адекватную оценку амбиентного эквивалента дозы нейтронов.

Кроме У-70, пассивные дозиметры нейтронов предполагается использовать также для мониторинга полей излучения циклотрона С-70 строящегося Радиоизотопного центра ядерной медицины [13].

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

Список литературы

- [1] Г.И. Крупный, В.Н. Пелешко, Я.Н. Расцветалов и др. *Высокоэнергетическое опорное поле нейтронного излучения*. АЭ **107**, 159-165 (2009).
- [2] С. Birattari, A. Ferrari, C. Nuccetelli et al. *An Extended Range Neutron Rem Counter*. Nucl. Instr. Meth. **A297**, 250-257 (1990).
- [3] А.В. Санников, В.Н. Пелешко, Е.Н. Савицкая и др. *Дозиметр эффективной дозы смешанного излучения*. Препринт ИФВЭ 2008-1, Протвино, 2008.
- [4] А.В. Санников, В.Н. Лебедев, В.Н. Кустарев, Е.Н. Савицкая, Е.Г. Спиров. *Индивидуальный дозиметр смешанного излучения ДВГН-01: разработка и исследование характеристик*. АНРИ № 3, 50-59 (2005); препринт ИФВЭ 2005-6, Протвино, 2005.
- [5] *Комплекс автоматизированный индивидуального дозиметрического контроля АКИДК-301*. Руководство по эксплуатации. Ангарск, 2001.
- [6] Е.Н. Савицкая, А.В. Санников. *Программа FAN15 для расчета переноса низкоэнергетических фотонов и нейтронов в произвольных средах*. Препринт ИФВЭ 2016-4, Протвино, 2016; Atomic Energy **122**, 51-57 (2017).
- [7] A.V. Sannikov, E.N. Savitskaya. *Physics of the HADRON code: recent status and comparison with experiment*. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. **A450**, 127-137 (2000).

- [8] В.Н. Пелешко, Е.Н. Савицкая, А.В. Санников. *Оптимизация конструкции дозиметра нейтронов с расширенным диапазоном энергий для высокоэнергетических ускорителей*. Препринт ИФВЭ 2014-4, Протвино, 2014; ПТЭ **4**, 24-31 (2015).
- [9] ICRP Publication 74. *Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation*. Ann. ICRP **26**. Oxford, Pergamon Press, 1996.
- [10] A.V. Sannikov and E.N. Savitskaya. *Ambient Dose and Ambient Dose Equivalent Conversion Factors for High Energy Neutrons*. Radiat. Prot. Dosim. **70**, 383-386 (1997).
- [11] В.Н. Пелешко, Е.Н. Савицкая, А.В. Санников, М.М. Сухарев, А.Г. Музоверов. *Опорные поля нейтронов на основе радионуклидного источника ^{239}Pu -Be*. Препринт ИФВЭ 2018-11, Протвино, 2018.
- [12] Свидетельство о поверке № 4.410-3002-16 «Установка поверочная нейтронного излучения УКПН-1М». ФГУП ВНИИФТРИ. 23.12.2016.
- [13] *Радиоизотопный центр ядерной медицины*. Проектная документация 05-04/17-П-Ц70. ЗАО НПО «Спецпроект», Санкт-Петербург, 2017.

Рукопись поступила 16 сентября 2019 г.

А.М. Мамаев, В.Н. Пелешко, Е.Н. Савицкая, А.В. Санников, М.М. Сухарев, С.Э. Сухих

Пассивный дозиметр нейтронов с расширенным диапазоном энергий для высокоэнергетических ускорителей

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

Подписано к печати 19.09.2019. Формат 60 × 84/16. Цифровая печать.

Печ.л. 1. Уч.–изд.л. 1,44. Тираж 80. Заказ 8. Индекс 3649.

НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ

142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, 1

www.ihep.ru; библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2019-8,
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, 2019
