



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2008–1  
ОРИ

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

ДОЗИМЕТР ЭФФЕКТИВНОЙ ДОЗЫ  
СМЕШАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Направлено в *АНРИ*

Протвино 2008

### Аннотация

Санников А.В., Пелешко В.Н., Савицкая Е.Н. и др. Дозиметр эффективной дозы смешанного излучения: Препринт ИФВЭ 2008–1. – Протвино, 2008. – 11 с., 7 рис., 1 табл., библиогр.: 10.

Разработан пассивный дозиметр для измерения эффективных доз фотонов и нейтронов изотропно-го облучения. Прибор представляет собой шаровой полиэтиленовый фантом с размещенными на его поверхности индивидуальными дозиметрами ДВГН-01 и слайдом ДВГН-01 в центре шара. Основанная на расчетных и экспериментальных данных методика позволяет измерять эффективную дозу фотонов и нейтронов  $E(ISO)$ , другие характеристики нейтронных полей, а также проводить калибровку индивидуальных дозиметров нейтронов на рабочих местах персонала. Прибор перспективен также в качестве зонного и аварийного дозиметра смешанного излучения.

### Abstract

Sannikov A.V., Peleshko V.N., Savitskaya E.N. et al. A Dosimeter of Effective Dose of Mixed Radiation: IHEP Preprint 2008–1. – Protvino, 2008. – p. 11, figs. 7, table 1, refs.: 10.

A passive dosimeter for measurement of photon and neutron effective doses at isotropic irradiation has been developed. The device is a spherical polyethylene phantom with the DVGН-01 individual dosimeters placed on its surface and one DVGН-01 slide in its centre. The method based on the calculational and experimental data permits to measure photon and neutron effective doses  $E(ISO)$ , other characteristics of neutron fields, as well as to perform calibration of neutron individual dosimeters at personnel working places. The device is also promising as an area and accidental dosimeter of mixed radiation.

## Введение

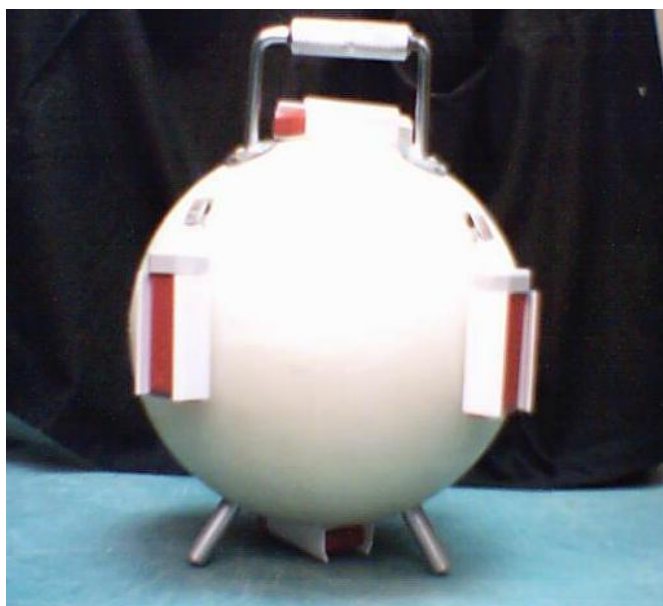
Измерение индивидуальных эффективных доз облучения персонала нейтронами является сложной задачей, не решенной в настоящее время на требуемом уровне ни в РФ, ни за рубежом. Это связано с необходимостью разработки новых подходов, приборов и методик, так как, в отличие от ранее измерявшейся максимальной эквивалентной дозы (МЭД), эффективная доза  $E$  и введенный для ее оценки в качестве операционной величины индивидуальный эквивалент дозы  $H_p(10)$  зависят не только от энергетического, но и от углового распределения нейтронного излучения.

Последнее может меняться от направленного при работе вблизи источника излучения до изотропного. При использовании одного индивидуального дозиметра (ИД), размещаемого на передней части туловища, его показания в случае неоднородного облучения тела обычно не поддаются однозначной интерпретации. Исключением является направленное облучение со стороны груди, соответствующее условиям градуировки. Наиболее характерными условиями облучения персонала, однако, являются условия однородного облучения в квазиизотропных полях, что обусловлено наличием большого вклада рассеянного излучения от стен, пола и потолка помещений при работе вдали от источников. Дополнительное усреднение происходит за счет перемещения персонала и изменения ориентации тела в течение длительного периода индивидуального контроля.

При выборе изотропного облучения в качестве стандартных условий проблемы, связанные с угловой зависимостью эффективной дозы и чувствительности ИД, значительно упрощаются. В данной работе представлена методика калибровки ИД нейтронов в полях рассеянного излучения на рабочих местах персонала с помощью дозиметра эффективной дозы (ДЭД) изотропного облучения. Методика разрабатывалась прежде всего для определения поправочных коэффициентов на энергетическую зависимость чувствительности (ЭЗЧ) к нейтронам ИД ДВГН-01 [1], который является в настоящее время наиболее массовым на предприятиях Росатома. Полученные результаты показали, однако, что диапазон применимости ДЭД значительно шире.

## Физические основы ДЭД

Дозиметр эффективной дозы представляет собой полиэтиленовый шар диаметром 10" (25,4 см) с размещенными симметрично на его поверхности шестью дозиметрами ДВГН-01 и слайдом ДВГН-01 в центре шара. Внешний вид прибора показан на **рис. 1**. Идея методики состоит в том, чтобы в полях нейтронов с произвольным угловым распределением создать условия изотропного облучения ДВГН-01 на фантоме путем усреднения показаний шести дозиметров на поверхности шара. Вторым основанием метода является обнаруженная в работе [1] близость ЭЗЧ ДВГН-01 при изотропном облучении на тканеэквивалентном эллиптическом фантоме, моделирующем тело человека, и рассматриваемом шаровом полиэтиленовом фантоме.

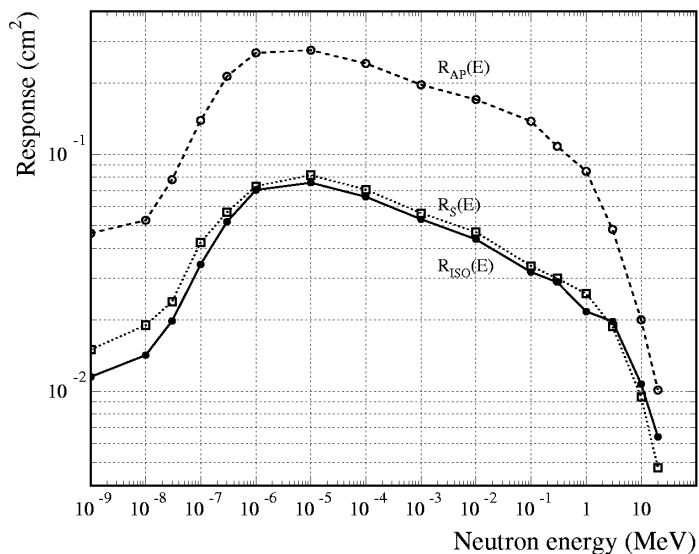


**Рис. 1.** Внешний вид ДЭД.

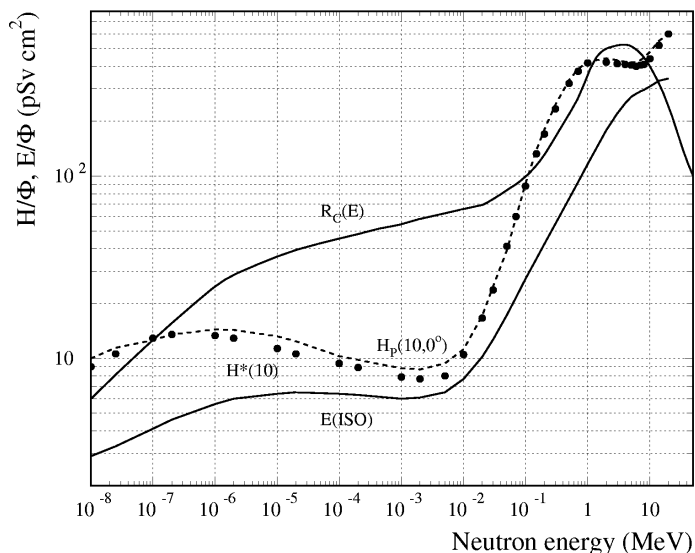
Используемые в дальнейших расчетах ЭЗЧ ДВГН-01 при изотропном облучении на этих фантомах, а также при направленном облучении на плоском фантоме из оргстекла (30x30x15 см), применяемом в ИФВЭ при градуировке, представлены на **рис. 2**. На **рис. 3** приведены энергетические зависимости амбиентного эквивалента дозы  $H^*(10)$ , индивидуального эквивалента дозы при направленном облучении тела со стороны груди  $H_p(10,0^\circ)$  и эффективной дозы нейтронов изотропного облучения  $E(ISO)$  по данным [2]. Там же представлена функция чувствительности детектора тепловых нейтронов  ${}^6LiI$  в полиэтиленовом шаровом замедлителе диаметром 10", рассчитанная в работе [3] и используемая нами в расчетах чувствительности слайда ДВГН-01 в центре шара.

Центральный слайд служит для оценки эффективной дозы нейтронов  $E(ISO)$ , при этом применяется методика комбинированного дозиметра. Функции чувствительности детекторов в центре шара  $R_c(E)$  и на его поверхности  $R_s(E)$ , приведенные на **рис. 2** и **3**, сильно отличаются в диапазоне энергий ниже нескольких МэВ, что позволяет использовать отношение их показаний в качестве эффективного параметра жесткости спектра нейтронов  $\alpha = H_c/H_s$ . Знание жесткости спектра нейтронов дает возможность учесть различие энергетических зависимостей  $E(ISO)$  и  $R_c(E)$ , определить эффективную дозу нейтронов изотропного облучения и значение поправочного коэффициента для ДВГН-01 на различие чувствительности в условиях градуировки и в точке измерения, который приближенно равен  $k_E(ISO) \approx E(ISO)/H_s$ .

**Рис. 2.** ЭЗЧ ДВГН-01 при направленном облучении на плоском фантоме  $R_{AP}(E)$  и при изотропном облучении на эллиптическом тканеэквивалентном  $R_{ISO}(E)$  и шаровом полиэтиленовом  $R_s(E)$  фантомах.



**Рис. 3.** Энергетические зависимости  $E(ISO)$ ,  $H^*(10)$ ,  $H_p(10,0^\circ)$  и ЭЗЧ слайда ДВГН-01 в центре шара  $R_c(E)$  (отн. единицы).



### Методика определения поправочных коэффициентов для ДВГН-01

В работе [1] приведены расчетные значения поправочных коэффициентов  $k_E(ISO)$  для различных спектров нейтронов в зависимости от параметра жесткости спектра  $h^*(10) = H^*(10)/\Phi$ . В расчетах использовались следующие формулы:

$$k_E(ISO) = \frac{E(ISO)}{H_{ДВГН}(ISO)} = \frac{\int e_{ISO}(E)\Phi(E)dE}{c \cdot \int R_{ISO}(E)\Phi(E)dE}, \quad (1)$$

где  $R_{ISO}(E)$  – ЭЗЧ ДВГН-01 к нейтронам при изотропном облучении на тканеэквивалентном эллиптическом фантоме (рис. 2). Градуировочный коэффициент  $c$  рассчитывался для условий направленного облучения дозиметра на плоском фантоме в поле градуировочного источника со

спектром нейтронов  $\Phi_{zp}(E)$  (в ИФВЭ – спектр нейтронов градуировочно-поверочной установки УКПН-1М [4]):

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

Аналогичные расчеты были выполнены нами для параметра жесткости спектра  $\alpha = H_c/H_s$ , дозы  $H_s$  и  $H_c$  рассчитывались по формулам:

$$\begin{cases} H_s = c \cdot \int R_s(E)\Phi(E)dE \\ H_c = k \cdot \int R_c(E)\Phi(E)dE \end{cases} \quad (3)$$

Здесь ЭЗЧ  $R_s(E)$  приведена на **рис. 2**,  $R_c(E)$  – на **рис. 3**, коэффициент  $c$  определяется формулой (2), а коэффициент  $k$  – условием градуировки:

$$k = \frac{\int h^*(10)(E)\Phi_{ОПРИ}(E)dE}{(H^*(10)/H_c)_{\text{эсп}} \int R_c(E)\Phi_{ОПРИ}(E)dE} \quad (4)$$

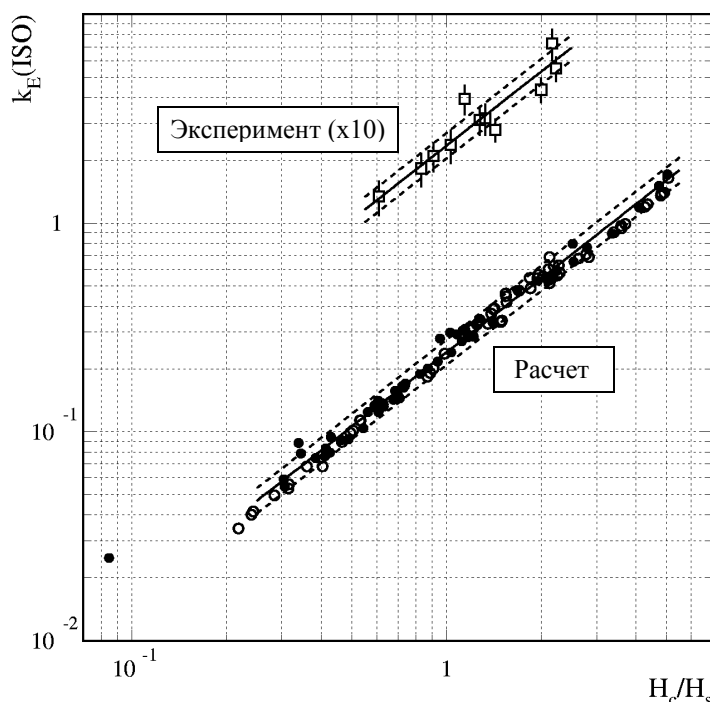
Для градуировки и контроля характеристик ДЭД было создано специальное опорное поле рассеянного излучения (ОПРИ) – поле в бетонном помещении на расстоянии 150 см от источника  $^{252}\text{Cf}$  за рассеивающим конусом. Спектры и интегральные характеристики нейтронного излучения ОПРИ измерены с помощью спектрометра Боннера СБ-PCY-01 и приведены в работе [4]. Результаты измерений ДЭД в этом поле за время экспозиции 4,22 часа представлены в **табл. 1**, там же приведены значения доз нейтронов  $H^*(10)$  и  $E(\text{ISO})$  и поправочного коэффициента для ДВГН-01  $k_E(\text{ISO})$  по данным спектрометрии.

Ориентация ДВГН-01 указана относительно источника излучения. В измерениях использовались стандартные дозиметры и слайд ДВГН-01 из комплекта ИДК ИФВЭ, дозы нейтронов  $H_s$  и  $H_c$  измерены на автоматизированном комплексе АКВДК-301 [5] по стандартной методике. Экспериментальное значение в знаменателе формулы (4) равно  $(H^*(10)/H_c)_{\text{эсп}} = 0,67$  по данным **табл. 1** и слабо зависит от спектра нейтронов, как будет показано ниже. Расчетное значение  $H_s$  в поле ОПРИ согласуется в пределах 10% с результатом **табл. 1**, поэтому дополнительная градуировка ДВГН-01 на поверхности шара не проводилась.

**Таблица 1.** Результаты измерений доз нейтронов  $H_s$  и  $H_c$  с помощью ДЭД в опорном поле рассеянного излучения, а также дозы нейтронов  $H^*(10)$  и  $E(\text{ISO})$  и поправочный коэффициент для ДВГН-01  $k_E(\text{ISO})$  по данным спектрометра СБ-PCY-01 [4]. В качестве погрешностей приведены два СКО.

Ориентация ДВГН-01	$H_s$ (мЗв)		$H_c$ (мЗв)	$H_c / H_s$	$H^*(10)$ (мЗв)	$E(\text{ISO})$ (мЗв)	$k_E(\text{ISO})$
	среднее	среднее					
вперед	0,389	0,297	0,351	1,276	0,235 ± 0,016	0,086 ± 0,018	0,312 ± 0,050
назад	0,204						
вверх	0,277						
вниз	0,276						
вправо	0,273						
влево	0,231						

**Рис. 4.** Расчетные и экспериментальные значения поправочного коэффициента  $k_E(ISO)$  для ДВГН-01 в зависимости от параметра жесткости низкоэнергетических спектров нейтронов  $H_c/H_s$ .



Результаты расчета для 120 литературных низкоэнергетических спектров нейтронов представлены на **рис. 4**. Использовались фильтрованные и нефильтрованные спектры радионуклидных источников и спектры за защитами реакторов. Черные точки соответствуют спектрам с известным вкладом тепловых нейтронов, светлые – без тепловых нейтронов, крайняя левая точка – Максвелловскому спектру тепловых нейтронов.

Необходимо отметить очень небольшой разброс расчетных значений  $k_E(ISO)$  относительно градуировочной зависимости, которая в широком диапазоне жесткости спектра  $H_c/H_s = 0,25 \div 5$  описывается формулой

$$k_E(ISO) = 0,235 \cdot (H_c/H_s)^{1,18}. \quad (5)$$

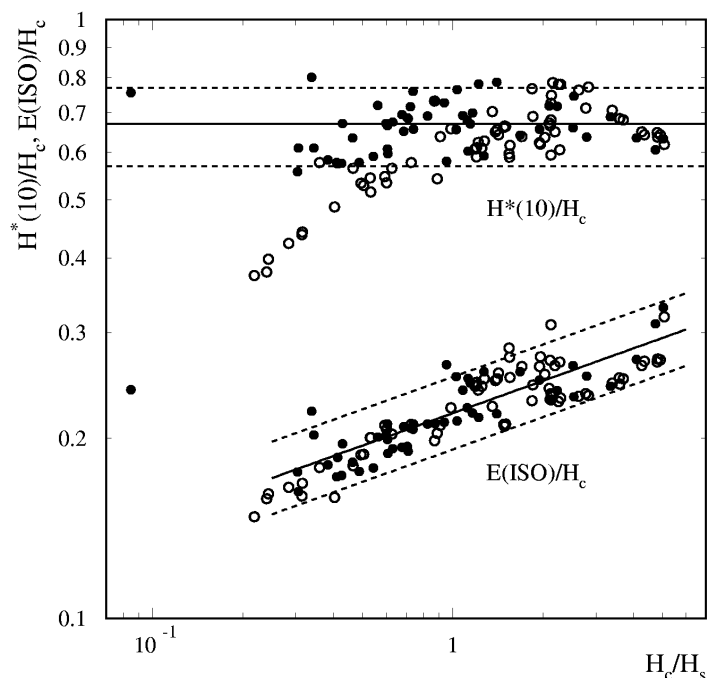
Прерывистыми линиями на рисунке показан коридор расширенной неопределенности (два среднеквадратичных отклонения СКО), которая составляет  $\pm 15\%$ . Эта неопределенность имеет смысл дополнительной погрешности измерений за счет ЭЗЧ дозиметра. Ее малая величина объясняется близостью энергетических зависимостей  $E(ISO)$  и  $R_c$ , а также  $R_{ISO}$  и  $R_s$ , соответственно, в широком диапазоне энергий.

Экспериментальная проверка методики ДЭД выполнялась на двух комбинатах Росатома в помещениях хранения делящихся материалов и источников нейтронов ( $\alpha, n$ )-реакций. Во всех точках экспозиции ДЭД с помощью спектрометра СБ-PCY-01 были измерены спектры нейтронов, определены значения поправочных коэффициентов  $k_E(ISO)$  и другие характеристики нейтронных спектров. Все измерения проводились, как правило, на высоте 110 см от пола, соответствующей условиям ношения индивидуальных дозиметров. Экспериментальные значения  $k_E(ISO)$  в зависимости от жесткости спектра показаны на **рис. 4**, в качестве погрешностей приведены два СКО. Можно видеть, что в пределах этих погрешностей экспериментальные данные согласуются с расчетной зависимостью (5).

## Измерение амбиентного эквивалента дозы и эффективной дозы нейтронов

Рассмотренный выше подход может быть использован для определения различных характеристик нейтронных спектров, например амбиентного эквивалента дозы  $H^*(10)$  и эффективной дозы  $E(ISO)$ . Расчетные отношения этих доз к дозе  $H_c$  в зависимости от параметра жесткости спектра  $H_c/H_s$  приведены на **рис. 5**, при этом результаты для амбиентного эквивалента дозы довольно неожиданны.

Практически все точки для спектров с известным вкладом тепловых нейтронов находятся в узком коридоре значений  $H^*(10)/H_c = 0,67 \pm 15\%$ . В то же время результаты для мягких спектров без тепловых нейтронов систематически ниже, максимальное отклонение от среднего значения приближается к коэффициенту 2. Последние данные согласуются с твердо устоявшимся мнением о том, что так называемые бэрметры на основе детекторов тепловых нейтронов в шаровых полиэтиленовых замедлителях диаметром 10" завышают амбиентный эквивалент дозы (ранее – МЭД) в полях нейтронов с мягкими спектрами.



**Рис. 5.** Расчетные значения отношений  $H^*(10)/H_c$  и  $E(ISO)/H_c$  в зависимости от параметра жесткости спектра  $H_c/H_s$ .

Этот вывод основывался на сравнении ЭЗЧ бэрметров и удельного эквивалента дозы для моноэнергетических нейтронов ( $R_c(E)$  и  $H^*(10)$ ) на **рис. 3**). Действительно, для промежуточных нейтронов с энергиями  $10^{-6} - 0,1$  МэВ эти зависимости сильно отличаются. Реальные спектры нейтронов за защитами, однако, всегда простираются от тепловых энергий до максимальной энергии источника, причем вклад тепловых нейтронов во флюенс и дозу обычно возрастает при замедлении нейтронов и смягчении нейтронного спектра. Вклад в дозу промежуточных нейтронов в большинстве случаев мал, за исключением спектров за толстыми стальными защитами, которые не характерны для условий работы персонала и не использовались в нашем анализе.

В некоторых исследованиях ранее проводились расчеты чувствительности бэрметров в протяженных нейтронных спектрах, но эти спектры не содержали в большинстве случаев тепловых нейтронов. Наши расчеты показывают, что учет этого диапазона оказывает стабилизирующее влияние на погрешность измерения  $H^*(10)$  с помощью ДЭД в мягких нейтронных спектрах. Большинство этих спектров измерено за бетонными защитами реакторов, что естествен-

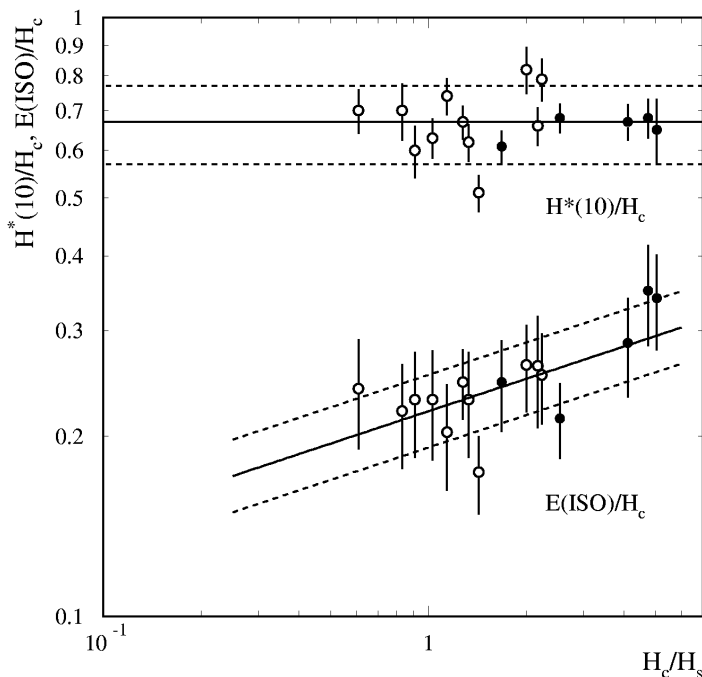


но, так как мягкие спектры со значимыми мощностями дозы реализуются только при наличии мощного источника.

Энергетическая зависимость  $E(ISO)$  значительно отличается от  $H^*(10)$ , следствием чего является заметная зависимость отношения  $E(ISO)/H_c$  от жесткости спектра (от 0,15 до 0,32 для спектров с тепловыми нейтронами). Тем не менее и в этом случае расчетные данные хорошо аппроксимируются зависимостью  $E(ISO)/H_c = 0,22 \cdot (H_c/H_s)^{0,18}$  с небольшой расширенной неопределенностью 15%. Из данной формулы можно получить другое соотношение:  $E(ISO)/H_s = 0,22 \cdot (H_c/H_s)^{1,18}$ , которое в пределах 7% согласуется с выражением (5). Этот результат подтверждается близостью ЭЗЧ ДВГН-01 на тканеэквивалентном эллиптическом фантоме, которая использовалась в расчетах  $k_E(ISO)$ , и на шаровом полиэтиленовом фантоме (рис. 2).

Экспериментальные данные представлены на рис. 6, где черными точками показаны результаты измерений в опорных полях ИФВЭ [6]. Эти поля на расстоянии 75 см от точечных источников не соответствуют условиям облучения ДЭД из-за влияния геометрического фактора на показания ДВГН-01 на поверхности шара, поэтому использовались только экспериментальные дозы  $H_c$ , а значения  $H_c/H_s$  определялись расчетным путем по измеренным спектрам нейтронов [4]. В целом экспериментальные результаты не противоречат расчетным данным как по  $H^*(10)$ , так и по  $E(ISO)$ . Нужно отметить при этом в 2-3 раза большие погрешности измерения спектрометром СБ-PCY-01 эффективной дозы  $E(ISO)$  по сравнению с  $H^*(10)$ , что связано с большими различиями их энергетических зависимостей в диапазоне энергий 0,1-10 МэВ, который вносит основной вклад в оба функционала в данных спектрах.

**Рис. 6.** Экспериментальные значения отношений  $H^*(10)/H_c$  и  $E(ISO)/H_c$  в зависимости от параметра жесткости спектра  $H_c/H_s$ . Черные точки – результаты измерений в опорных полях ИФВЭ [6].



ДЭД может применяться также для калибровки других ИД нейтронов в местах работы персонала в терминах  $E(ISO)$ . Для этого два ИД размещаются на противоположных точках поверхности шара (на концах одного из диаметров) на удалении от ДВГН-01. Для снижения взаимовлияния количество ДВГН-01 также может быть уменьшено до 2-4. Эта возможность основана на том наблюдении, что средние показания пар противоположных дозиметров ДВГН-01 очень близки к средним дозам по шести дозиметрам. Данные табл. 1 показывают, что, несмотря на отношение показаний вперед/назад около двойки, отклонение среднего значения от дозы

$H_s$  составляет менее 10%. В измерениях на комбинатах практически все подобные данные находятся в 20% коридоре, такие же результаты были получены ранее за защитой протонного синхротрона ИФВЭ на 70 ГэВ [7] как для ДВГН-01, так и для трекового детектора МК-20 с сильно отличающейся ЭЗЧ.

### Сравнение методик ДЭД и комбинированного дозиметра нейтронов за защитой протонного синхротрона ИФВЭ

Чувствительность ИД ДВГН-01 за защитой протонного синхротрона ИФВЭ на 70 ГэВ исследовалась в нескольких сеансах работы ускорителя в течение 2001-2003 гг. Результаты приведены в трех отчетах ИФВЭ, в частности, выполнено обоснование методики комбинированного индивидуального дозиметра нейтронов (КИДН) [8] на основе ДВГН-01 и ядерной пленки МК-20. Методика устанавливает процедуры определения поправочных коэффициентов  $k_H = H_p(10)/H_{\text{ДВГН}}$  и  $H_p(10)$  в зависимости от параметра жесткости спектра нейтронов  $H_{\text{МК}}/H_{\text{ДВГН}}$  за защитами ускорителей. Оцененный коридор расширенной неопределенности составляет (+50%, -30%) в широком диапазоне жесткости нейтронных спектров.

Комбинированные дозиметры размещались во время измерений на поверхности шаровых полиэтиленовых замедлителей диаметром 10" радиационных мониторов (РМ) с детекторами тепловых нейтронов на основе родиевого активационного детектора в центре замедлителей. Показания КИДН интерпретировались в терминах индивидуального эквивалента дозы  $H_p(10)$  в точке облучения на поверхности фантома. Результат измерения зависит от углового распределения внешнего излучения и положения КИДН. В двух сеансах 2003 г. [7] дозиметры размещались в шести точках на поверхности каждого РМ аналогично методике ДЭД. Показано, что среднее значение  $H_p(10)$  по показаниям этих дозиметров может служить оценкой эффективной дозы изотропного облучения  $E(\text{ISO})$  с точностью до погрешностей методики КИДН и процедуры усреднения, а также различия чувствительности дозиметра на шаровом фантоме и теле человека.

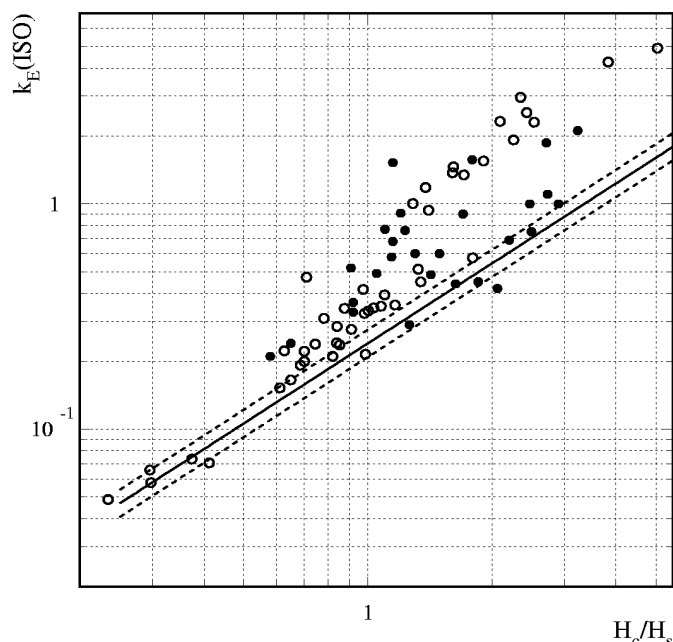
Представленная выше конфигурация облучения ДВГН-01 на поверхности РМ позволяет применить методику ДЭД. С этой целью показания РМ приводились к условиям градуировки слайда ДВГН-01 в центре шара:  $H_c = H_{\text{РМ}}/0,67$ , так как РМ градуируется по величине AMBIENTного эквивалента дозы. Экспериментальные значения  $k_E(\text{ISO}) = E(\text{ISO})/H_s$  за защитой ускорителя в зависимости от параметра жесткости спектра нейтронов  $H_c/H_s$  по данным работы [7] представлены на **рис. 7**. Там же приведены результаты расчетов для литературных ускорительных спектров с использованием энергетической зависимости  $E(\text{ISO})$  выше 20 МэВ по данным [9].

Следует отметить, что расчетные и экспериментальные данные согласуются в целом друг с другом. В большинстве случаев, кроме наиболее мягких спектров, результаты для ускорительных спектров лежат значительно выше градуировочной зависимости для низкоэнергетических спектров. Кроме того, наблюдается большой разброс данных при одинаковом параметре жесткости спектра. Это связано с тем, что детекторы ДЭД практически нечувствительны к нейтронам с энергией выше 20 МэВ, вносящим заметный, а иногда преобладающий, вклад в эффективную дозу  $E(\text{ISO})$  за защитами ускорителей.

Таким образом, ДЭД в описанном выше виде имеет принципиальные ограничения при использовании в жестких спектрах за защитами ускорителей. Методика КИДН дает значительно лучшие результаты, несмотря на известные недостатки ядерной пленки МК-20. В настоящее время пленка МК-20 снята с производства, поэтому актуальной является проблема выбора перспективного трекового детектора и разработки методики травления и счета треков, пригодной для широкого применения. Решение этой задачи необходимо прежде всего для повышения

точности индивидуального контроля доз нейтронов. Трековый детектор типа CR-39 или Mascofol предполагается применять в качестве альтернативы МК-20 в комбинированном альbedo-трековом индивидуальном дозиметре нейтронов на основе ДВГН-01. Этот вариант перспективен для использования также в методике ДЭД на высокоэнергетических ускорителях.

**Рис. 7.** Расчетные (светлые кружки) и экспериментальные (черные кружки) значения поправочного коэффициента  $k_E(ISO)$  для ДВГН-01 в зависимости от параметра жесткости ускорительных спектров нейтронов  $H_c/H_s$ . Линии – зависимость для низкоэнергетических спектров с коридором неопределенностей.



### Применение ДЭД для измерения эффективной дозы фотонов и в качестве зонного и аварийного дозиметра

Средняя доза фотонов, измеренная ДВГН-01 на поверхности полиэтиленового шара в полях рассеянного излучения, с достаточной степенью точности может интерпретироваться как индивидуальный эквивалент дозы фотонов  $H_p^{\gamma}(10, ISO)$ . Энергетическая и угловая зависимости чувствительности дозиметра соответствуют нормативным требованиям. В отличие от нейтронного излучения, материал и форма фантома не играют в данном случае большой роли. Влияние фантома на показания ДВГН-01 в основном ограничивается его экранирующими свойствами [1], которые сводятся к практически полному поглощению фотонов из задней полусферы. В соответствии с рекомендациями [10] эффективная доза фотонов полагается равной индивидуальному эквиваленту дозы фотонов:  $E_{\gamma}(ISO) = H_p^{\gamma}(10, ISO)$ . Эти выводы справедливы и для заряженных частиц, в частности  $\beta$ -излучения, т.е. дозу  $H_s^{\gamma}$  можно рассматривать в качестве эффективной дозы фотонов и заряженных частиц при изотропном облучении:  $E_{\gamma+ch}(ISO) = H_s^{\gamma}$ .

Простота методики ДЭД, а также широкий диапазон измеряемых доз фотонов и нейтронов делают его перспективным для применения в качестве зонного и аварийного дозиметров. Эффективные дозы фотонов и нейтронов, измеряемые ДЭД в рабочих помещениях персонала, могут использоваться не только для определения поправочных коэффициентов для ДВГН-01. Это актуально также для приборов оперативного контроля и автоматизированных систем радиационного контроля, измеряющих амбиентный эквивалент дозы  $H^*(10)$ . Из рис. 5 можно видеть, что эффективная доза нейтронов  $E(ISO)$  завышается при этом в 3-4 раза. В случае дозиметров фотонов степень завышения составляет обычно более двойки.

Зонный (групповой) дозиметр может размещаться также в тех помещениях, где не предусмотрен индивидуальный дозиметрический контроль облучения персонала в нормальных условиях работы источника. При этом достаточно использовать упрощенный вариант ДЭД с двумя ДВГН-01 на поверхности шара и слайдом в центре. Этот же вариант может быть рекомендован для контроля радиационной обстановки в санитарно-защитной зоне предприятий с источниками ионизирующих излучений.

ДЭД в качестве аварийного дозиметра смешанного излучения предполагается применять в дополнение к индивидуальному дозиметру ДВГН-01. В отличие от нормальных условий облучения персонала, аварийные ситуации характеризуются обычно неоднородным облучением, при котором интерпретация показаний ДВГН-01 возможна только при наличии информации о жесткости нейтронного спектра и угловом распределении фотонов и нейтронов во время аварии. Такая информация может быть оперативно получена из результатов обработки детекторов ДЭД.

В случае серьезной аварии необходимо проводить детальное исследование и реконструкцию условий аварийного облучения, конечной задачей которых является определение поглощенных доз в тканях и органах пострадавших для планирования медицинских мероприятий. При моделировании радиационной аварии, как экспериментальном, так и расчетном, важным условием успеха является максимальный объем и надежность экспериментальных данных о характеристиках полей излучения во время аварии. Такими данными могут быть показания ДЭД, применяемые в ретроспективном анализе наряду со значительно менее точными методами гамма-спектрометрии всего тела, радиометрии крови, ЭПР-спектроскопии эмали зубов, активации серы в волосах и т.д.

## Заключение

Разработан простой и удобный прибор для измерения эффективных доз смешанного излучения, обладающий широким диапазоном применимости. Он может использоваться для калибровки ДВГН-01 и других индивидуальных дозиметров на рабочих местах персонала, в качестве зонного и аварийного дозиметра смешанного излучения и в других приложениях. Важным достоинством нового дозиметра являются небольшие затраты на его внедрение и эксплуатацию на тех предприятиях, где индивидуальный дозиметрический контроль проводится с помощью автоматизированного комплекса АКВДК-301 в комплекте с индивидуальными дозиметрами ДВГН-01. Широкое внедрение ДЭД может обеспечить в ряде случаев и прямой экономический эффект при оптимизации радиационной защиты за счет перехода от консервативной величины  $H^*(10)$  к рекомендованной нормативными документами эффективной дозе.

Авторы выражают благодарность Е.В. Косьяненко и С.В. Савенко за помощь в проведении измерений.

## Список литературы

- [1] 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.
- [2] *Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External Radiation*. ICRP Publication 74. Pergamon Press, Oxford, 1996.
- [3] 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).

- [4] А.В.Санников, В.Н.Пелешко, Е.Н.Савицкая, С.И.Купцов, М.М.Сухарев. *Многошаровой спектрометр нейтронов на основе серийного прибора РСУ-01*. Препринт ИФВЭ 2007-21, Протвино, 2007; направлено в АНРИ.
- [5] *Комплекс автоматизированный индивидуального дозиметрического контроля АКИДК-301*. Руководство по эксплуатации. Ангарск, 2001.
- [6] Г.И.Бритвич, В.С.Волков, Ю.И.Колеватов, А.К.Кременецкий, В.Н.Лебедев, В.Д.Майоров, Я.Н.Расцветалов, Л.А.Трыков, А.А.Чумаков. *Спектры и интегральные характеристики опорных полей нейтронов на базе радионуклидных источников нейтронного излучения*. Препринт ИФВЭ 90-48, Протвино, 1990.
- [7] А.В.Санников, С.Э.Сухих. *Исследование чувствительности индивидуального дозиметра ДВГН-01 в полях смешанного излучения за защитой У-70 (1 и 2 сеансы 2003 г.)*. Отчет ИФВЭ. Протвино, 2004.
- [8] *Типовая методика выполнения измерений индивидуальных эффективных доз нейтронного излучения за защитой протонных ускорителей с помощью комбинированного индивидуального дозиметра на основе альбедного дозиметра ДВГН-01 и ядерной фотоэмульсии МК-20*. (МВИ № 02-2005-кидн.) Протвино, 2005.
- [9] A.Ferrari, M.Pellicioni and M.Pillon. *Fluence to Effective Dose Conversion Coefficients for Neutrons up to 10 TeV*. Radiat. Prot. Dosim. **71**, 165-173 (1997).
- [10] МУ 2.6.1.25 - 2000. *Дозиметрический контроль внешнего профессионального облучения. Общие требования*. Методические указания. ДБЧС МАЭ РФ, Федеральное управление «Медбиоэкстрем» Минздрава России, 2000.

Рукопись поступила 25 января 2008 г.

А.В. Санников, В.Н. Пелешко, Е.Н. Савицкая и др.  
Дозиметр эффективной дозы смешанного излучения.

Редактор Л.Ф. Васильева.

---

Подписано к печати	29.01.2008.	Формат 60 × 84/8.	Офсетная печать.
Печ.л. 1,625.	Уч.– изд.л. 1,3.	Тираж 80.	Заказ 21.
ЛР №020498	от 17.04.97.		Индекс 3649.

---

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий,  
142281, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

---

ПРЕПРИНТ 2008-1, ИФВЭ, 2008

---