



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2005–6  
ОРИ

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**

Направлено в *АНРИ*

Протвино 2005

**Аннотация**

Санников А.В., Лебедев В.Н., Кустарев В.Н. и др. Индивидуальный дозиметр смешанного излучения ДВГН-01: разработка и исследование характеристик. Препринт ИФВЭ 2005–6. – Протвино, 2005. – 13 с., 8 рис., 4 табл., библиогр.: 17.

Рассматриваются основные физические подходы и методы их реализации, положенные в основу разработки индивидуального дозиметра смешанного излучения ДВГН-01. Приводятся расчетные и экспериментальные данные по его дозиметрическим характеристикам. Обсуждаются процедуры градуировки дозиметра, определения индивидуальных доз по его показаниям, а также учета энергетической зависимости чувствительности к нейтронам.

**Abstract**

Sannikov A.V., Lebedev V.N., Kustarev V.N. et al. The Individual Dosemeter of Mixed Radiation DVGН-01: Development and Study of Characteristics. IHEP Preprint 2005–6. – Protvino, 2005. – p. 13, fig. 8, tables 4, refs.: 17.

The main physical approaches and the methods of their realization, on which development of the individual dosimeter of mixed radiation DVGН-01 is based, are considered. The calculated and experimental data on its dosimetric characteristics are presented. The procedures of dosimeter calibration, estimation of individual doses from their readings and neutron response energy dependence taking into account are discussed.

## Введение

Индивидуальный дозиметр смешанного излучения на основе ТЛД  ${}^7\text{LiF}$  и  ${}^6\text{LiF}$ , получивший впоследствии название ДВГН-01, был разработан в ИФВЭ в 1989-91 гг. Актуальность этой работы была вызвана проблемами с качеством и своевременными поставками ядерной фотоэмульсии МК-20, применявшейся в ИФВЭ и других ускорительных центрах в индивидуальном контроле доз нейтронного излучения. К тому времени произошли также значительные изменения в международной системе нормируемых и операционных дозиметрических величин [1], нашедшие отражение в готовившейся новой редакции НРБ. Необходимость стандартизации толщины покровного слоя над детекторами фотонов была ясно продемонстрирована в условиях Чернобыльской аварии, где показания различных дозиметров отличались в несколько раз в присутствии большого вклада  $\beta$ -излучения, и была регламентирована в требованиях ЕТ ИДК-86 [2].

Практическая реализация данной разработки началась в 1998 г. после утверждения Министерством РФ по атомной энергии Отраслевой программы “Введение в действие Норм радиационной безопасности НРБ-96 на предприятиях Минатома России”. При поддержке Минатома РФ был заключен договор о научно-техническом сотрудничестве между ИФВЭ и АЭХК (Ангарск) на разработку автоматизированного комплекса индивидуального дозиметрического контроля (АКИДК) смешанного фотон-нейтронного излучения на базе комплекса АКИДК-201 для контроля доз фотонов. Наш выбор был обусловлен ориентацией на отечественного производителя ТЛД-считывателя, а также успешным освоением на АЭХК промышленного производства лучших в мире монокристаллических детекторов  $\text{LiF}$  ДТГ-4 [3], разработанных в Институте геохимии (Иркутск).

Участие ИФВЭ в разработке АКИДК-301 включало в себя адаптацию разработанной нами ранее кассеты-дозиметра к условиям автоматизированного комплекса (наличие ТЛД-карты), разработку методов контроля характеристик дозиметра, методики градуировки и алгоритмов расчета доз, а также подготовку ТУ и технических заданий для АЭХК. В данной статье изложены физические принципы, положенные в основу конструкции индивидуального дозиметра ДВГН-01, а также расчетные и экспериментальные данные по его дозиметрическим характеристикам, полученные после завершения разработки.

## Физическое обоснование индивидуального дозиметра ДВГН-01

Подробное физическое обоснование индивидуального дозиметра смешанного излучения на основе ТЛД  $LiF$ , включающее литературный обзор, обоснование выбора оптимальной конфигурации дозиметра, расчеты энергетических зависимостей чувствительности (ЭЗЧ) к фотонам и нейтронам, а также экспериментальные данные в различных полях смешанного излучения, представлено в отчете ИФВЭ [4], подготовленном для Минатома РФ перед заключением договора с АЭХК. Здесь приводится краткое описание физических принципов, положенных в основу разработки.

Дозиметр предназначен для измерения индивидуальных эффективных доз облучения персонала ядерных установок в любых полях смешанного излучения, включающих фотоны, нейтроны и заряженные частицы (бета-излучение либо протоны, пионы, мюоны и электроны на ускорителях). Для реализации этих возможностей при измерении доз фотонов и заряженных частиц детекторы и кассета должны быть тканеэквивалентными, а толщина покровного слоя над детекторами должна строго соответствовать  $1 \text{ г/см}^2$ .

При регистрации нейтронного излучения основной задачей является повышение чувствительности к нейтронам, определяющей избирательность дозиметра по отношению к фотонам и заряженным частицам, так как доза нейтронов находится по разности показаний ТЛД  ${}^6LiF$  и  ${}^7LiF$ . Расчетные и экспериментальные исследования показывают, что наиболее эффективным методом повышения чувствительности дозиметра альбедного типа является применение полиэтиленового замедлителя нейтронов над ТЛД. Кроме того, необходимо минимизировать чувствительность дозиметра к тепловым нейтронам, так как вклад этого компонента во флюенс нейтронов может быть преобладающим, в то время как вклад в дозу редко превышает 10%.

В разработанных к настоящему времени индивидуальных дозиметрах альбедного типа для этих целей применяется кадмий либо борированный пластик. При использовании кадмия, сильно поглощающего низкоэнергетические фотоны и заряженные частицы, их дозу необходимо измерять с помощью другого дозиметра, находящегося на некотором удалении от альбедного. Во втором случае наличие поглотителя тепловых нейтронов вблизи ТЛД  ${}^6LiF$  резко снижает чувствительность дозиметра к промежуточным и быстрым нейтронам. Оптимальным вариантом, выбранным нами, является размещение тонкого борного фильтра над полиэтиленовым замедлителем, на удалении от ТЛД. Для уменьшения флюенса тепловых нейтронов в 10 раз достаточно  $0,1 \text{ г/см}^2$  карбида бора ( $B_4C$ ) с естественным содержанием изотопов.

Внешний вид кассеты-дозиметра ДВГН-01 представлен на **рис. 1**. В ТЛД-картах, имеющих дырочный код для считывания номера, находятся по два ТЛД  ${}^6LiF$  и  ${}^7LiF$  ДТГ-4 размерами  $05 \times 0,9 \text{ мм}$ . ТЛД-карта размещается в кассете-дозиметре под полиэтиленовым замедлителем толщиной  $0,65 \text{ г/см}^2$ , покрытым сверху борным фильтром ( $0,1 \text{ г/см}^2 B_4C$ ) и медной фольгой

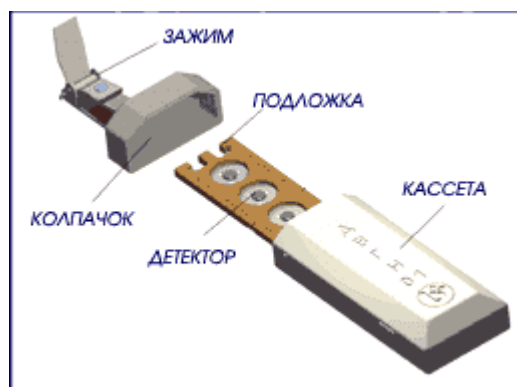


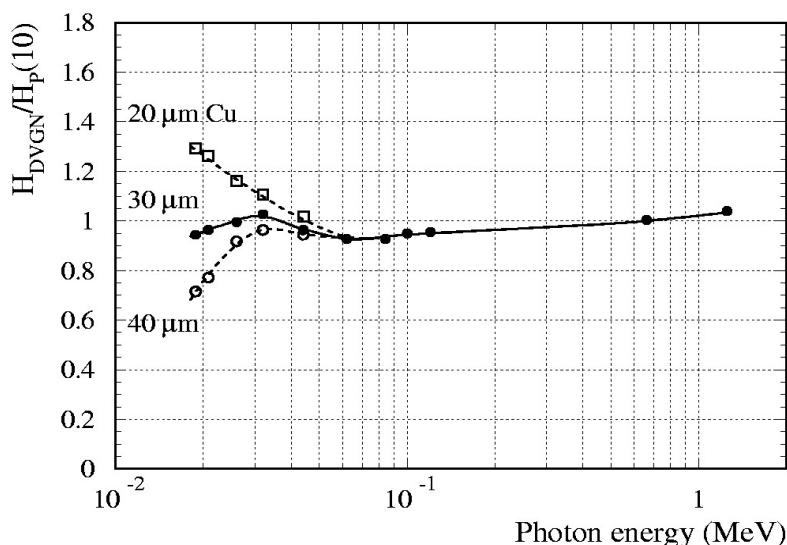
Рис. 1. Внешний вид индивидуального дозиметра ДВГН-01.

толщиной 30 мкм для выравнивания ЭЗЧ дозиметра к фотонам. Полная толщина вещества над детекторами (с учетом стенки кассеты и связующего борного фильтра) равна 1 г/см<sup>2</sup>. Корпус кассеты-дозиметра выполнен из ударопрочного полистирола.

### Энергетическая и угловая зависимость чувствительности к фотонам

Расчеты ЭЗЧ дозиметра к фотонному излучению, выполненные в работе [4], показали, что при низких энергиях фотонов для выравнивания функции чувствительности необходимо использовать корректирующий фильтр. Причинами являются небольшое отклонение фторида лития от тканеэквивалентности ( $Z_{эфф} = 8,3$  по сравнению с  $Z_{эфф} = 7,2$  для мягкой биологической ткани (МБТ)) и меньшее сечение поглощения фотонов полиэтиленом по сравнению с МБТ при малых энергиях, где преобладает сечение фотоэффекта. Оптимизационные расчеты проводились путем варьирования материала и толщины фильтра, а также толщины  $CH_2$  из условия сохранения полной толщины вещества над детекторами 1 г/см<sup>2</sup> и минимизации толщины фильтра. Оптимальным вариантом с точки зрения этих требований является медный фильтр толщиной около 30 мг/см<sup>2</sup>.

Экспериментальные исследования ЭЗЧ дозиметра ДВГН-01 к фотонам проводились в СНИИП (Москва). Были проверены различные технологии изготовления медного фильтра (напыление на полиэтиленовый замедлитель, замешивание медных опилок в борный фильтр, применение медной фольги), а также различные толщины фильтра. В результате проведенных испытаний был выбран вариант с медной фольгой толщиной 30 мкм. Экспериментальные данные по чувствительности дозиметра с фильтрами толщиной 20, 30 и 40 мкм при градуировке на источнике <sup>137</sup>Cs показаны на **рис. 2**. Можно видеть, что при энергиях от 18 кэВ до 1,25 МэВ (<sup>60</sup>Co) диапазон чувствительности ДВГН-01 с фольгой толщиной 30 мкм составляет от 0,92 до 1,04. Этот результат значительно лучше расчетной ЭЗЧ [4], где на 40-60 кэВ наблюдался трудноустраняемый максимум (1,2 по отношению к <sup>137</sup>Cs), связанный с большим вкладом рассеянного от фантома излучения при этих энергиях. В эксперименте максимум в этом диапазоне отсутствует, так как рассеянное излучение сильно поглощается металлической подложкой ТЛД (в расчетах не учитывалась).



**Рис. 2.** Энергетические зависимости чувствительности к фотонам ДВГН-01 с медными фильтрами различной толщины при нормальном облучении на фантоме.

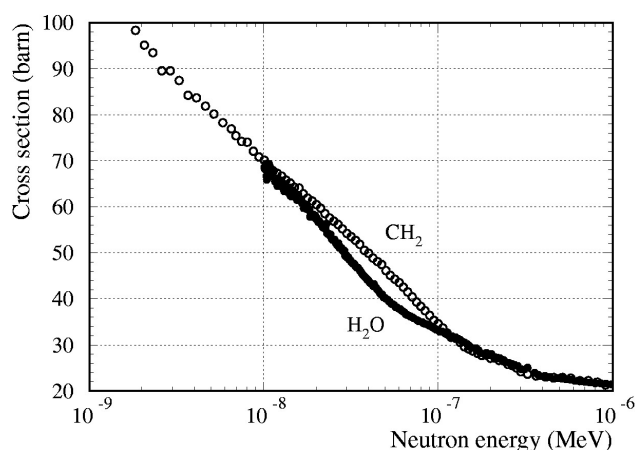
Угловая зависимость чувствительности ДВГН-01 изучалась путем облучения дозиметров, размещенных на фантоме, в поле рентгеновского излучения с энергией 61,6 кэВ. Полученные результаты, приведенные в **табл. 1**, показывают, что угловая зависимость чувствительности соответствует нормативным требованиям, предъявляемым к индивидуальным дозиметрам фотонных.

**Таблица 1.** Чувствительность ДВГН-01  $r(\alpha) = H_{\text{ДВГН}} / H_p(10, \alpha)$  в зависимости от угла падения фотонов с энергией 61,6 кэВ по отношению к нормальному облучению.

Угол	0°	20°	40°	60°
$r(\alpha)/r(0^\circ)$	1,00	1,03	1,01	1,15

### Энергетические зависимости чувствительности к нейтронам на различных фантомах

Расчеты ЭЗЧ ДВГН-01 к нейтронам выполнены по программе FANEUT [5]. В современную версию программы включен геометрический блок, разработанный ранее [6] для программы HADRON, а также данные ENDF/B-VI [7] по сечениям рассеяния тепловых нейтронов на связанных ядрах водорода. Влияние химической связи на полные сечения ( $n, H$ )-рассеяния в воде и полиэтилене иллюстрируется на **рис. 3**. Различия объясняются тем, что в воде рассеяние тепловых нейтронов на водороде описывается только процессом некогерентного неупругого рассеяния, в то время как в полиэтилене добавляется некогерентное упругое рассеяние на частично упорядоченных группах ядер водорода длинных молекул полимера. Дифференциальные сечения некогерентного неупругого рассеяния, описываемые законом  $S(\alpha, \beta)$ , также различаются для этих веществ.



**Рис. 3.** Сечения рассеяния тепловых нейтронов на ядрах водорода в воде и полиэтилене [8]. Сечение на ядрах водорода в  $H_2$  постоянно и равно 20,5 барн.

Функции чувствительности рассчитывались для условий направленного и изотропного облучения дозиметров на различных фантомах:

- водный фантом [9] в форме параллелепипеда размерами 30x30x15 см со стенками из оргстекла;
- фантомы из оргстекла (1,19 г/см<sup>3</sup>) и полиэтилена (0,95 г/см<sup>3</sup>) тех же размеров;
- тканеэквивалентный (МБТ) эллиптический цилиндр размерами 20x40x60 см;
- полиэтиленовый шар диаметром 10" (25,4 см).

Водный фантом рекомендован МКРЕ [10] в качестве стандартного при проведении градуировки индивидуальных дозиметров в полях излучения радионуклидных источников. На практике используются также его заменители из оргстекла и полиэтилена. Тканеэквивалентный эллиптический цилиндр является наиболее близкой моделью тела человека среди рассматриваемых фантомов, в то время как шаровой фантом удобен при градуировке индивидуальных дозиметров в полях рассеянного излучения.

Геометрические размеры, плотность и химический состав деталей ДВГН-01 задавались в расчетах в соответствии с чертежами и техническими данными на кассету-дозиметр. Сечения рассеяния тепловых нейтронов на ядрах водорода в МБТ брались такими же, как для воды. Для полимеров (оргстекло, полистирол и т.д.) использовались сечения рассеяния тепловых нейтронов на ядрах водорода в полиэтилене. Рассеяние тепловых нейтронов на ядрах тяжелее водорода рассчитывалось по газовой модели. Для повышения эффективности расчета использовался смещенный источник нейтронов, поглощение нейтронов учитывалось с помощью статистических весов.

Вклад в чувствительность при пересечении нейтроном ТЛД  ${}^6\text{LiF}$  определялся по формуле

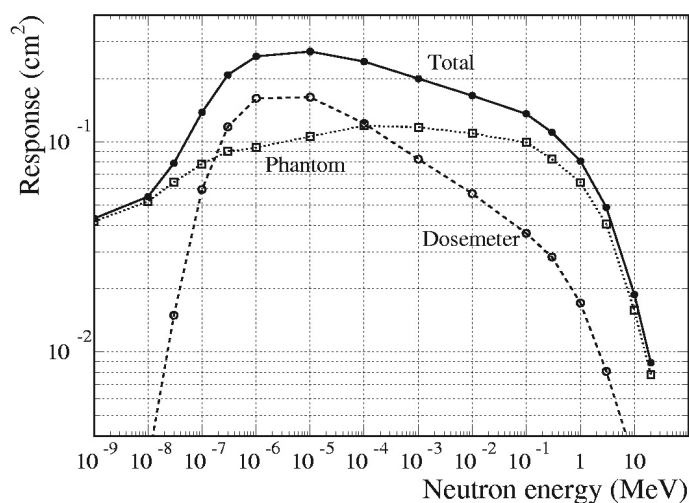
$$\Delta R(E_n, l) = 1 - \exp[-\Sigma_{n,\alpha}(E_n) \cdot l], \quad (1)$$

где  $\Sigma_{n,\alpha}(E_n)$  – макроскопическое сечение реакции  ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$  для ТЛД  ${}^6\text{LiF}$  и  $l$  – длина отрезка траектории нейтрона в детекторе. Так как на практике вклад нейтронов в показания ТЛД  ${}^6\text{LiF}$  определяется как разность показаний детекторов  ${}^6\text{LiF}$  и  ${}^7\text{LiF}$ , выраженных в единицах дозы фотонов, при энергиях нейтронов выше 1 кэВ вместо  $\Sigma_{n,\alpha}$  в формуле (1) использовалась величина

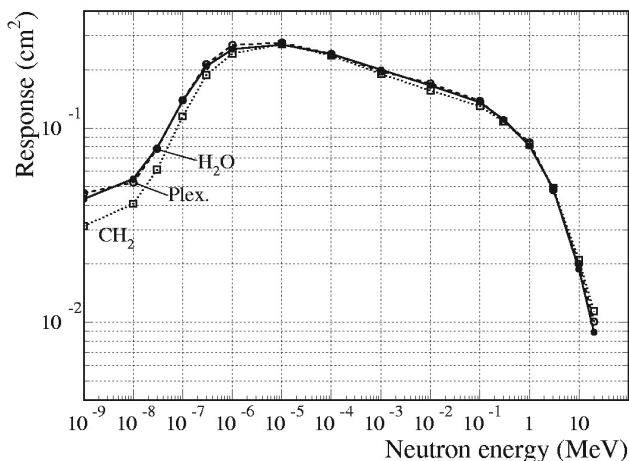
$$\Sigma'_{n,\alpha}(E_n) = a \cdot [k_{{}^6\text{LiF}}(E_n) - k_{{}^7\text{LiF}}(E_n)], \quad (2)$$

где  $k_i(E_n)$  – керма-факторы нейтронов в ТЛД  ${}^6\text{LiF}$  и  ${}^7\text{LiF}$  [11]. Коэффициент  $a$  находился из условия нормировки:  $\Sigma'_{n,\alpha}(1 \text{ кэВ}) = \Sigma_{n,\alpha}(1 \text{ кэВ})$ . Данный подход учитывает вклад ядерных реакций, отличных от  $(n,\alpha)$ -реакции, при взаимодействии быстрых нейтронов с ядрами  ${}^6\text{Li}$  и  ${}^7\text{Li}$ .

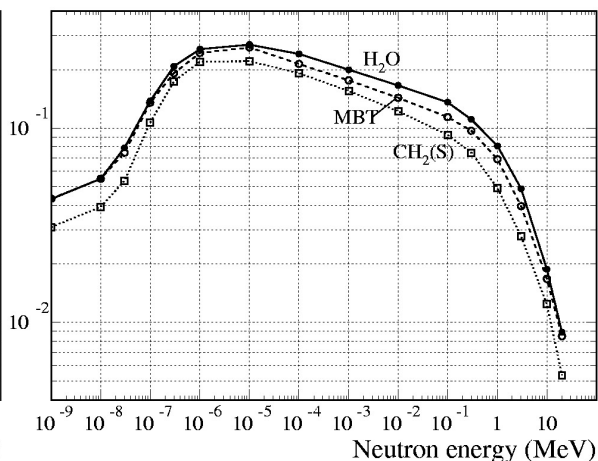
При расчетах функций чувствительности разыгрывалось от нескольких сот тысяч до нескольких десятков миллионов историй нейтронов, в зависимости от энергии нейтронов и условий облучения (направленное, либо изотропное), для достижения статистической погрешности результатов менее 5%. Результаты нормировались на расчетный флюенс нейтронов. Расчеты



**Рис. 4.** Чувствительность ДВГН-01 к нейтронам при направленном облучении на водном фантоме. Показаны также вклады нейтронов, падающих на дозиметр и фантом.



**Рис. 5.** ЭЗЧ ДВГН-01 к нейтронам при направленном облучении на фантомах из различных материалов в форме параллелепипеда (30x30x15 см).



**Рис. 6.** То же, что на рис. 5, на водном, эллиптическом (МБТ) и шаровом ( $CH_2$ ) фантомах.

проводились при 16 энергиях от  $10^{-9}$  до 20 МэВ. Полученные функции чувствительности имеют размерность числа  $(n, \alpha)$ -реакций в ТЛД  ${}^6LiF$  на единичный флюенс падающих нейтронов.

Результаты расчета ЭЗЧ ДВГН-01 при нормальном облучении (направленном облучении широким пучком перпендикулярно поверхности фантома) на водном фантоме представлены на **рис. 4**. На рисунке показаны также вклады нейтронов, падающих на кассету-дозиметр и на поверхность фантома, не покрытую кассетой. Разделение этих вкладов дает возможность показать влияние борного фильтра, эффективно поглощающего нейтроны с энергиями ниже 0,1 эВ, падающие на кассету. Можно видеть, что выбранная толщина фильтра близка к оптимальной. Увеличение ее не приводит к заметному уменьшению чувствительности дозиметра к тепловым нейтронам, т.к. основной вклад при этих энергиях связан с диффузией нейтронов с поверхности фантома, не покрытой кассетой.

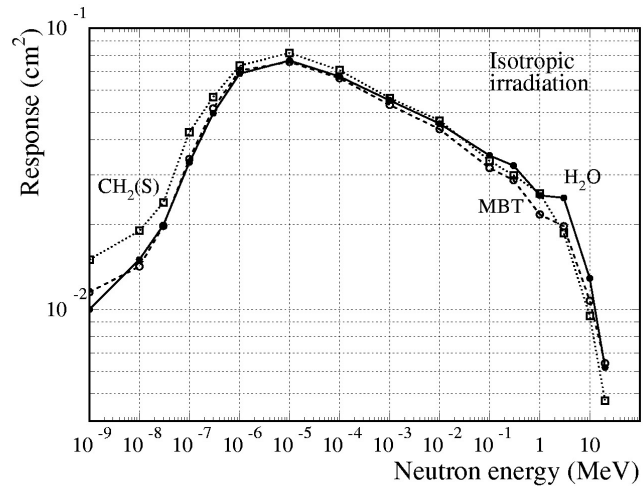
На **рис. 5** приведены функции чувствительности ДВГН-01 при нормальном облучении на фантомах одинаковых размеров и формы, но разного химического состава. В широком диапазоне энергий от 10 эВ до 10 МэВ чувствительность на этих фантомах примерно одинакова в пределах статистических погрешностей расчета. Практическим выводом из этих результатов является возможность градуировки дозиметров в полях быстрых нейтронов радионуклидных источников на любом из этих фантомов. Чувствительность к тепловым нейтронам на полиэтиленовом фантоме заметно ниже, чем на водном фантоме, вследствие больших сечений рассеяния нейтронов на водороде в  $CH_2$  (рис. 3). На фантоме из оргстекла эффект различия сечений полностью компенсируется меньшим содержанием водорода. Этот результат является довольно неожиданным, однако подтверждается рекомендациями МКРЕ [10] о возможности градуировки индивидуальных дозиметров нейтронов как на водном фантоме, так и на фантоме из оргстекла, без введения дополнительных поправок.

Влияние размеров и формы фантома на чувствительность ДВГН-01 значительно больше, чем влияние химического состава. На **рис. 6** показаны результаты расчета для условий направленного облучения шарового полиэтиленового фантома и направленного облучения тканеэквивалентного эллиптического цилиндра вдоль малой оси. При направленном облучении основную роль в наблюдаемых различиях играет не размер фантома, а кривизна поверхности, на которой размещен дозиметр. При тепловых энергиях, где основной вклад в отклик обусловлен нейтронами, падающими на фантом вблизи дозиметра, влияние кривизны поверхности мало. Результаты расчета для тканеэквивалентного фантома близки к данным для водного фантома, а ЭЗЧ на полиэтиленовых фантомах (шаровом и плоском) также практически не отличаются. Для



быстрых нейтронов различия в чувствительности при облучении ДВГН-01 на эллиптическом фантоме по сравнению с водным фантомом достигают 20%, а при облучении на шаровом фантоме – более 40%.

На **рис. 7** представлены функции чувствительности дозиметра при изотропном облучении на водном, эллиптическом и шаровом фантомах. Результаты расчета для шарового и



**Рис. 7.** То же, что на рис. 6, но при изотропном облучении.

эллиптического фантома показывают в этом случае обратную закономерность по сравнению с условиями направленного облучения. Чувствительность ДВГН-01 на шаровом фантоме в широком диапазоне энергий несколько выше, чем на эллиптическом. Максимальное различие наблюдается на тепловых нейтронах, однако оно не превышает 20% при усреднении по Максвелловскому спектру тепловых нейтронов. Водный фантом, разработанный для градуировки дозиметров при нормальном облучении, менее пригоден в полях рассеянного излучения вследствие недостаточной толщины (15 см). Расчетные ЭЗЧ ДВГН-01 к нейтронам при облучении на различных фантомах представлены в **табл. 2**.

**Таблица 2.** Энергетические зависимости чувствительности ДВГН-01 к нейтронам при направленном и изотропном облучении на различных фантомах (см<sup>2</sup>).

E <sub>n</sub> (МэВ)	Направленное облучение					Изотропное облучение		
	H <sub>2</sub> O	Оргст.	CH <sub>2</sub> (P)	МБТ	CH <sub>2</sub> (S)	H <sub>2</sub> O	МБТ	CH <sub>2</sub> (S)
1.0-9	4.32-2	4.63-2	3.13-2	4.34-2	3.10-2	9.97-3	1.15-2	1.50-2
1.0-8	5.50-2	5.25-2	4.09-2	5.50-2	3.94-2	1.50-2	1.42-2	1.90-2
3.0-8	7.92-2	7.81-2	6.10-2	7.48-2	5.36-2	1.99-2	1.98-2	2.39-2
1.0-7	1.38-1	1.39-1	1.15-1	1.35-1	1.07-1	3.32-2	3.42-2	4.25-2
3.0-7	2.08-1	2.13-1	1.88-1	1.92-1	1.74-1	4.98-2	5.17-2	5.69-2
1.0-6	2.55-1	2.68-1	2.42-1	2.44-1	2.19-1	6.87-2	7.06-2	7.34-2
1.0-5	2.69-1	2.75-1	2.70-1	2.60-1	2.21-1	7.65-2	7.58-2	8.15-2
1.0-4	2.41-1	2.41-1	2.36-1	2.14-1	1.92-1	6.71-2	6.62-2	7.08-2
1.0-3	2.00-1	1.96-1	1.90-1	1.76-1	1.55-1	5.52-2	5.32-2	5.64-2
1.0-2	1.66-1	1.70-1	1.56-1	1.43-1	1.22-1	4.57-2	4.37-2	4.69-2
1.0-1	1.36-1	1.38-1	1.30-1	1.14-1	9.22-2	3.52-2	3.18-2	3.37-2
3.0-1	1.11-1	1.08-1	1.08-1	9.70-2	7.49-2	3.24-2	2.88-2	2.99-2
1.0+0	8.12-2	8.45-2	8.20-2	6.92-2	4.92-2	2.54-2	2.17-2	2.58-2
3.0+0	4.88-2	4.81-2	4.92-2	3.97-2	2.77-2	2.49-2	1.97-2	1.87-2
1.0+1	1.88-2	2.00-2	2.10-2	1.68-2	1.24-2	1.29-2	1.07-2	9.46-3
2.0+1	8.89-3	1.01-2	1.14-2	8.52-3	5.36-3	6.22-3	6.42-3	4.73-3

## Методика градуировки и определения индивидуальных доз по показаниям ДВГН-01

Целью градуировки индивидуальных дозиметров является передача единицы индивидуального эквивалента дозы  $H_p(10)$  средству измерения. Градуировка ДВГН-01 в ИФВЭ проводится в соответствии с МВИ [12] последовательно в аттестованных полях фотонного и нейтронного излучения при нормальном облучении дозиметров, размещенных на фантоме из оргстекла. При градуировке используются установки типа УПГД с источником  $^{137}\text{Cs}$  (фотоны) и УКПН с источником  $^{239}\text{Pu-Be}$  (нейтроны), в полях которых не требуется введения поправок на вклад рассеянного излучения.

Градуировочные коэффициенты  $c_{6,7}^\gamma$  [мЗв/имп.] детекторов  $^6\text{LiF}$  и  $^7\text{LiF}$  к фотонам определяются по формуле

$$c_{6,7}^\gamma = \frac{H_p^\gamma(10)}{M_{6,7}}, \quad (3)$$

где  $M_{6,7}$  [имп.] – показания детекторов (светосуммы);  $H_p^\gamma(10)$  – градуировочная доза фотонов. Градуировочные коэффициенты детекторов  $^6\text{LiF}$  к нейтронам  $c_6^n$  находятся из выражения

$$c_6^n = \frac{H_p^n(10)}{M_6 - c_7^\gamma \cdot M_7 / c_6^\gamma}, \quad (4)$$

где в знаменателе вычтен вклад фотонов из показаний ТЛД  $^6\text{LiF}$  в смешанном поле нейтрон-фотонного излучения градуировочного источника нейтронов.

Индивидуальные градуировочные коэффициенты каждого детектора заносятся в базу данных АКЖДК-301. При измерении доз смешанного излучения после проведения градуировки используются формулы

$$\begin{cases} H_\gamma = c_7^\gamma \cdot M_7 \\ H_n = c_6^n (M_6 - H_\gamma / c_6^\gamma) \end{cases}. \quad (5)$$

Для защиты от потери информации при возможных сбоях аппаратуры в ТЛД-карте ДВГН-01 размещены по два детектора  $^7\text{LiF}$  и  $^6\text{LiF}$ . Результирующие дозы фотонов и нейтронов определяются как средние по показаниям соответствующих пар ТЛД. Кроме того, перед расчетом доз по формулам (5) показания  $M_{6,7}$  корректируются на величину отношения светосумм  $M_{р,ли}$  от встроенного радиолюминесцентного источника (РЛИ), зарегистрированных при градуировке и при измерении [13].

При использовании ДВГН-01 в индивидуальном дозиметрическом контроле необходимо учитывать также вклад естественного радиационного фона в результаты измерений доз (5), фединг дозы нейтронов и ЭЗЧ дозиметра к нейтронам [12]. С учетом этих поправок индивидуальные эквиваленты доз фотонов и нейтронов рассчитываются как

$$\begin{cases} H_p^\gamma(10) = H_\gamma - H_\gamma^\phi \\ H_p^n(10) = k_H k_{фед} (H_n - H_n^\phi) = k_H H_{ДВГН} \end{cases}, \quad (6)$$

где  $H_{\gamma,n}^\phi$  – средняя фоновая доза фотонов (нейтронов) и  $k_{фед}$  – поправка на фединг, зависящие от длительности периода контроля;  $k_H$  – поправочный коэффициент, учитывающий различие чувствительности ДВГН-01 к нейтронам в условиях градуировки и в рабочих условиях.

Избирательность дозиметра в смешанном поле фотон-нейтронного излучения, то есть отношение чувствительностей к нейтронам и фотонам в единицах  $H_p(10)$  соответствующих излучений, для градуировочного спектра нейтронов определяется отношением  $c_6^\gamma / c_6^n$ . По результа-

там градуировки в ИФВЭ среднее значение этого отношения для первых партий ГЛД  ${}^6\text{LiF}$  составляет 0,67, то есть чувствительность ДВГН-01 к нейтронам близка к чувствительности к фотонам. В полях нейтронов с мягкими спектрами, характерных для условий работы персонала за защитами ядерных установок, чувствительность к нейтронам значительно выше, чем в жестком поле градуировочного источника.

### Энергетическая и угловая зависимость чувствительности в полях нейтронов с протяженными спектрами

Основным источником систематических неопределенностей при измерении индивидуальных доз персонала с помощью ДВГН-01 является энергетическая зависимость чувствительности к нейтронам, сильно отличающаяся от соответствующей зависимости  $H_p^n(10)$ . Данная неопределенность заключена в значении поправочного коэффициента  $k_H$ , оценка которого на рабочих местах персонала является самостоятельной и довольно сложной задачей.

Это связано с тем, что в настоящее время отсутствуют средства измерения индивидуального эквивалента дозы нейтронов в полях рассеянного излучения, в отличие от амбиентного эквивалента дозы  $H^*(10)$  зависящего не только от энергетического, но и от углового распределения нейтронов. Решение этой проблемы заключается в использовании расчетных функций чувствительности ДВГН-01. Рассмотрим методику оценки поправочных коэффициентов для двух стандартных условий: а) направленного облучения со стороны груди (AP) (работа операторов с фиксированным положением тела по отношению к источнику) и б) изотропного облучения (ISO), наиболее характерного при облучении персонала в полях рассеянного излучения.

Для известного спектра нейтронов  $\Phi(E)$ , измеренного, например, спектрометром Боннера, поправочный коэффициент  $k_H$  для условий направленного облучения со стороны груди рассчитывается по формуле

$$k_H(AP) = \frac{H_p(10,0^\circ)}{H_{\text{ДВГН}}(AP)} = \frac{\int h_p(10,0^\circ)(E)\Phi(E)dE}{c \cdot \int R_{AP}(E)\Phi(E)dE}, \quad (7)$$

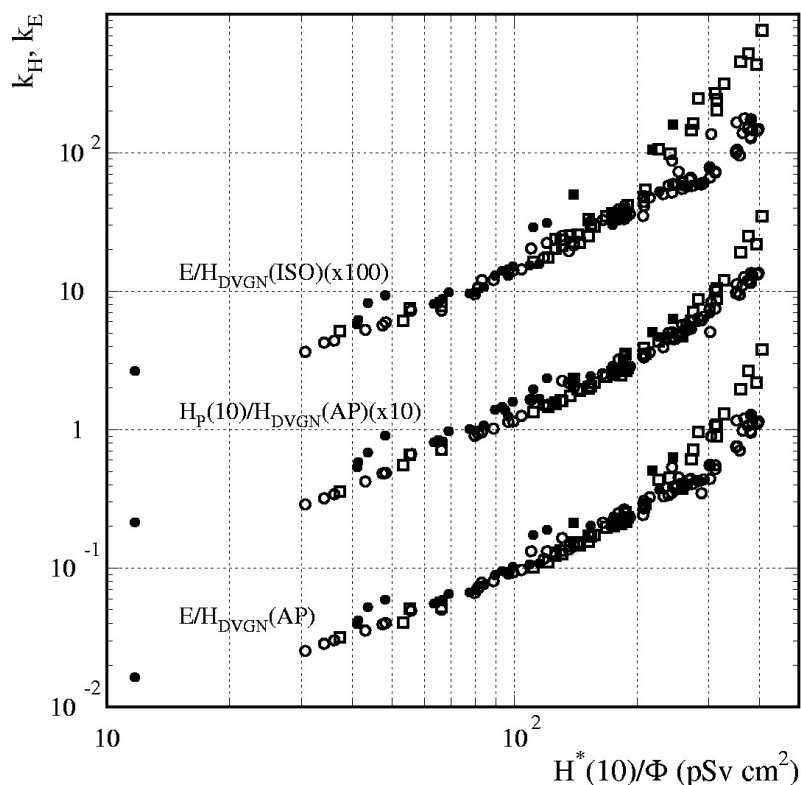
где  $R_{AP}(E)$  – ЭЗЧ ДВГН-01 к нейтронам при направленном облучении тканеэквивалентного эллиптического цилиндра. Градуировочный коэффициент  $c$  рассчитывается для условий направленного облучения дозиметра на плоском фантоме в поле градуировочного источника со спектром нейтронов  $\Phi_{zp}(E)$ :

$$c = \frac{H_p^{zp}(10,0^\circ)}{H_{\text{ДВГН}}^{zp}} = \frac{\int h_p(10,0^\circ)(E)\Phi_{zp}(E)dE}{\int R_{AP}^{zp}(E)\Phi_{zp}(E)dE}. \quad (8)$$

Данный подход может быть использован также для оценки поправочных коэффициентов непосредственно в терминах эффективной дозы нейтронов:

$$\left\{ \begin{array}{l} k_E(AP) = \frac{E(AP)}{H_{\text{ДВГН}}(AP)} = \frac{\int e_{AP}(E)\Phi(E)dE}{c \cdot \int R_{AP}(E)\Phi(E)dE} \\ k_E(ISO) = \frac{E(ISO)}{H_{\text{ДВГН}}(ISO)} = \frac{\int e_{ISO}(E)\Phi(E)dE}{c \cdot \int R_{ISO}(E)\Phi(E)dE} \end{array} \right., \quad (9)$$

где  $R_{AP}(E)$  и  $R_{ISO}(E)$  – функции чувствительности ДВГН-01 при направленном и изотропном облучении на эллиптическом фантоме.



**Рис. 8.** Значения поправочных коэффициентов  $k_H(AP)$ ,  $k_E(AP)$  и  $k_E(ISO)$  для различных спектров нейтронов. Круги – спектры на основе радионуклидных источников и реакторные спектры, квадраты – ускорительные спектры. Черные точки – спектры с известным вкладом тепловых нейтронов, светлые точки – без тепловых нейтронов.

Расчетные значения поправочных коэффициентов  $k_H$  и  $k_E$  при градуировке на УКПН ( $^{239}\text{Pu} - \text{Be}$ ) приведены на **рис. 8** для различных спектров нейтронов (спектры на основе радионуклидных источников, за защитой реакторов и ускорителей) в зависимости от параметра жесткости спектра  $h^*(10) = H^*(10)/\Phi$ . Левые точки соответствуют Максвелловскому спектру тепловых нейтронов. Разброс значений поправочных коэффициентов в мягких спектрах связан, в основном, с вариацией вклада во флюенс тепловых нейтронов (в большинстве случаев эти данные в оригинальных работах отсутствовали). Для жестких нейтронных спектров ( $h^*(10) > 200 \text{ пЗв}\cdot\text{см}^2$ ) зависимости для ускорительных и низкоэнергетических спектров заметно отличаются друг от друга, что обусловлено низкой чувствительностью ДВГН-01 к нейтронам с энергией выше 20 МэВ, вклад которых в измеряемые дозы за защитой ускорителей может быть значительным (особенно в эффективную дозу  $E(ISO)$ ).

Необходимо отметить близость зависимостей поправочных коэффициентов  $k_H(AP)$ ,  $k_E(AP)$  и  $k_E(ISO)$ , за исключением жестких ускорительных спектров. При использовании поправочных коэффициентов  $k_H(AP)$  (измерение  $H_p(10)$ ) дополнительная неопределенность при переходе к эффективной дозе не превышает в большинстве случаев 30% для низкоэнергетических спектров нейтронов с тенденцией к завышению эффективной дозы при направленном облучении и к занижению – при изотропном. Эти результаты соответствуют приведенным в МУ [14] значениям  $E/H_p(10)$  для различных нейтронных спектров, т.е. угловая зависимость чувствительности ДВГН-01 близка к соответствующей зависимости  $H_p(10)$ . Экспериментальные зна-

чения угловой зависимости чувствительности ДВГН-01  $H_{ДВГН} / H_P(10, \alpha)$  при облучении в градуировочном поле нейтронов УКПН ( $^{239}\text{Pu} - \text{Be}$ ) приведены в **табл. 3**.

**Таблица 3.** Чувствительность ДВГН-01  $r(\alpha) = H_{ДВГН} / H_P(10, \alpha)$  в зависимости от угла падения нейтронов градуировочного источника УКПН ( $^{239}\text{Pu} - \text{Be}$ ) по отношению к нормальному облучению.

Угол	0°	20°	40°	60°
$r(\alpha)/r(0^\circ)$	1,00	0,96	0,89	0,87

Сравнение расчетных ЭЗЧ ДВГН-01 к нейтронам с экспериментальными данными проводилось в опорных полях нейтронного излучения ИФВЭ [15] на основе радионуклидных источников:  $^{239}\text{Pu} - \text{Be}$ ,  $^{252}\text{Cf}$ ,  $^{252}\text{Cf}$  в стальном шаре диаметром 30 см,  $^{252}\text{Cf}$  в полиэтиленовом шаре диаметром 30 см. При сравнении расчетных и экспериментальных данных по чувствительности индивидуальных дозиметров в этих полях возникает проблема значительного вклада рассеянного от стен помещения излучения, поэтому сравнение проводилось по величине  $H^*(10) / H_{ДВГН}$ , непосредственно измерявшейся в эксперименте.

В расчетах предполагалось, что рассеянное излучение имеет изотропное угловое распределение. Для первых трех полей угловое распределение тепловых нейтронов также считалось изотропным, для четвертого поля ( $\text{Cf} + \text{CH}_2$ ) флюенс тепловых нейтронов распределялся между направленной и изотропной компонентами в соответствии с вкладом рассеянного излучения. Результаты расчета, представленные в **табл. 4**, хорошо согласуются с экспериментальными данными. Неучет углового распределения рассеянных нейтронов приводит к занижению расчетных результатов до 20%.

**Таблица 4.** Сравнение расчетных и экспериментальных значений  $H^*(10) / H_{ДВГН}$  в опорных полях нейтронов ИФВЭ [15].  $\varphi_s$  – вклад рассеянного излучения во флюенс надкадмиевых нейтронов,  $\varphi_{th}$  – вклад тепловых нейтронов в полный флюенс нейтронов.

Поле	$h^*(10)$ (пЗв·см <sup>2</sup> )	$\varphi_s$	$\varphi_{th}$	$H^*(10) / H_{ДВГН}$	
				Эксп.	Расчет
$\text{Pu-Be}$	362	0,16	0,051	1,15	1,19
$\text{Cf}$	358	0,25	0,062	1,11	1,08
$\text{Cf} + \text{Fe}$	264	0,22	0,098	0,63	0,62
$\text{Cf} + \text{CH}_2$	167	0,31	0,40	0,40	0,40

В работе [16] были выполнены исследования неоднородности толщины борного фильтра в первой партии дозиметров ДВГН-01. Для выбора оптимальной методики контроля и оценки вкладов различных компонентов излучения в показания дозиметра измерения проводились разными методами: а) измерения чувствительности ДВГН-01 на фантоме с различными кадмиевыми фильтрами ( $\text{Cd}$  сверху кассеты, снизу и с обеих сторон); б) то же, без фантома; в) измерения детектором ДКС-96Н, экранированным дозиметром ДВГН-01 и различными кадмиевыми фильтрами. Облучение дозиметров проводилось в поле  $\text{Cf} + \text{CH}_2$  с большим вкладом тепловых нейтронов (табл. 4).

Разные методы показали близкие результаты по ослаблению флюенса тепловых нейтронов борными фильтрами. В качестве стандартной была выбрана методика измерений с помо-

щью ДКС-96Н благодаря наименьшим систематическим ошибкам и оперативности измерений. На основании полученных результатов были подготовлены дополнительные технические требования к технологии изготовления борного фильтра. В измерениях на фантоме, кроме того, были оценены вклады различных компонентов излучения, регистрируемых дозиметром. Так, вклад надкадмиевых нейтронов, незамедленных до тепловых энергий кассетой и фантомом, составляет лишь 18%. 50% отклика дозиметра определяется надкадмиевыми нейтронами, термализованными фантомом и кассетой, и 32% – внешними тепловыми нейтронами, падающими на кассету и фантом. Последняя величина меньше вклада тепловых нейтронов во флюенс и хорошо согласуется с расчетным значением вклада тепловых нейтронов в чувствительность ДВГН-01 для данного спектра (33%).

### Заключение

Индивидуальный дозиметр ДВГН-01 разработан в соответствии с современными отечественными и международными рекомендациями по измерению индивидуальных эффективных доз смешанного излучения и оптимизирован по основным дозиметрическим характеристикам: энергетическим и угловым зависимостям чувствительности к нейтронам, фотонам и заряженным частицам, избирательности и т.д. Необходимо отметить, что все рассмотренные характеристики обусловлены только конструктивными особенностями дозиметра и не зависят от типа считывателя и метода обсчета ТЛД. Аналогов в РФ и за рубежом дозиметр не имеет.

В настоящее время ДВГН-01 в составе комплекса АКЖДК-301 введен в эксплуатацию на нескольких предприятиях Минатома РФ, в том числе в ИФВЭ, где отличительной особенностью является измерение индивидуальных доз нейтронов по методике комбинированного дозиметра (ДВГН+МК-20) [17]. Основной проблемой при использовании ДВГН-01 в индивидуальном дозиметрическом контроле является учет энергетической зависимости чувствительности к нейтронам. Методы и средства определения поправочных коэффициентов на рабочих местах персонала, в том числе методика комбинированного дозиметра нейтронов, будут рассмотрены в отдельной статье.

Данная работа выполнена при поддержке Методического Совета при Управлении ядерной и радиационной безопасности Агентства по атомной энергии РФ.

### Список литературы

- [1] ICRU. *Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources*. ICRU Report 39. Bethesda, MD (1985).
- [2] *Единые требования к системе приборов индивидуального дозиметрического контроля внешнего облучения (ЕТ ИДК-86)*. М., 1987.
- [3] А.И.Непомнящих, С.Н.Мироненко, Г.П.Афонин, А.И.Селявко. *Монокристаллические детекторы на основе фтористого лития*. – Атомная энергия **58** (4), 257-259 (1985).
- [4] В.Н.Лебедев, А.В.Санников, Е.Г.Спиров, Е.Н.Савицкая. *Физическое обоснование альбедного индивидуального дозиметра смешанного излучения на основе ТЛД LiF*. Отчет ИФВЭ, Протвино, 1998.
- [5] А.М.Biskupchuk, V.E.Borodin., V.T.Golovachik, E.P.Korshunova, V.N.Lebedev and A.V.Sannikov. *Interpretation of the Readings of Combined Albedo-Track Personnel Neutron Dosimeters in the Terms of Dose Equivalent*. Kernenergie **30**, 419-424 (1987); V.E.Borodin, V.T.Golovachik, E.P.Korshunova, V.N. Lebedev, A.V.Sannikov and E.G.Spirov. *Response of*

- Albedo and Fission Track Detectors to Neutrons in the Energy Range from Thermal to 20 MeV.* Kernenergie **31**, 267-273 (1988).
- [6] A.V.Sannikov, V.Mares and H.Schraube. *High Energy Response Functions of Bonner Spectrometers.* Radiat. Prot. Dosim. **70** (1-4), 291-294 (1997).
- [7] V.McLane. *ENDF201: ENDF/B-VI Summary Documentation.* BNL-NCS-17541. National Nuclear Data Center (NNDC), Brookhaven National Laboratory (1996).
- [8] V.McLane. *CSISRS experimental nuclear data file.* National Nuclear Data Center (NNDC), Brookhaven National Laboratory (1988).
- [9] International Organization for Standardization. *Reference Neutron Radiations – Part 2: Calibration Fundamentals Related to the Basic Quantities Characterizing the Radiation Field.* International Standard, ISO 8529-2 (Geneva: ISO) (2000).
- [10] ICRU. *Determination of Operational Dose Equivalent Quantities for Neutrons.* ICRU Report 66. Bethesda, MD (2001).
- [11] R.S.Caswell, J.J.Coyne and M.L.Randolf. *Kerma Factors of Elements and Compounds for Neutron Energies below 30 MeV.* Int. J. Appl. Radiat. Isot. **33**, 1269-1290 (1982).
- [12] *Типовая методика выполнения измерений индивидуальных эффективных доз смешанного фотон-нейтронного излучения с помощью индивидуального дозиметра ДВГН-01.* (МВИ № 01-2005-двгн). Протвино, 2005.
- [13] *Комплекс автоматизированный индивидуального дозиметрического контроля АКИДК-301.* Руководство по эксплуатации. Ангарск, 2001.
- [14] МУ 2.6.1.45 - 2001. *Определение индивидуальных эффективных доз нейтронного излучения.* Методические указания. ДБЧС МАЭ РФ, Федеральное управление «Медбиоэкстрем» Минздрава России, 2001.
- [15] 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.
- [16] А.В.Санников, В.А.Пикалов, Н.Н.Бараненков, Е.В.Косьяненко, Е.Г.Спириков. *Исследование неоднородности характеристик индивидуального дозиметра ДВГН-01 по ослаблению флюенса тепловых нейтронов борным фильтром.* Отчет ИФВЭ, Протвино, 2002.
- [17] *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.

*Рукопись поступила 31 марта 2005 г.*

А.В. Санников и др.  
Индивидуальный дозиметр смешанного излучения ДВГН-01:  
разработка и исследование характеристик.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы Word.  
Редактор Н.В. Ежела.

---

Подписано к печати	05. 04.2005.	Формат 60 × 84/8.	Офсетная печать.
Печ.л. 1,62.	Уч.– изд.л. 1,3.	Тираж 130.	Заказ 36.
ЛР №020498	от 17.04.97.	Индекс 3649.	

---

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий,  
142282, Протвино Московской обл.



Индекс 3649

---

ПРЕПРИНТ 2005-6, ИФВЭ, 2005

---