



Государственный научный центр Российской Федерации –
Институт физики высоких энергий
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»

ИФВЭ 2014–4
ОРИ

В.Н. Пелешко, Е.Н. Савицкая, А.В. Санников

**Оптимизация конструкции дозиметра нейтронов
с расширенным диапазоном энергий
для высокоэнергетических ускорителей**

Направлено в *ПТЭ*

Протвино 2014

Аннотация

Пелешко В.Н., Савицкая Е.Н., Санников А.В. Оптимизация конструкции дозиметра нейтронов с расширенным диапазоном энергий для высокоэнергетических ускорителей. Препринт ИФВЭ 2014-4. – Протвино, 2014. – 17 с., 13 рис., 3 табл., библиогр.: 22.

Рассмотрены различные варианты конструкции дозиметра нейтронов для высокоэнергетических ускорителей на основе быстрого сцинтилляционного детектора тепловых нейтронов с литиевым стеклом. Детектор размещается в центре полиэтиленового замедлителя в виде шара, цилиндра либо усеченного цилиндра со свинцовой вставкой для повышения чувствительности дозиметра к нейтронам с энергией выше 20 МэВ. Выполнены оптимизационные расчеты параметров конструкций с точки зрения угловой и энергетической зависимости чувствительности в диапазоне энергий от тепловой до 1 ГэВ. Лучшие результаты получены для вариантов, включающих наряду со свинцовой вставкой также борный фильтр. В этом случае достигается наименьший вес прибора. Дозиметр разработан для применения в системах радиационного контроля ускорительного комплекса У-70 ИФВЭ и других ускорителей. Он может использоваться также за защитами реакторов и других низкоэнергетических установок.

Abstract

Peleshko V.N., Savitskaya E.N., Sannikov A.V. Optimization of the Neutron Dosimeter Design with Extended Energy Range for High Energy Accelerators. IHEP Preprint 2014-4. – Protvino, 2014. – p. 17, fig. 13, tables 3, refs.: 22.

Different variants of the neutron dosimeter design for high energy accelerators based on fast scintillation thermal neutron detector with lithium glass have been considered. Detector is placed in the centre of polyethylene moderator in the form of sphere, cylinder or truncated cylinder with lead insertion for increasing dosimeter sensitivity to neutrons with energies above 20 MeV. Optimization calculations of the design parameters from the angular and energy response dependence point of view have been performed in the energy range from thermal to 1 GeV. The best results have been obtained for the versions including boron filter along with the lead insertion. The least weight of a device is achieved in this case. The dosimeter is developed for use in radiation monitoring systems of IHEP U-70 accelerator complex and other accelerators. It can be also used outside the shields of reactors and other low energy facilities.

© Государственный научный центр Российской Федерации-
Институт физики высоких энергий
НИЦ «Курчатовский институт», 2014

Введение

Измерение амбиентного эквивалента дозы нейтронов $H^*(10)$ в радиационном контроле на ядерных установках проводится, как правило, с помощью детекторов тепловых нейтронов, размещенных в шаровых или цилиндрических полиэтиленовых замедлителях диаметром 10-12 дюймов. Такие дозиметры имеют ограниченный диапазон измеряемых энергий (менее 20 МэВ), что создает серьезные проблемы при использовании за защитами высокоэнергетических ускорителей, где вклад в дозу высокоэнергетических нейтронов с энергией выше 20 МэВ может составлять 50% и более [1]. В качестве детекторов тепловых нейтронов обычно используются газоразрядные счетчики с наполнением ^3He или BF_3 . Разрешающее время таких счетчиков находится в микросекундном диапазоне, поэтому они могут занижать дозу также из-за просчетов в условиях импульсных полей излучения и больших мощностей дозы за защитой ускорителей.

Для повышения чувствительности дозиметров в области высоких энергий было предложено использовать полиэтиленовые замедлители со свинцовыми вставками, в которых происходит размножение и замедление нейтронов в реакциях $(n,2n)$, $(n,3n)$ и т.д. В качестве примеров реализации этой идеи можно привести дозиметры [2], [3]. Их недостатками являются большая анизотропия чувствительности, достигающая коэффициента 2 и более при энергиях ниже 0,1 МэВ, а также большой вес приборов, что связано с использованием цилиндрических полиэтиленовых замедлителей и борных счетчиков достаточно больших размеров. Так, вес дозиметра [3] с BF_3 -счетчиком размерами $\varnothing 31 \times 115$ мм составляет около 17 кг.

Целью данной работы была расчетная оптимизация конструкции нейтронного дозиметра для высокоэнергетических ускорителей на основе быстрого сцинтилляционного детектора с литиевым стеклом в полиэтиленовом замедлителе со свинцовым конвертером с точки зрения энергетической и угловой зависимости чувствительности, а также минимального веса прибора. Литиевое стекло было выбрано на основе анализа литературных данных и выполненных расчетов [4] в качестве оптимального варианта благодаря небольшому времени высвечивания (75 нс), высокой эффективности регистрации тепловых нейтронов и хорошей дискриминации γ -квантов. Все расчеты выполнены для стекла GS-20 фирмы Saint Gobain Crystals [5] с содержанием 6,6% ^6Li по массе размерами $\varnothing 25 \times 1$ мм. Аппаратурные спектры от тепловых нейтронов и γ -квантов ^{60}Co в стекле GS-20 толщиной 1 мм [5] представлены на рис. 1.

Расчеты проводились с использованием новой универсальной версии FAN12 [6] программы переноса фотонов и нейтронов с энергиями ниже 20 МэВ FANEUT [7], объединенной с программой переноса высокоэнергетических адронов HADRON (версия HADR99 [8]) в единый комплекс H99F12. Основным отличием программы FAN12 от предыдущей версии является широкое использование современных баз данных по полным и дифференциальным сечениям взаимодействия нейтронов с ядрами (ENDF/B-VI [9]) и фотонов с атомами (EPDL97 [10]). Статистическая погрешность представленных в работе расчетных результатов во всех случаях составляла менее 1,5%.

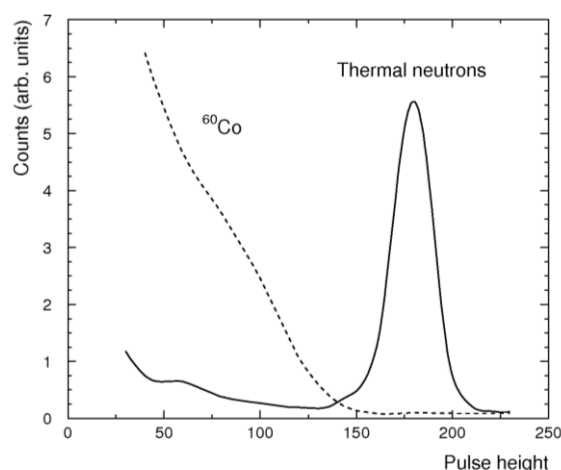


Рис. 1. Аппаратурные спектры от тепловых нейтронов и γ -квантов ^{60}Co в стекле GS-20 толщиной 1 мм [5].

Дозиметр нейтронов со сцинтиллятором из литиевого стекла в шаровом полиэтиленовом замедлителе со свинцовым конвертером

На рис. 2 представлена рассчитанная по программе H99F12 функция чувствительности (ФЧ) детектора с литиевым стеклом, помещенным в центр полиэтиленового шара диаметром 10 дюймов (25,4 см), в условиях изотропного облучения в сравнении с энергетической зависимостью удельного амбиентного эквивалента дозы $h^*(10)$ [11], [12]. Плотность полиэтилена в расчетах принималась равной $0,95 \text{ г/см}^3$. Здесь и далее на рисунках функции чувствительности нормированы, как правило, на значение $h^*(10)$ при энергии 2 МэВ для удобства сравнения ФЧ различных дозиметров. Результаты нашего расчета хорошо согласуются с расчетными данными [13] для детектора ${}^6\text{LiI}$ размерами $\varnothing 4 \times 4 \text{ мм}$ в той же геометрии, полученными по программе MCNP [14]. Можно видеть, что обе ФЧ резко спадают при энергии нейтронов выше 10 МэВ, в отличие от энергетической зависимости амбиентного эквивалента дозы.

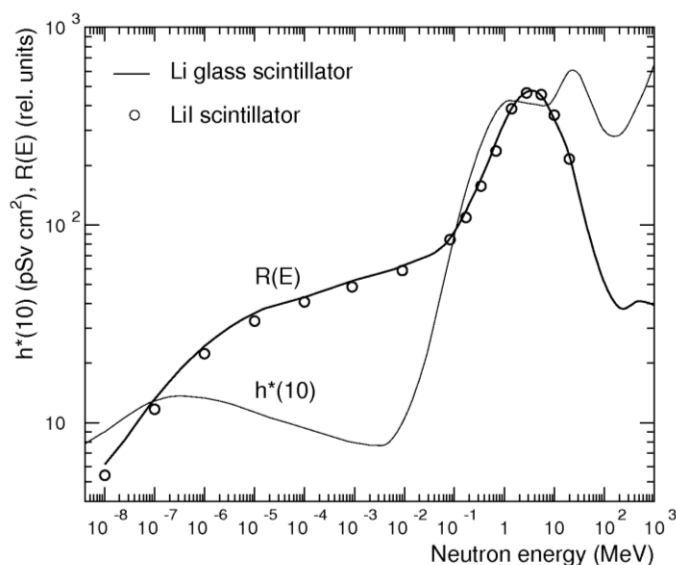


Рис. 2. Функции чувствительности детекторов нейтронов со сцинтилляторами из литиевого стекла размерами $\varnothing 25 \times 1 \text{ мм}$ (данная работа) и ${}^6\text{LiI}$ ($\varnothing 4 \times 4 \text{ мм}$) [13] в шаровом полиэтиленовом замедлителе диаметром 10". Обе ФЧ нормированы на значение $h^*(10)$ при энергии 2 МэВ.

Для увеличения вероятности регистрации высокоэнергетических нейтронов размещали в замедлителе цилиндрический слой свинца (Pb-конвертер) и проверяли влияние его толщины и внешних размеров на функцию чувствительности. Радиус полиэтиленового шара увеличивали на толщину свинцового слоя. Схема дозиметра со свинцовой вкладкой представлена на рис. 3. Были рассмотрены три варианта Pb-конвертера с внешними размерами $\varnothing 8 \times 8$, $\varnothing 10 \times 10$ и $\varnothing 12 \times 12$ см. Для каждого из этих вариантов рассчитывались ФЧ при различных толщинах свинца.

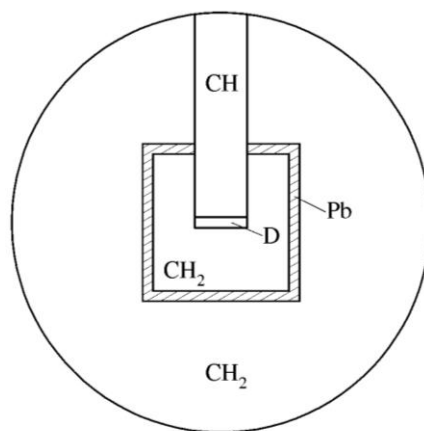


Рис. 3. Схема дозиметра нейтронов со свинцовым конвертером. D – сцинтиллятор из литиевого стекла, CH₂ – полиэтиленовый замедлитель, CH – световод из оргстекла, Pb – цилиндрическая свинцовая вставка.

Далее процедура оптимизации включала в себя свертку ФЧ со спектрами из имеющейся у нас библиотеки нейтронных спектров и расчет отношений дозовой чувствительности r_i для каждого i -го спектра и $r_{гр}$ для градуировочного спектра:

$$k_i = r_i / r_{гр} = \frac{\int R(E) \Phi_i(E) dE}{\int h^*(10)(E) \Phi_i(E) dE} \bigg/ \frac{\int R(E) \Phi_{гр}(E) dE}{\int h^*(10)(E) \Phi_{гр}(E) dE}, \quad (1)$$

где $\Phi_{гр}(E)$ – спектр нейтронов [16] градуировочно-поверочной установки УКПН-1М с источником $^{239}\text{Pu-Be}$, используемой в ИФВЭ. Библиотека нейтронных спектров включает в себя низкоэнергетические спектры за защитами реакторов, фильтрованные и нефильтрованные спектры радионуклидных источников [15]-[19], а также высокоэнергетические спектры за защитами ускорителей ИФВЭ и ЦЕРН [1], [20], [21], при этом из

имеющихся источников брались только спектры с компонентом тепловых нейтронов. Не использовались спектры за стальными защитами, нехарактерными для условий работы персонала

Выбор оптимальной толщины свинца для трех вариантов внешних размеров Pb-конвертера делался из условия минимального отклонения значений k_i от единицы для высокоэнергетических нейтронных спектров при сохранении относительной чувствительности в низкоэнергетической области. Оптимальными вариантами Pb-конвертера являются следующие: $\varnothing 8 \times 8 \times 1,3$ см, $\varnothing 10 \times 10 \times 0,8$ см и $\varnothing 12 \times 12 \times 0,7$ см. Геометрические размеры некоторых из рассмотренных вариантов конструкции дозиметра приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Размеры (см) шаровых CH_2 -замедлителей и цилиндрических Pb-конвертеров, функции чувствительности которых показаны на рис. 4.

Обозначение на рис. 4	Pb-конвертер			диаметр CH_2 - замедлителя
	диаметр	высота	толщина	
без Pb	0	0	0	25,4
Pb($\varnothing 8 \times 8 \times 0,7$)	8	8	0,7	26,8
Pb($\varnothing 8 \times 8 \times 1,3$)	8	8	1,3	28,0
Pb($\varnothing 10 \times 10 \times 0,8$)	10	10	0,8	27,0
Pb($\varnothing 12 \times 12 \times 0,7$)	12	12	0,7	26,8
Pb($\varnothing 12 \times 12 \times 1$)	12	12	1	27,4

Полученные для этих вариантов ФЧ представлены на рис. 4 в сравнении с ФЧ для замедлителя без свинца (сплошная жирная линия). Нормированные на $h^*(10)$ при энергии 2 МэВ зависимости для трех выбранных вариантов практически не отличаются друг от друга во всем диапазоне энергий от тепловой до 1 ГэВ. Различия в абсолютных единицах также невелики.

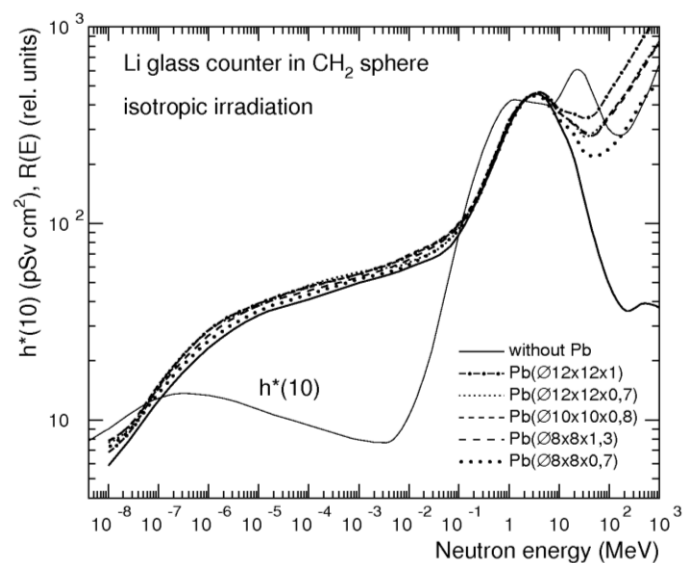


Рис. 4. Функции чувствительности дозиметра с литиевым стеклом со свинцовыми вставками и CH_2 -замедлителями различных размеров. Все ФЧ нормированы на значение $h^*(10)$ при энергии 2 МэВ.

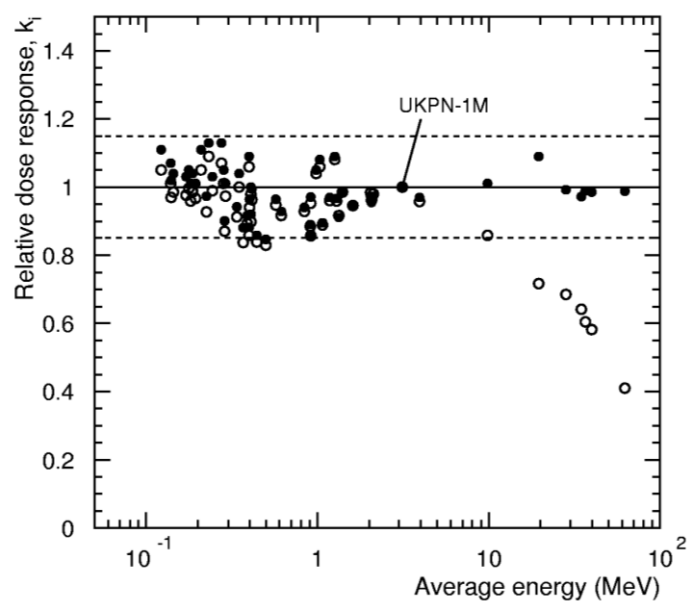


Рис. 5. Дозовая чувствительность дозиметра с литиевым стеклом и Pb-конвертером размерами $\text{Ø}10 \times 10 \times 0,8$ см в CH_2 -замедлителе $\text{Ø}27$ см (Pв_s) (●) в зависимости от средней энергии спектра нейтронов. Светлые кружки – данные для CH_2 -замедлителя $\text{Ø}25,4$ см без Pb-конвертера.

Относительная дозовая чувствительность $k_i = r_i / r_{гр}$ дозиметра с Pb-конвертером размерами $\varnothing 10 \times 10 \times 0,8$ см в шаровом СН₂-замедлителе диаметром 27 см (условное обозначение – Pb_s) приведена на рис. 5 в зависимости от средней энергии спектра надкадмиевых нейтронов в сравнении с данными для СН₂-замедлителя $\varnothing 25,4$ см без свинцовой вставки. Во втором случае занижение дозы нейтронов в наиболее жестком спектре достигает 60%. Отклонение значений k_i от единицы для дозиметра с Pb-конвертером не превышает 15% в широком диапазоне жесткостей нейтронных спектров со средними энергиями от 0,1 до 60 МэВ. В табл. 2 приведены характеристики оптимальных вариантов свинцовой вставки, показывающие, что дозиметр Pb_s имеет преимущество меньшей массы (рассчитывалась в геометрии рис. 3, то есть без учета кожуха ФЭУ, делителя и других внешних деталей конструкции).

Таблица 2.

Характеристики дозиметров с оптимальными размерами цилиндрических Pb-конвертеров в шаровых полиэтиленовых замедлителях в сравнении с дозиметром без Pb-конвертера.

Условное обозначение	Размеры Pb-конвертера (см)	Диаметр СН ₂ -замедлителя (см)	Диапазон отн. чувств-ти	Масса Pb-конвертера (кг)	Масса всей конструкции (кг)
	без Pb	25,4	0,41 – 1,09	0	8,2
	$\varnothing 8 \times 8 \times 1,3$	28,0	0,83 – 1,10	3,1	13,8
Pb_s	$\varnothing 10 \times 10 \times 0,8$	27,0	0,85 – 1,13	3,6	13,1
	$\varnothing 12 \times 12 \times 0,7$	26,8	0,84 – 1,12	4,7	13,9

Дозиметр нейтронов с шаровым полиэтиленовым замедлителем, свинцовым конвертером и борным фильтром

Для улучшения энергетической зависимости чувствительности детектора тепловых нейтронов в полиэтиленовом замедлителе в области промежуточных энергий Андерсон и Браун [22] предложили размещать кадмиевый или борный поглотитель тепловых нейтронов внутри полиэтиленового замедлителя на некотором расстоянии от детектора. Такие дозиметры, особенно с кадмиевыми поглотителями, широко используются в радиационном контроле. В дозиметре на основе сцинтилляционного детектора с литиевым стеклом применение кадмия нежелательно, так как в результате поглощения

нейтронов при (n, γ) -захвате в кадмии появляется мощный источник γ -квантов с энергиями вплоть до нескольких МэВ. Возьмем за основу дозиметр АВН (Andersson-Braun High-energy) [3], в котором применен борный поглотитель.

В его конструкции используется BF_3 -счетчик размерами $\text{Ø}3,1 \times 11,5$ см в цилиндрическом полиэтиленовом замедлителе $\text{Ø}23,5 \times 26,5$ см с Pb-конвертером $\text{Ø}9,7 \times 17,3 \times 1$ см. 6 мм полиэтилена под свинцовой вставкой заменены борированной синтетической резиной (4,22% ^{10}B по массе) плотностью $1,3 \text{ г/см}^3$ с рядом отверстий, покрывающих 22% площади. В оптимизационных расчетах дозиметра нейтронов на основе сцинтиляционного детектора с литиевым стеклом в шаровом полиэтиленовом замедлителе со свинцовым конвертером и борным фильтром взята борированная резина той же толщины, состава и плотности. Схема такого дозиметра приведена на рис. 6. Варьировались диаметр замедлителя, толщина Pb-конвертера с внешними размерами $\text{Ø}10 \times 10$ см и площадь отверстий в борированной резине. В результате получен следующий оптимальный результат (вариант PbB_s): диаметр замедлителя – 23 см, размеры Pb-конвертера – $\text{Ø}10 \times 10 \times 0,9$ см, площадь перфорации борного фильтра – 30%.

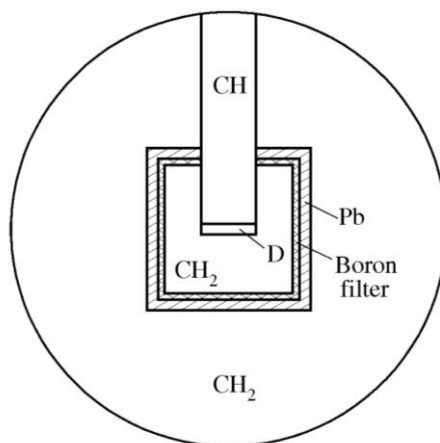


Рис. 6. Схема дозиметра нейтронов с шаровым полиэтиленовым замедлителем, свинцовым конвертером и перфорированным борным фильтром.

Функция чувствительности такого дозиметра показана на рис. 7 в сравнении с ФЧ для оптимального варианта без борного фильтра и ФЧ АВН, рассчитанной в работе [3]

для условий бокового облучения. Нормированные на $h^*(10)$ при $E=2$ МэВ ФЧ дозиметров с борными фильтрами близки друг к другу, несмотря на значительные различия конструкций и размеров. Их дозовые чувствительности для различных нейтронных спектров приведены на рис. 8. Видно, что вариант PbB_s имеет несколько меньший разброс чувствительности (0,83 – 1,08) по сравнению с АВН (0,70 – 1,00), но главным его преимуществом являются значительно меньшие размеры и масса (9,7 кг по сравнению с 17 кг для АВН).

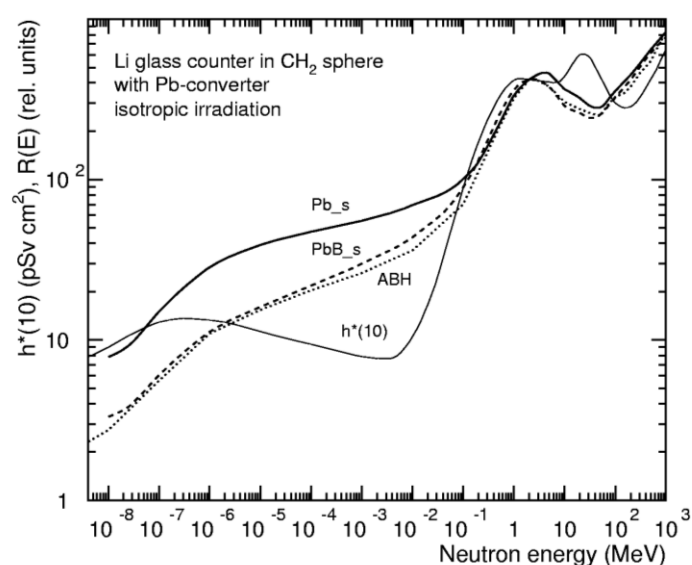


Рис. 7. Функции чувствительности дозиметров Pb_s и PbB_s в сравнении с ФЧ АВН [3]. Все ФЧ нормированы на значение $h^*(10)$ при энергии 2 МэВ.

Этот выигрыш достигается благодаря малым размерам детектора и, соответственно, значительно меньшим размерам свинцовой вставки и полиэтиленового замедлителя. Применение борного фильтра позволяет также уменьшить на 3,4 кг вес дозиметра Pb_s с близким Pb-конвертером, но без фильтра. ФЧ рассмотренных конструкций дозиметров в сравнении с АВН в абсолютных единицах представлены на рис. 9. Среднее отношение чувствительности дозиметров без борного фильтра и с фильтром для протяженных спектров составляет около двойки. ФЧ дозиметров PbB_s и АВН близки друг к другу.

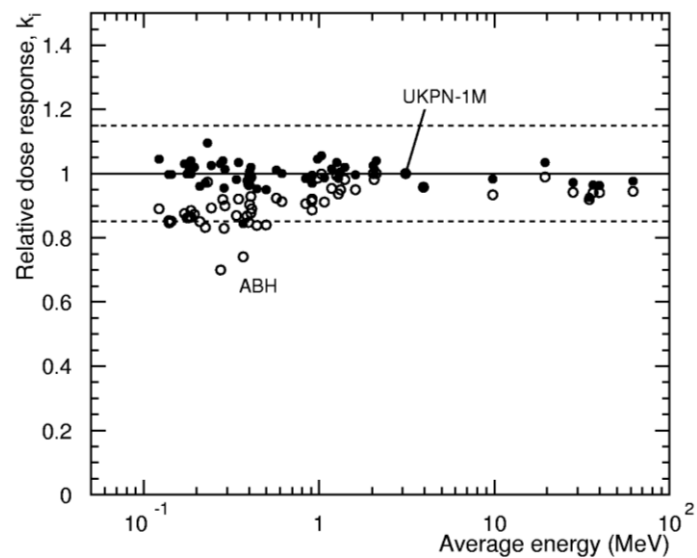


Рис. 8. Дозовая чувствительность дозиметра PbB_s (●) в зависимости от средней энергии спектра нейтронов. Светлые кружки – данные для дозиметра ABH [3].

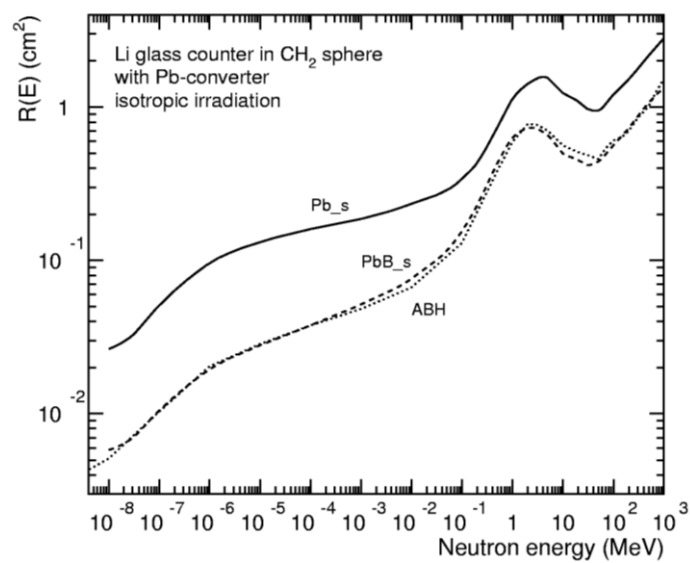


Рис. 9. Функции чувствительности дозиметров Pb_s и PbB_s при изотропном облучении в сравнении с ФЧ ABH (боковое облучение) в абсолютных единицах.

Оптимизация размеров цилиндрических замедлителей с учетом энергетической и угловой зависимостей чувствительности

Кроме полиэтиленового замедлителя сферической формы рассмотрены также более технологичные варианты изготовления замедлителя в виде прямоугольного цилиндра или усеченного прямоугольного цилиндра со срезанными торцами цилиндра под углом 45° коническими поверхностями (рис. 10). Была проведена серия расчетов по подбору оптимальных размеров замедлителей с целью уменьшения анизотропии дозиметров при сохранении небольшого разброса дозовой чувствительности. При этом параметры Pb-конвертера ($\varnothing 10 \times 10 \times 0,9$ см) и борного фильтра (толщина – 0,6 см, площадь перфорации – 30%) оставались неизменными.

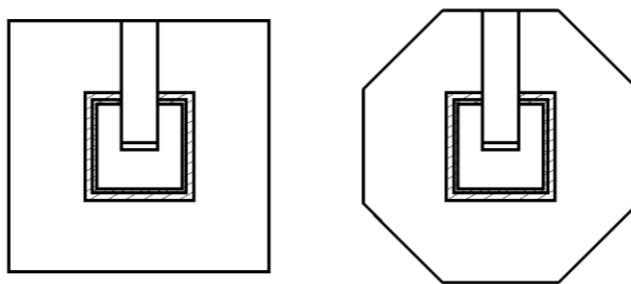


Рис. 10. Схемы дозиметров нейтронов с полиэтиленовыми замедлителями в форме прямоугольного цилиндра и усеченного прямоугольного цилиндра.

Получены следующие оптимальные размеры замедлителей: прямоугольного цилиндра – $\varnothing 21,8 \times 19,7$ см (PbB_c) и усеченного цилиндра – $\varnothing 22,4 \times 22,4$ см (PbB_tc), причем во втором случае расстояние от центра замедлителя до поверхности под углами 0° , 45° и 90° одинаково и равно 11,2 см. Энергетические зависимости чувствительности этих вариантов, приведенные на рис. 11, очень близки друг к другу, а также к ФЧ дозиметра в шаровом замедлителе $\varnothing 23$ см (PbB_s). Дозовые чувствительности, рассчитанные для протяженных спектров нейтронов и показанные на рис. 12, также незначительно отличаются от аналогичных результатов для шарового замедлителя (рис. 8).

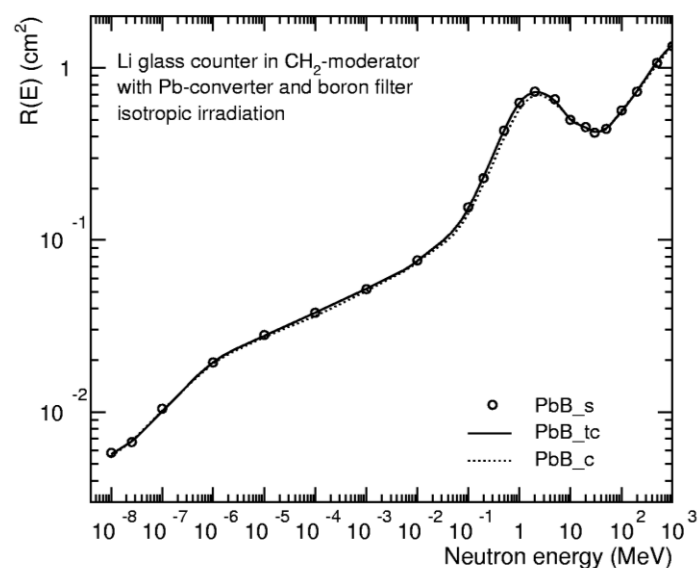


Рис. 11. Функции чувствительности дозиметров PbB_s, PbB_c и PbB_tc в абсолютных единицах. Pb-конвертеры и борные фильтры во всех случаях одинаковы.

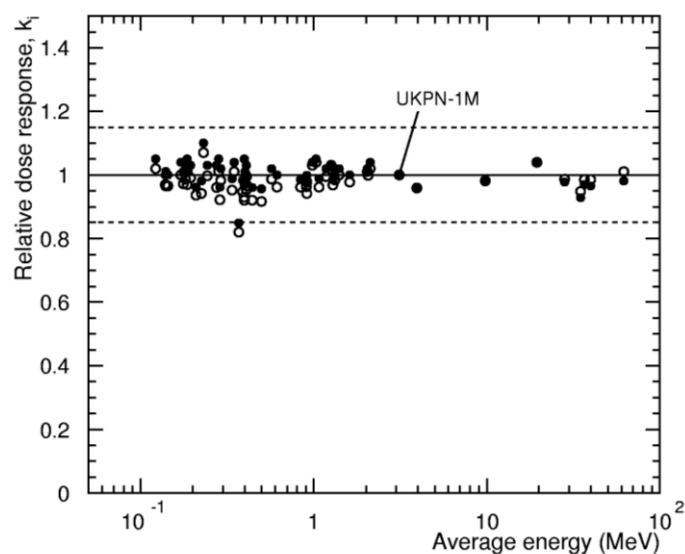


Рис. 12. Дозовая чувствительность дозиметров PbB_c (○) и PbB_tc (●).

На рис. 13 представлены значения анизотропии чувствительности дозиметра для трех вариантов полиэтиленового замедлителя и пяти энергий нейтронов. Анизотропия рассчитывалась как отношение чувствительности при падении нейтронов под углом θ (0° – облучение снизу) к чувствительности при изотропном облучении. Статистическая погрешность расчетов в этом случае составляла менее 1% для тепловых нейтронов и менее 0,5% при других энергиях. Наибольшая анизотропия, достигающая 26%, как и

следовало ожидать, имеет место для CH_2 -замедлителя в виде прямоугольного цилиндра. Для усеченного цилиндра, приближенного к сферической форме, анизотропия чувствительности не превышает 15%, так же, как и для шарового замедлителя.

Сравнительные характеристики дозиметров с различными полиэтиленовыми замедлителями приведены в табл. 3. Наиболее простой в изготовлении вариант с замедлителем в виде прямоугольного цилиндра имеет бóльшую анизотропию чувствительности по сравнению с другими замедлителями. Максимальная анизотропия (+26%) наблюдается, однако, для нейтронов низких энергий, которые не вносят обычно заметного вклада в дозу. Кроме того, она имеет место при облучении со стороны световода ($160-180^\circ$), где в реальном приборе должен находиться кожух ФЭУ, делитель и т.д., не учитывавшиеся в расчетах. Нужно также отметить несколько большую массу конструкции с замедлителем в виде прямоугольного цилиндра.

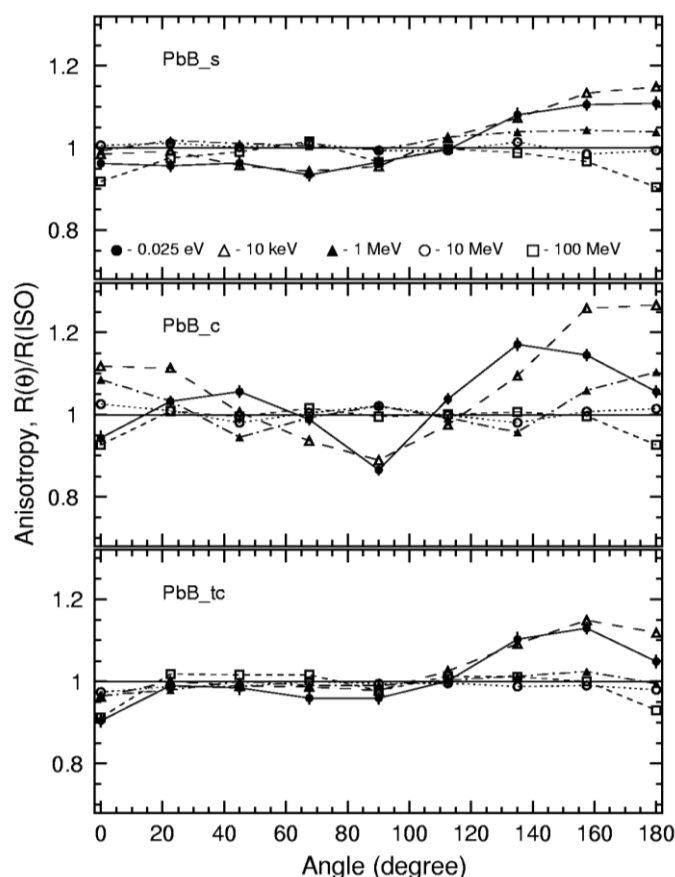


Рис. 13. Анизотропия чувствительности дозиметров PbB_s, PbB_c и PbB_tc.

Таблица 3.

Характеристики оптимальных вариантов дозиметров с Pb-конвертерами размерами $\varnothing 10 \times 10 \times 0,9$ см и борными фильтрами толщиной 0,6 см с площадью перфорации 30% в полиэтиленовых замедлителях различной формы и размеров.

Условное обозначение	Форма СН ₂ -замедлителя	Размеры СН ₂ -замедлителя (см)	Диапазон отн. чувствительности	Анизотропия (%)	Масса (кг)
PbB_s	Шар	$\varnothing 23$	0,85 – 1,10	< 15	9,7
PbB_c	Прямоугольный цилиндр	$\varnothing 21,8 \times 19,7$	0,82 – 1,07	< 26	10,6
PbB_tc	Усеченный цилиндр	$\varnothing 22,4 \times 22,4$	0,85 – 1,10	< 15	9,7

Заключение

Быстрый малогабаритный сцинтилляционный детектор нейтронов на основе литиевого стекла GS-20 размерами $\varnothing 25 \times 1$ мм с высокой чувствительностью и хорошей n/γ -дискриминацией взят за основу при расчетном анализе оптимальных конструкций дозиметра нейтронов для высокоэнергетических ускорителей с расширенным диапазоном энергий вплоть до сотен МэВ. Детектор нейтронов размещается в центре шарового полиэтиленового замедлителя. Повышение чувствительности к высокоэнергетическим нейтронам с $E > 20$ МэВ достигается за счет применения свинцового конвертера. Дополнительное размещение борного фильтра под свинцовым конвертером позволяет значительно уменьшить размеры и вес полиэтиленового замедлителя при сохранении небольшого разброса дозовой чувствительности в пределах $\pm 15\%$ в широком диапазоне нейтронных спектров со средней энергией от 0,1 до 60 МэВ. Таким образом, дозиметр применим как на ускорителях, так и на реакторах и других низкоэнергетических установках.

Наряду с замедлителем сферической формы рассмотрены также более технологичные варианты полиэтиленовых замедлителей в виде прямоугольного цилиндра и усеченного цилиндра и выполнены расчеты по оптимизации их размеров с точки зрения энергетической и угловой зависимостей чувствительности. Наиболее перспективным представляется дозиметр с замедлителем в виде усеченного цилиндра, совмещающий преимущества точностных характеристик шарового замедлителя и простоты изготовления замедлителя цилиндрической формы.

Полученные в работе результаты найдут применение не только в задаче разработки дозиметра нейтронов на основе сцинтилляционного детектора с литиевым стеклом. Сцинтилляционные детекторы на основе смеси порошков LiF и ZnS в полистироле широко применяются в РФ в таких приборах, как МКС-01Р, ДКС-96, РСУ-01 и др. Они имеют близкие размеры, поэтому выводы относительно оптимальных СН₂-замедлителей, Рb-конвертеров и борных фильтров справедливы и для указанных выше дозиметров, область применения которых можно расширить на высокоэнергетические ускорители. Предполагается также использовать детекторы в замедлителях с Рb-конвертерами в спектрометрии высокоэнергетических нейтронов в дополнение к единственному широко применяемому высокоэнергетическому активационному углеродному детектору на основе реакции $^{12}\text{C}(n,x)^{11}\text{C}$.

Работа была профинансирована Госкорпорацией "Росатом" по Государственному контракту № Н.4х.44.90.13.1118 от 31.05.2013 г.

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] C. Birattari, A. Ferrari, C. Nuccetelli et al. *An Extended Range Neutron Rem Counter*. Nucl. Instr. and Meth. **A297**, 250-257 (1990).
- [3] V. Mares, A.V. Sannikov, H. Schraube. *Response Functions of the Andersson–Braun and Extended Range Rem Counters for Neutron Energies from Thermal to 10 GeV*. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. **A476**, 341-346 (2002).
- [4] А.В. Санников. *Быстрый детектор нейтронов для систем радиационного контроля. Литературный обзор и выбор оптимальной конфигурации детектора*. Отчет ОРИ ИФВЭ, Протвино, 2013.
- [5] <http://www.detectors.saint-gobain.com>.

- [6] Е.Н. Савицкая, А.В. Санников. *FAN12 – универсальная версия программы FANEUT для моделирования транспорта фотонов и нейтронов в произвольных средах*. Отчет ОРИ ИФВЭ, Протвино, 2012.
- [7] A.M. Biskupchuk, V.E. Borodin, V.T. Golovachik et al. *Interpretation of the Readings of Combined Albedo-Track Personnel Neutron Dosimeters in the Terms of Dose Equivalent*. Kernenergie **30**, 419-424 (1987). В.Т. Головачик, В.Н. Лебедев, А.В. Санников. *Глубинные дозовые распределения тепловых и промежуточных нейтронов в фантомах различных конфигураций*. Препринт ИФВЭ 89-61, Серпухов, 1989.
- [8] 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).
- [9] <http://www.nndc.bnl.gov/endl/b6.8/>.
- [10] <http://www-nds.iaea.org/>.
- [11] ICRP Publication 74. *Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation*. Ann. ICRP **26**. Oxford, Pergamon Press, 1996.
- [12] 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).
- [13] V. Mares and H. Schraube. *Evaluation of the Response Matrix of a Bonner Sphere Spectrometer with LiI Detector from Thermal Energy to 100 MeV*. Nucl. Instrum. Meth. **A337**, 461-473 (1994).
- [14] J. F. Briesmeister (Ed). *MCNP4A - A General Monte-Carlo N-Particle Transport Code. Version 4A*. LANL Report LA-12625-M, Los Alamos, 1993.
- [15] Г.И.Бритвич, В.С.Волков, Ю.И.Колеватов и др. *Спектры и интегральные характеристики опорных полей нейтронов на базе радионуклидных источников нейтронного излучения*. Препринт ИФВЭ 90-48, Протвино, 1990.
- [16] А.В. Санников, В.Н. Пелешко, Е.Н. Савицкая и др. *Многошаровой спектрометр нейтронов на основе серийного прибора РСУ-01*. Препринт ИФВЭ 2007-21, Протвино, 2007.

- [17] R.V. Griffith, J.K. Palfalvi and B.R.L. Siebert. *Compendium of Neutron Spectra and Detector Responses for Radiation Protection Purposes*. IAEA TRS-403 (Draft), IAEA, Vienna, 2001.
- [18] Е.В. Косьяненко, С.И. Купцов, В.Н. Пелешко и др. *Определение поправочных коэффициентов индивидуальных дозиметров ДВГН-01 комплекса АКВДК-301 по характеристикам нейтронного излучения на рабочих местах комбината «Маяк»*. Отчет ИФВЭ, Протвино, 2007.
- [19] Е.В. Косьяненко, С.И. Купцов, В.В. Мартынов и др. *Спектры и дозиметрические характеристики полей нейтронов на рабочих местах персонала Горнохимического комбината*. Препринт ИФВЭ 2008-22, Протвино, 2008.
- [20] А.В. Санников. *Развитие методов спектрометрии нейтронного излучения на больших протонных ускорителях*. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к. ф.-м. н. Препринт ИФВЭ 2006-21, Протвино, 2006.
- [21] Ю.В. Белецкая, В.Е.Бородин, С.А.Другаченок и др. *Измерение нейтронных спектров на временном радиобиологическом стенде в декабрьском сеансе 2013 г.* Отчет ИФВЭ, Протвино, 2014.
- [22] I.O. Andersson and J. Braun. *A Neutron Rem Counter*. Nukleonik **6**, 237-241 (1964).

Рукопись поступила 3 июля 2014

В.Н. Пелешко, Е.Н. Савицкая, А.В. Санников.

Оптимизация конструкции дозиметра нейтронов с расширенным диапазоном энергий для высокоэнергетических ускорителей

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

Подписано к печати	18.07.2014	Формат	60 × 84/16.	Цифровая печать.
Печ.л.	1, 37.	Уч.- изд.л.	1,8.	Тираж 80.
			Заказ	10.
			Индекс	3649.

ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт»

142281, Московская область, город Протвино, площадь Науки, дом 1

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

Индекс 3649

П Р Е П Р И Н Т 2014-4,
ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт», 2014
