



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2004–14
ОРИ

А.Г. Алексеев, Н.В. Кирякова, В.П. Крючков*, В.М. Дунилин,
Е.В. Косьяненко, Е.Г. Спиров

**МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ДОЗИМЕТРОВ НЕЙТРОНОВ
ДВН-А-01 И ДВГН-01**

Направлено в АНРИ

* Концерн «Росэнергоатом», Москва

Протвино 2004

Аннотация

Алексеев А.Г., Кирякова Н.В., Крючков В.П. и др. Метрологические вопросы использования индивидуальных дозиметров нейтронов ДВН-А-01 и ДВГН-01: Препринт ИФВЭ 2004–14. – Протвино, 2004. – 15 стр., 10 рис., 7 табл., библиогр: 16 .

Работа является частью цикла работ, посвященных использованию альбедных дозиметров нейтронов в индивидуальном дозиметрическом контроле. Представлены результаты исследования фединга дозиметров, чувствительности к тепловым нейтронам, рассмотрены вопросы калибровки. Обсуждаются вопросы стандартизации методики выполнения измерений для этих дозиметров.

Abstract

Alexeev A.G., Kiryakova N.V., Kryuchkov V.P. et al. Metrological Issue of The Use of Neutron Personal Dosimeters DVN-A-01 and DVGН-01; IHEP Preprint 2004–14. – Protvino, 2004. – p. 15, figs: 10, table: 7, refs.: 16.

The work is a part of series works which are considered methodical procedure for use of neutron albedo personal dosimeters . The results of dosimeter feding research a response to thermal neutrons are submitted, the questions of calibration are considered. The questions standardization of measurement technique for these dosimeters are discussed.

Введение

Внедрение в практику предприятий Минатома России индивидуальных дозиметров нейтронов, основанных на альбедном принципе, совпало по времени с внедрением новых подходов к нормированию в области радиационной безопасности (НРБ-99) [1]. В частности, в нормативных документах появились новые подходы и требования к качеству проведения измерений в индивидуальном дозиметрическом контроле (ИДК), что потребовало изучения методических вопросов, связанных с измерением индивидуальной дозы нейтронов с помощью этих дозиметров.

Методические вопросы можно разделить на две группы. Одна группа связана с измерением индивидуальной дозы в отличающихся друг от друга нейтронных спектрах, частично этот вопрос был рассмотрен в работе [2]. Другая группа – это метрологические вопросы (условия калибровки, уменьшение погрешности измерения и др.). Индивидуальные дозиметры нейтронов, основанные на альбедном принципе, используются уже около 30 лет [3]. Вопросам стандартизации процедуры измерения и калибровки индивидуальных дозиметров уделялось много внимания, что нашло отражение в международных стандартах (например, [4, 5, 6, 7]).

В 2000 г. в ИФВЭ по заказу концерна «Росэнергоатом» разработан индивидуальный дозиметр нейтронов ДВН-А-01 [8], основанный на альбедном принципе. В 2001–2002 гг. Ангарский электролизно-химический комбинат совместно с ИФВЭ и ВНИИФТРИ закончил сертификационные испытания комплекса АКЖДК-301, в состав которого входят индивидуальные дозиметры нейтронов ДВГН-01 [9]. В ИФВЭ было продолжено детальное изучение характеристик этих дозиметров. Результаты исследований показали что:

- необходимо учитывать некоторые особенности этого типа дозиметра, которые не отражены в рекомендациях по стандартным измерительным процедурам;
- в отдельных случаях стандартные поверочные установки (типа УКПН-1М) неудобны (процедура калибровки занимает много времени), что потребовало разработки дополнительных стендов для проведения калибровки этих дозиметров.

Целью данной работы было исследование тех характеристик дозиметров и методик их контроля, которые влияют на погрешность измерения индивидуального эквивалента дозы в ИДК. В работе представлены следующие результаты:

- Исследование фединга (потери информации) дозиметров ДВГН-01 для нейтронного излучения.
- Исследование зависимости чувствительности дозиметров от используемого при калибровке фантома.
- Зависимость чувствительности дозиметров от их взаимного расположения на фантоме.
- Угловая зависимость чувствительности дозиметров на шаровом фантоме от мононаправленного нейтронного излучения.
- Чувствительность дозиметров к тепловым нейтронам.
- Характеристики стенда (УКН-01) для проведения калибровки дозиметров и особенности его использования.

- Особенности использования стенда для проверки линейности ТЛД-считывателей в диапазоне доз нейтронов до 10 Зв.

1. Индивидуальные дозиметры нейтронов

В табл. 1 представлены используемые в данной работе индивидуальные дозиметры и ТЛД-считыватели. Дозиметры ДВГН-01 могут использоваться только в составе комплекса АКЖДК-301. Дозиметры ДВН-А-01 могут использоваться в составе с разными ТЛД-считывателями (КДТ-02М, «Дозакус», ДТУ-01 и др.) Дозиметры ДВГН-01 и ДВН-А-01 основаны на одинаковом физическом принципе и имеют сходную конструкцию (наличие полиэтиленового радиатора толщиной ~1 см). Поэтому многие результаты, полученные в данной работе, например с помощью ДВГН-01, также применимы к дозиметрам ДВН-А-01.

Таблица 1. Дозиметры и ТЛД-считыватели, используемые в данной работе

Характеристики дозиметров	Дозиметры		
	ДВГН-01	ДВГ-01	ДВН-А-01
ТЛД, входящие в состав дозиметра	ДТГ-4(6) ^6LiF : Mg, Ti), 2 шт. ДТГ-4(7) ^7LiF : Mg, Ti), 2 шт.	ДТГ-4 (LiF: Mg, Ti), 3 шт.	ДТГ-4(6) ^6LiF : Mg, Ti), 2 шт. ДТГ-4(7) ^7LiF : Mg, Ti), 2 шт. Или ТЛД6011 (^6LiF : Mg, Cu, P), 2 шт. ТЛД7011 (^7LiF : Mg, Cu, P), 2 шт
Тип ТЛД-считывателя	СТЛ-300	СТЛ-300	КДТ-02М (УПФ-02м) ДТУ-01
Фильтр от тепловых нейтронов	Борный фильтр	–	Кадмий (1мм)
Диапазон измерения	0.05 мЗв – 10 Зв	0.05 мЗв – 10 Зв	0.1 мЗв – 0.1 Зв
Регистрируемое излучение	Фотоны и нейтроны	Фотоны	Нейтроны
Производитель	АЭХК	АЭХК	ИФВЭ

2. Методика и результаты измерений

2.1. Фединг дозиметров ДВГН-01 и ДВГ-01 к нейтронам и фотонам

Фединг присущ разным типам ТЛД. В данной работе были выполнены исследования фединга двух дозиметров: дозиметра ДВГН-01 и ДВГ-01.

Процедура определения фединга заключалась в облучении партии детекторов и измерении через определенный интервал времени (время выдержки составляло от 2 часов до 3 месяцев). На **рис. 1** приведены результаты измерения фединга дозиметров ДВГН-01 к нейтронам, полученные в данной работе, и результаты Ангарского электролизного химического комбината (АЭХК) [10]. Фединг для ДВГН-01 и ДВГ-01 к фотонам представлен на **рис. 2**. Кривые – результаты фитирования. Результаты показывают, что фединг к фотонному излучению не превышает 5% за период ~3 месяцев. Для дозиметров ДВГН-01, чувствительных к смешанному фотон–нейтронному излучению, фединг к нейтронам достигает ~22% при выдержке до 3 месяцев.

Одновременно проводилось исследование потери чувствительности ДВГН-01 к нейтронам. Процедура заключалась в следующем: после отжига дозиметры выдерживались разное время (от 2 часов до 3 месяцев), облучались одной и той же дозой нейтронов, и через два часа после облучения проводилось измерение. Результаты представлены также на рис. 1. Потеря чувствительности составляет за 3 месяца ~15%, при этом после отжига ТЛД чувствительность восстанавливается, и калибровка дозиметра изменяется не более чем на 4–5%. Если считать, что в первом случае (фединг к нейтронам) это наложение двух эффектов – потеря информации и потеря чувствительности, а во втором – только эффект потери чувствительности, то можно

утверждать, что эффект потери информации для ДВГН-01 к нейтронам не превышает 15% за 3 месяца.

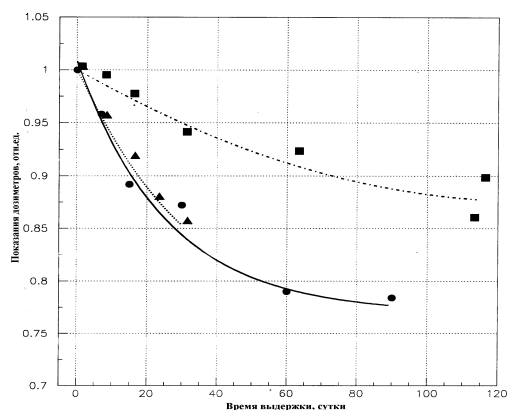


Рис. 1. Фединг дозиметров ДВГН-01 к нейтронам. ○ – настоящая работа, ▲ – данные АЭХК; ■ – эффект потери чувствительности.

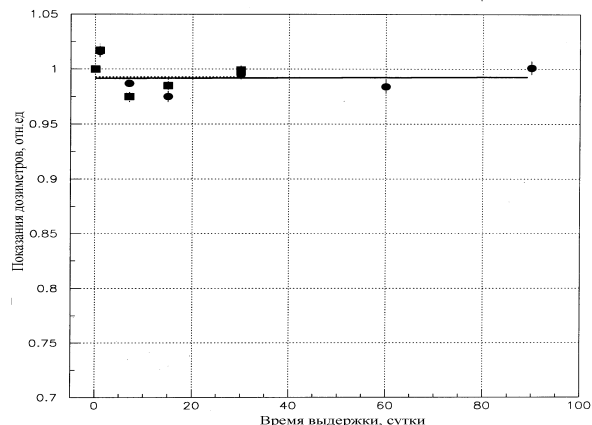


Рис. 2. Фединг дозиметров ДВГН-01, ДВГ-01 к фотонам. ● – ДВГН-01, ▲ – ДВГ-01.

Хотелось бы отметить, что в литературе нигде нет указаний, что при отсутствии как эффектов потери чувствительности, так и потери информации к фотонному излучению у ТЛД могут заметно проявляться эти эффекты при облучении нейтронами.

2.2. Зависимость чувствительности дозиметра от типа фантома

В табл. 2 приведены характеристики фантомов, которые используются при калибровке дозиметров. Характеристики материала (атомарный состав, плотность) фантомов даны в табл. 2а.

Таблица 2 . Характеристики фантомов.

№ п/п	Тип фантома	Размер, мм	М а т е р и а л
1	Фантом ISO	300×300×150	Передняя стенка фантома – пластина толщиной 2,5 см из PMMA. Другие стороны фантома представляют собой пластины из PMMA толщиной 10 мм. Фантом наполнен водой
2	Плоскопараллельный	300×300×150	PMMA
3	Плоскопараллельный	400×300×200	Полиэтилен
4	Эллиптический **	400×200×300	Тканезквивалентная пластмасса (ТЭП) ***
5	Сферический	Ø247	Полиэтилен

* PMMA – полиметилметакрилат плотностью 1,19 г/см³ и массовым составом: 8,05% Н; 59,99% С; 31,96% О.

** Производство НТК «Атом», г. Рига.

*** Разработка МИФИ.

В международных документах [5, 6, 7] рекомендуется использовать фантом ISO. В реальной ситуации обычно используют в качестве фантома то, что удобно или доступно. При этом всегда возникает вопрос о вносимой в этом случае погрешности. Плоскопараллельный фантом из PMMA (оргстекло) (№2) и из полиэтилена (№3) используется в ИФВЭ в качестве замены

стандартного фантома ISO. Тканеэквивалентный эллиптический фантом (№4) используется во ВНИИФТРИ для целей облучения индивидуальных дозиметров нейтронов на первичном Государственном эталоне мощности эквивалентной дозы нейтронов. Сферический фантом (замедлитель дозиметра нейтронов) (№5) часто используют для облучения индивидуальных дозиметров нейтронов в рабочих условиях [8].

Таблица 2а. Материал фантомов.

Материал, Плотность	Элементный состав по весу						
	H	C	O	N	Mg	P	Ca
Мягкая биологическая ткань (МБТ) (МКРЕ) 1 г/см ³	0,101	0,111	0,762	0,026	-	-	-
ТЭП (МИФИ) 1 г/см ³	0,102	0,773	0,04	0,035	0,0043	0,0226	0,022
Вода 1 г/см ³	0,111	-	0,889	-	-	-	-
Оргстекло 1,2 г/см ³	0,0805	0,5999	0,3196	-	-	-	-
Полиэтилен 0,93 г/см ³	0,1437	0,8563	-	-	-	-	-

Для сравнения чувствительности дозиметры облучались в поле излучения Pu-Be источника. Так же были выполнены расчеты по программе MCNP4a и ROZ-6.5 (Расчеты по программе ROZ-6.5 были предоставлены О.Суманеевым.) Расчеты по программе ROZ-6.5 + ABBN93 (299 групп с термализацией) выполнены для плоского полубесконечного фантома толщиной 15 см. Источник – мононаправленный плоский спектр Pu-Be источника нейтронов. Рассчитывался поток нейтронов с энергией ниже 0,4084 эВ на передней поверхности фантома.

Результаты сравнения чувствительности дозиметра ДВГН-01 для этих фантомов приведены в табл. 3. Для фантома из полиэтилена и оргстекла чувствительность альбедных дозиметров выше на 10%, что необходимо учитывать при проведении калибровки с помощью введения поправок. При использовании сферического полиэтиленового фантома необходимо учитывать тот факт, что чувствительность занижается более чем на 30%.

Таблица 3. Чувствительность дозиметра ДВГН-01 в зависимости от используемого фантома.

	Вид фантома	\bar{H}_n , отн. ед.		
		Эксперимент**	Расчет по MCNP4A*	Расчет по ROZ-6.5
1	МБТ (плоский)	-	1,0	1,0
2	Вода (плоский; Фантом ISO)	-	1,068 (2%)	1,055
3	Оргстекло (плоский)	1,13±0,03	1,085 (1.8%)	1,12
4	Полиэтилен (плоский)	1,12±0,03	1,176 (1.5%)	1,08
5	ТЭП (эллиптический, плоский)	1,065±0,02	1,065 (1,7%)	0,99
	Полиэтилен (шаровой)	0,60±0,02	0,645 (2%)	-

* Данные по расчету по MCNP предоставлены П.Ф.Масляевым (ВНИИФТРИ).

** Нормировка экспериментальных данных приведена для фантома, состоящего из ТЭП.

2.3. Эффект влияния взаимного расположения дозиметров на фантоме

Облучения дозиметров в стандартных условиях для целей градуировки проводятся на фантоме. Безусловно, пользователь для ускорения процедуры стремится расположить на фантоме как можно большее количество дозиметров, но при этом он вынужден учесть следующее:

- однородность поля излучения (с увеличением расстояния между фантомом и источником область, где можно облучать дозиметры исходя из условия однородности поля, увеличивается, но увеличивается и необходимое время облучения);
- дозиметры не должны находиться близко к краю фантома (для плоскопараллельного фантома), так как начинает сказываться краевой эффект, который повлияет на чувствительность дозиметров.

Наши расчеты по программе MCNP4a показывают, что чувствительность дозиметра уменьшается с уменьшением расстояния до края фантома. На **рис. 3а** показана расчетная зависимость плотности потока тепловых нейтронов на поверхности плоского полиэтиленового фантома в зависимости от расстояния от его края при облучении нейтронами ^{252}Cf источника. Если дозиметр находится не ближе 7 см от края фантома, то этот эффект не превышает 5%. Это уменьшает область на фантоме, где можно располагать дозиметры.

В дозиметре ДВГН-01 перед ТЛД находится фильтр из полиэтилена ($\sim 0,7 \div 0,8 \text{ г/см}^2$), основное назначение которого – увеличение чувствительности к нейтронам. Но если вплотную к расположенному на фантоме дозиметру находятся другие дозиметры, то их полиэтиленовые фильтры эффективно увеличивают чувствительность дозиметра. На **рис. 3б** представлены результаты расчета и экспериментальные данные по зависимости чувствительности дозиметров от расстояния между ними (данные по расчету по программе MCNP4a предоставлены П.Ф.Масляевым). Если к дозиметру на фантоме вплотную находятся два других дозиметра, то его чувствительность на $\sim 20\%$ выше. Данным эффектом можно пренебречь, если расстояние между дозиметрами больше ~ 4 см.

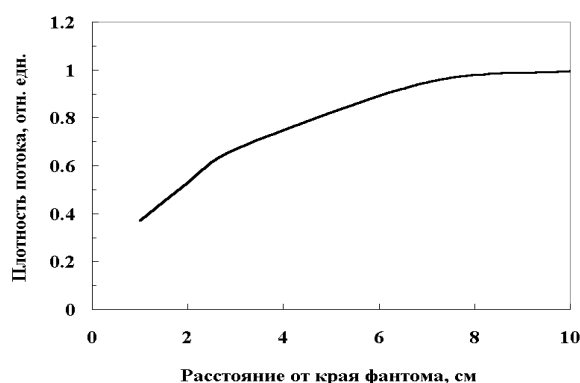


Рис. 3а. Плотность потока тепловых нейтронов в зависимости от расстояния от края фантома.

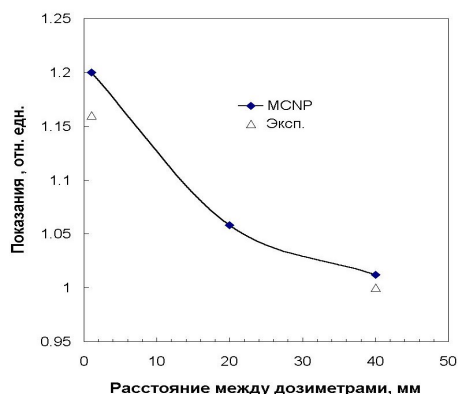


Рис. 3б. Зависимость чувствительности дозиметров от расстояния между ними. Линия – расчет по MCNP; треугольник – эксперимент.

2.4. Чувствительность дозиметров к тепловым нейтронам

В международных и отечественных документах, в которых рассматриваются вопросы калибровки индивидуальных дозиметров нейтронов, рекомендуется под стандартными условиями для калибровки принимать облучение дозиметров на фантоме в поле излучения радионуклидных источников Pu-Be или ^{252}Cf . Вклад тепловых нейтронов в плотность потока всего спектра нейтронов в точке облучения, как правило, невелик, но сильно варьируется в зависимости от окружающего пространства (размера помещения, расстояния от источника до стен, пола, потолка). Поэтому нам представлялось важным определить абсолютную чувствительность дозиметров ДВГН-01 к тепловым нейтронам и их влияние на погрешность при проведении градуировки.

- Чувствительность дозиметров ДВГН-01 без корпусов ε_i^0 определялась следующим образом:

$$\varepsilon_i^0 = \frac{H_1^0}{\varphi_1} - \frac{H_2^0}{\varphi_2}, \quad (1)$$

где H_1^0 [мЗв] – показания дозиметров облученных без корпусов (т.е. облучались только «слайды» или «основания» дозиметров с ТЛД, при этом использовалась градуировка дозиметров, выполненная в стандартных условиях); H_2^0 [мЗв] – показания дозиметров, облученных без корпусов, но в кадмиевой оболочке (для поглощения тепловых нейтронов); φ_1, φ_2 – флюенс тепловых нейтронов в точке облучения.

Дозиметры облучались в поле тепловых нейтронов Государственного специального эталона единиц плотности потока и флюенса нейтронов для ядерно-физических установок (данные были предоставлены В.Д. Севастьяновым, ВНИИФТРИ).

- Чувствительность дозиметров ДВГН-01 ε_i^1 в корпусе и на фантоме (плоский, 300x300x150, РММА) к тепловым нейтронам. Проводилось облучение дозиметров на фантоме в поле излучения радионуклидного источника ^{252}Cf , помещенного в коллиматор установки УКПН-1М. Для создания потока тепловых нейтронов коллиматор был закрыт стандартной насадкой, входящей в состав УКПН-1М. Затем было проведено облучение дозиметров в тех же условиях, но между насадкой и фантомом (вплотную к насадке) устанавливался лист кадмия толщиной 1мм, перекрывающий фантом.

ε_i^1 определялась следующим образом:

$$\varepsilon_i^1 = \frac{H_1^1 - H_2^1}{\varphi_1^1} \quad (2)$$

где H_1^1 [мЗв] – показания дозиметров, облученных в поле УКПН-1М с тепловой насадкой; H_2^1 [мЗв] – показания дозиметров, облученных в поле УКПН-1М с тепловой насадкой и с кадмиевым экраном; φ_1^1 – флюенс тепловых нейтронов в первом случае для УКПН-1М без кадмия.

Измерения мощности амбиентной дозы нейтронов, плотности потока нейтронов с энергией выше 0,4 эВ были выполнены с помощью дозиметра-радиометра ДКС-96Н. Измерения плотности потока тепловых нейтронов – с помощью дозиметров ДВГН-01 без корпусов:

$$\varphi_1^1 = \frac{H_1^{01} - H_2^{01}}{\varepsilon_i^0}, \quad (3)$$

где H_1^{01} и H_2^{01} [мЗв] – показания дозиметров, облученных в поле УКПН-1М с тепловой насадкой, дозиметр без корпуса и с кадмиевой оболочкой соответственно; ε_i^0 – чувствительность к тепловым нейтронам (2).

- Чувствительность дозиметров ДВГН-01 ε_n^1 в корпусе и на фантоме (плоский, оргстекло, 300x300x150) к нейтронам с энергией выше 0,4 эВ в поле УКПН-1М с тепловой насадкой определялась следующим образом:

$$\varepsilon_n^1 = \frac{H_2^{01}}{\varphi_n^1}, \quad (4)$$

где H_2^{01} – то же самое, что (2); φ_n^1 – флюенс нейтронов.

- Чувствительность дозиметров ДВГН-01 ε_n^0 в корпусе и на фантоме (плоский, орг-стекло, 300x300x150) к нейтронам с энергией выше 0,4 эВ в поле УКПН-1М с источником Pu-Be определялась аналогично (4). По результатам измерений (с помощью ДВГН-01 и ДКС-96Н) для этой установки УКПН-1М отношение плотности потока тепловых нейтронов φ_1 к плотности потока нейтронов с энергией выше 0,4 эВ φ_n составило $(0,6 \pm 0,1) \cdot 10^{-2}$. Результаты измерений представлены в табл. 4.

Таблица 4. Чувствительность дозиметров ДВГН-01 к нейтронам.

Чувствительность	Зв * см ⁻²	Погрешность, %
ε_t^0	25* 10-10	12
ε_t^1	10* 10-10	25
ε_n^1	7* 10-10	25
ε_n^0	3,7* 10-10	25

Следует отметить, что экспериментальные данные по чувствительности дозиметров к тепловым нейтронам хорошо согласуются с расчетными данными. На **рис. 4** представлены расчетные данные по энергетической зависимости чувствительности альбедного дозиметра [2, 7, 13] (были взяты расчетные данные для конструкций дозиметров, аналогичных ДВН-А-01). Там же приведена зависимость удельной индивидуальной дозы нейтронов. Нормировка расчетных данных по чувствительности дозиметра приведена для спектра нейтронов Pu-Be источника.

Если принять кадмиевую границу обрезания для тепловых нейтронов равную $\sim 0,4$ эВ, то расчетное значение эффективной чувствительности альбедного дозиметра составляет $\sim 9 \cdot 10^{-10}$ Зв. см⁻², что согласуется с величиной $\varepsilon_t^1 = 10 \cdot 10^{-10}$ Зв. см⁻².

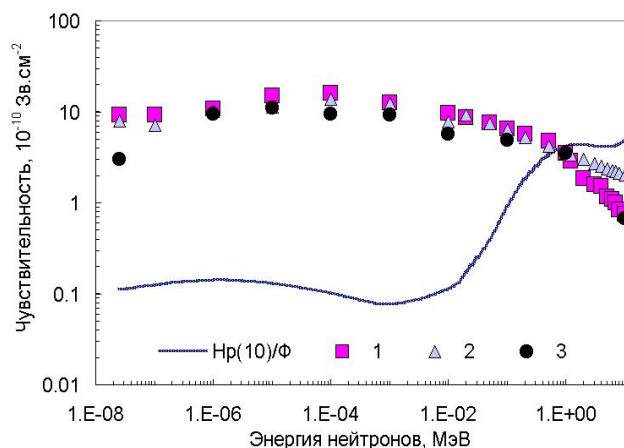


Рис. 4. Энергетическая зависимость чувствительности альбедного дозиметра. Квадрат (1) – [7]; треугольник (2) – [2]; кружок (3) – [13]; (Hr(10)/Ф) – индивидуальный эквивалент дозы нейтронов [7].

При процедуре поверки (в соответствии с поверочной схемой) стандартных установок типа УКПН единица мощности амбиентной дозы нейтронов переносится с помощью образцовых дозиметров. Но на тот факт, что вклад тепловых нейтронов в поле облучения меняется от эталона к эталону, внимания не обращается. Проводя градуировку альбедных дозиметров на разных эталонах, мы можем получить разные результаты, разброс между ними может быть больше погрешности эталонов.

Как видно из табл. 3, вклад тепловых нейтронов в величину плотности потока всего спектра нейтронов не должен превышать 1–2% в точке облучения. В этом случае изменением вклада тепловых нейтронов от эталона к эталону можно пренебречь.

2.5. Угловая зависимость чувствительности на шаровом фантоме

Облучение дозиметров проводилось в двух геометриях:

- Широкий пучок (спектр нейтронов ^{239}Pu -Ве источника). Широкий пучок имитировался с помощью облучения дозиметров при различных комбинациях взаимного расположения источника и фантома.
- Точечный источник (^{239}Pu -Ве источник в установке УКПН-1М).

На рис. 5, 6 представлены угловые зависимости чувствительности ДВГН-01 на шаровом фантоме для двух геометрий облучения и расчетные зависимости чувствительности альбедного дозиметра, выполненные по программе MCNP4a, для нейтронов с энергиями 2, 5, 10 МэВ, падающих под разными углами на сферический фантом [12]. И хотя имитация не позволяет точно воспроизвести широкий мононаправленный пучок, можно отметить, что расчетные и экспериментальные данные указывают на наличие характерного максимума при угле $\sim 30^\circ$. Экспериментальные данные находятся между расчетными данными для 2 и 5 МэВ, что не противоречит данным о средней энергии спектра нейтронов Pu-Ве источника. При облучении в поле широкого мононаправленного пучка чувствительность ДВГН-01, находящегося на шаровом фантоме в диапазоне углов от 0° до 90° , отличается не более чем на 40%, для случая геометрии точечного источника различие составляет $\sim 60\%$.

Чувствительность дозиметра ДВГН-01, находящегося на задней стороне фантома (с противоположной от падения нейтронов), для случая широкого пучка в 1,6 раза выше, чем для случая точечного источника. При этом вклад рассеянного излучения для дозиметров, находящихся сзади, не превышает 30%.

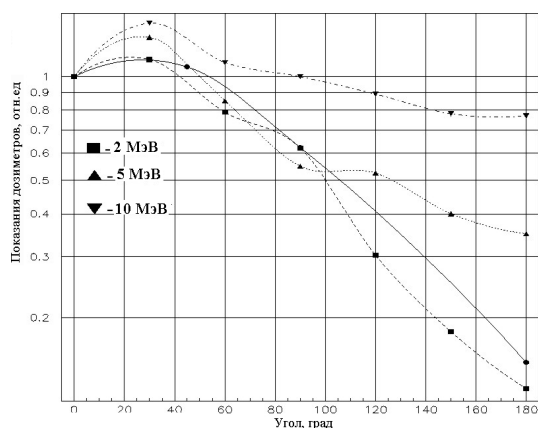


Рис. 5. Угловая зависимость чувствительности ВГН-01 на шаровом фантоме Широкий пучок. Сплошная линия – экспериментальные данные. Линия со значками – расчет по программе MCNP (П.Ф.Масляев).

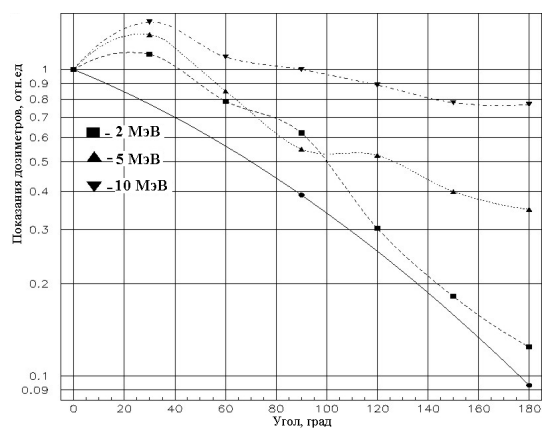


Рис. 6. То же что и на рис. 5. Точечный источник.

При градуировке дозиметр облучается в геометрии точечного источника, его чувствительность в зависимости от расположения на фантоме иллюстрирует рис. 6. В рабочих условиях чаще всего облучение происходит в условиях широкого пучка, при этом считается, что облучение персонала ближе всего к изотропному. При измерении индивидуального эквивалента дозы рекомендуется вводить коэффициент изотропности, так как условия градуировки и облучение персонала различаются. Коэффициент изотропности рекомендуется определять по отношению показаний дозиметров, которые персонал носит на спине и на груди. Другой способ определения – по результатам измерения чувствительности дозиметров, облученных в поле излучения на разных сторонах шарового фантома. Как видно из рис. 5, у дозиметра, облученного на шаровом фантоме, нет ярко выраженной анизотропной зависимости. Следовательно, коэф-

фициент изотропности, полученный на основе показаний альбедных дозиметров, чаще всего будет близок к коэффициенту изотропного поля независимо от реального углового распределения.

2.6. Стенд УКН-01 для градуировки дозиметров

Как было показано выше, существует ограничение на количество одновременно облучаемых на фантоме дозиметров. С другой стороны, например в АКЖДК-301, используется индивидуальная калибровка каждого дозиметра. Для ускорения процедуры калибровки был разработан стенд УКН-01, принципиальная схема которого представлена **рис. 7**. Источник нейтронов Pu-Be находится в контейнере, который закреплен на штоке. Кинематический узел установки позволяет перемещать шток так, чтобы источник находился в положении «хранилище» или в центре замедлителя при облучении дозиметров («рабочее положение»). Основной полиэтиленовый замедлитель (толщина 5 см) формирует поле тепловых нейтронов в облучательном объеме. Толщина замедлителя была выбрана из условий, чтобы создать по возможности максимальный вклад тепловых нейтронов в плотность потока нейтронов в точке облучения детекторов.

Облучательный объем, куда помещаются дозиметры при облучении, расположен между основным и дополнительным замедлителями. Дополнительный замедлитель служит: а) для увеличения плотности потока тепловых нейтронов в точке облучения; б) в качестве биологической защиты; в) для создания однородного поля тепловых нейтронов. В облучательный объем помещается корзина с 30 ячейками под дозиметры или детекторы. Для увеличения чувствительности дозиметры облучаются без корпусов, содержащих кадмий или бор. Это также исключает искажение поля тепловых нейтронов корпусами дозиметров.

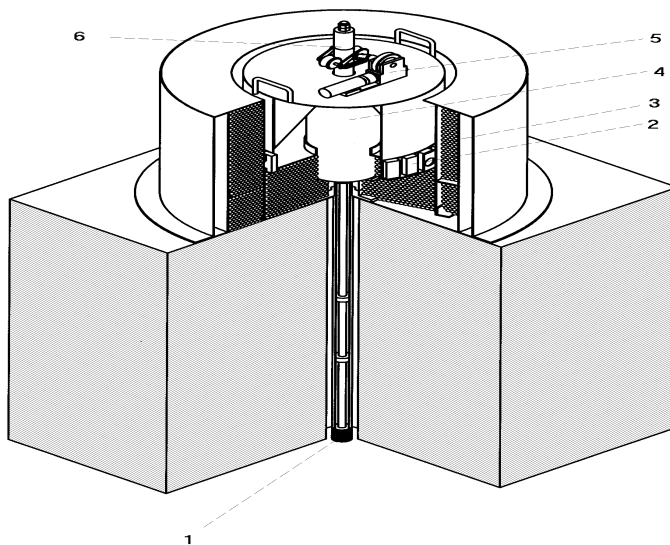


Рис. 7. Принципиальная схема установки УКН-01. 1 – источник нейтронов в положении «хранилище»; 2 – кассетница с ячейками под ТЛД-слайды; 3 – дополнительный замедлитель; 4 – основной замедлитель; 5 – кинематический узел; 6 – шток.

Были выполнены измерения следующих параметров стенда:

1. Однородность поля тепловых нейтронов в облучательном объеме (в том числе и по высоте ячейки).

2. Плотность потока тепловых нейтронов в облучательном объеме в «рабочем» положении источника.
3. Плотность потока тепловых нейтронов в облучательном объеме в положении источника «хранилище».
4. Средняя плотность потока тепловых нейтронов в облучательном объеме за время перемещения источника из «рабочего» положения в положение «хранилище».

Для измерений использовался детектор на основе сцинтилятора ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ размером 10x10 мм и дозиметры ДВГН-01 без корпусов.

Результаты измерений с помощью детекторов тепловых нейтронов показывают, что поле тепловых нейтронов в облучательном объеме однородно (не хуже $\pm 4\%$). Плотность потока тепловых нейтронов также слабо зависит от степени заполнения облучательного объема слайдами ДВГН-01. Различие в плотности потока тепловых нейтронов для случаев, когда облучательный объем заполнен на 100% и когда заполнен на 10 %, не превышает $\pm 5\%$. Вклад «транспортной» дозы (за время перемещения источника из положения «хранилище» в «рабочее» положение) не превышает 5%, если время облучения дозиметров более 1 часа.

Характеристики стенда приведены в табл. 5. Сравнительные характеристики УКН-01 и УКПН приведены в табл. 6.

Таблица 5. Характеристики стенда УКН-01 для калибровки альбедных дозиметров.

П а р а м е т р	
Число одновременно облучаемых дозиметров (число ячеек)	30 шт.
Нейтронный источник	ИБН-10 (Pu-Be)
Плотность потока тепловых нейтронов в облучательном объеме при использовании нейтронного источника с потоком 10^7 н/с. «Рабочее» положение источника	~ 1000 н. см ⁻² .с ⁻¹
Изменение поля тепловых нейтронов в облучательном объеме в зависимости от номера ячейки для дозиметра	Не более 4%
Изменение поля тепловых нейтронов в отдельной ячейке в зависимости от заполнения детекторами других ячеек (от 1 до 30)	Не более 5%
Время перемещения источника из положения «хранилище» в «рабочее» положение и обратно	Не более 150 с
Средняя плотность потока тепловых нейтронов в облучательном объеме (при использовании нейтронного источника с потоком 10^7 н/с.) за время перемещения источника из «рабочего» положения в положение «хранилище» и обратно	Не более ~ 200 н. см ⁻² .с ⁻¹
Плотность потока тепловых нейтронов в облучательном объеме при использовании нейтронного источника с потоком 10^7 н/с. Положение источника «хранилище»	Не более ~ 1 н. см ⁻² .с ⁻¹

Таблица 6. Сравнительные характеристики установок УКН-01, УКПН-01.

	УКН-01	УКПН-М
Темп облучения при использовании источника Pu-Be, с потоком 10^7 н/с	2,2мЗв/ч	0,15мЗв/ч
Количество одновременно облучаемых дозиметров ДВГН-01, шт.	30	2÷3

Как видно из табл. 6, выигрыш в производительности при использовании установки УКН-01 по сравнению со стандартной установкой УКПН-1М составляет ~ 100 – 200 раз при использовании одного и того же источника нейтронов.

Процедура калибровки самой установки УКН-01 в единицах индивидуального эквивалента дозы осуществляется следующим образом. Партия альбедных дозиметров последовательно облучается на стандартной установке (эталоне) УКПН-1М (в стандартных условиях на фантоме). Проводятся измерения с этими дозиметрами. Затем из корпусов извлекаются ТЛД-слайды, и они облучаются в установке УКН-01 за определенный интервал времени. По результатам измерений определяется темп облучения этих дозиметров в установке УКН-01 в единицах мощности индивидуальной дозы нейтронов эталона (УКПН-1М). Такой способ передачи единицы индивидуального эквивалента дозы нейтронов позволяет проводить калибровку альбедных дозиметров с помощью установки УКН-01 с приемлемой погрешностью.

Воспроизводимость калибровки иллюстрирует **рис. 8**, на котором представлены результаты измерения чувствительности двух дозиметров ДВГН-01 при многократном облучении их одной и той же дозой в УКН-01. Как видно, разброс показаний не превышал 5% и не превышает погрешности, связанной с воспроизводимостью показаний дозиметров.

В описанном выше процессе калибровки не участвуют корпуса дозиметров. Следовательно, необходимо контролировать те параметры конструкции корпуса, которые могут влиять на погрешность калибровки дозиметров. Важной характеристикой дозиметра является коэффициент поглощения тепловых нейтронов фильтром, который используется в дозиметре. В отличие от ДВН-А-01, у которого кадмиевый фильтр, в дозиметре ДВГН-01 используется слой компаунда с наполнителем из бора. Оценки показывают, что коэффициент поглощения (отношение плотности потока нейтронов, прошедших фильтр, к плотности потока тепловых нейтронов падающих) не должен превышать 0,1. Тогда, как показывают оценки на основании результатов из табл. 4, в случае, когда тепловые нейтроны составляют ~50% от общей плотности потока нейтронов в спектре, вклад в чувствительность дозиметров от тепловых нейтронов, прошедших фильтр, не будет превышать ~15%. (Необходимо учитывать, что встречаются случаи [2], когда вклад тепловых нейтронов может составлять более ~80%.)

На **рис. 9** приведена экспериментальная зависимость относительной чувствительности дозиметра ДВГН-01 при облучении в УКН-01 от коэффициента ослабления потока тепловых нейтронов фильтром. Под относительной чувствительностью дозиметра здесь понимается отношение чувствительности при облучении ТЛД-слайда в корпусе, с задней стороны которого дополнительно помещен кадмиевый экран, к чувствительности, когда облучается ТЛД-слайд без корпуса.

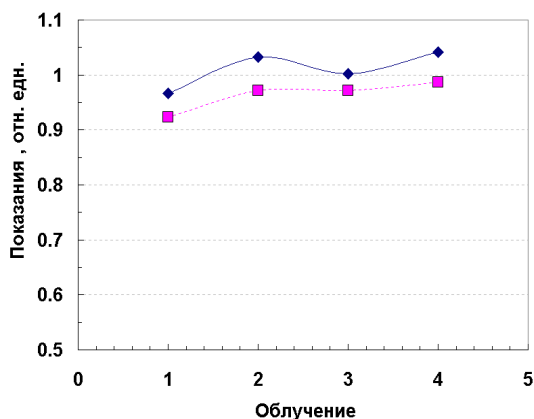


Рис. 8. Воспроизводимость калибровки ДВГН-01 на УКН-01.

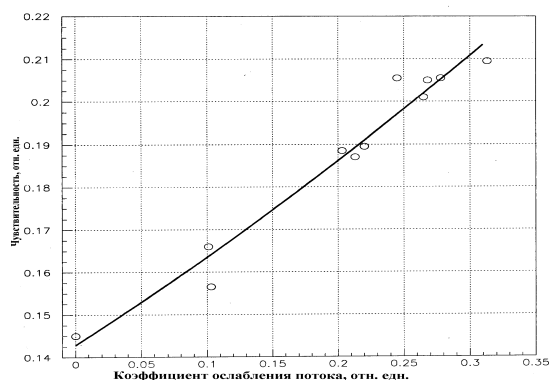


Рис. 9. Относительная зависимость чувствительности ДВГН-01 от коэффициента ослабления борного фильтра.

Значения коэффициента ослабления для разных экспериментальных корпусов ДВГН-01, используемых в этих измерениях, были получены на основании результатов специальных исследований [14]. Значение коэффициента ослабления, равного ~ 0 , было принято для случая, когда весь дозиметр был покрыт кадмиевым экраном толщиной 0,5 мм. Как видно, данные относительные измерения позволяют контролировать и этот важный параметр дозиметра ДВГН-01 с помощью УКН-01.

2.7. Проверка линейности АКЖДК-301 в диапазоне доз до 10 Зв

АКЖДК-301 позволяет проводить измерения индивидуального эквивалента дозы нейтронов до 10 Зв. Но технически осуществить проверку линейности АКЖДК-301 в этом диапазоне сложно из-за большого времени набора дозы.

Обычно мощность дозы нейтронов при проведении облучения дозиметров не превышает $0,5 \div 1$ мЗв. Возникает необходимость иметь стенд для калибровки с темпом облучения $\sim 0,1 \div 0,3$ Зв/час. Вопрос был решен с помощью трех Pu-Be источников с потоком $\sim 5 \cdot 10^7$ н/с каждый, расположенных под слоем ~ 60 мм полиэтилена. На **рис. 10** представлена схема расположения источников и ТЛД-слайдов (облучались ТЛД-слайды без корпусов).

Темп облучения ТЛД слайдов ДВГН-01 составил $\sim 0,33$ Зв/час. Результаты измерений показали, что неоднородность поля тепловых нейтронов в облучательном объеме не превышает $\pm 10\%$. Но, используя экспериментально полученные поправки на неоднородность поля, уменьшили погрешность определения дозы (в относительных единицах для определения линейности АКЖДК-301 в диапазоне от 0,05 мЗв до 10 Зв) до $\pm 5\%$. Это позволяет экспериментально определять необходимые поправки, которые учитываются в АКЖДК301 программным способом, в диапазоне от 0,05 мЗв до 10 Зв.

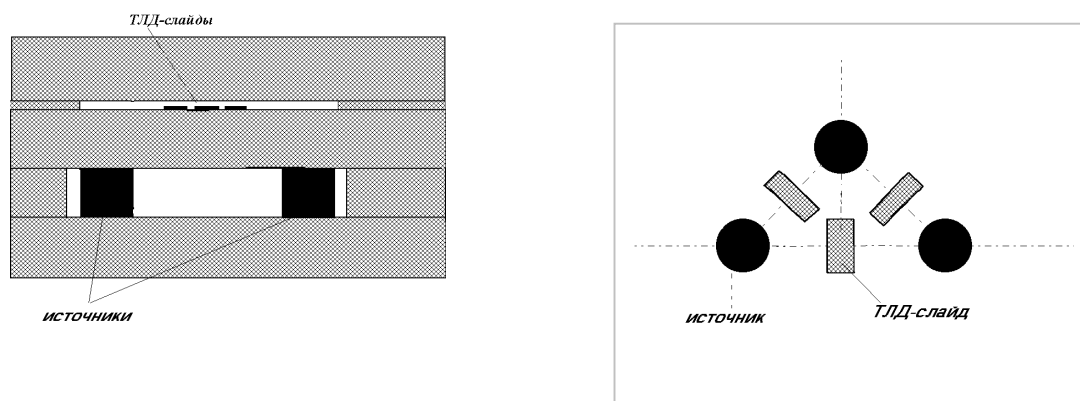


Рис. 10. Схема расположения источников нейтронов и ТЛД-слайдов при облучении.

3. Обсуждение результатов

Полученные в настоящей работе результаты позволяют дать ряд рекомендаций, которые необходимо учесть, с нашей точки зрения, при использовании в практике ИДК альбедных дозиметров. В табл. 7 приведены основные требования по выполнению измерений индивидуального эквивалента дозы нейтронов с помощью альбедных дозиметров, которые есть в существующих стандартах и рекомендациях. Там же приведены рекомендуемые нами дополнения.

Таблица 7. Основные требования (в существующих стандартах и рекомендации по результатам данной работы) при проведении измерений с индивидуальными дозиметрами нейтронов альбедного типа.

Т р е б о в а н и я	Существующие рекомендации (стандартизованные)	Рекомендации данной работы (дополнение к существующим рекомендациям)
Требования при проведении измерений индивидуальной дозы нейтронов		
1. Введение поправки для учета чувствительности дозиметра в реальном поле (спектр) нейтронов	Предлагается несколько способов определения поправки. Один из них основан на расчете поправки по измеренному спектру нейтронов и расчетной функции чувствительности дозиметра	Предлагается использовать экспериментально определенное значение чувствительности дозиметра к тепловым нейтронам вместо расчетного. Это позволяет уменьшить погрешность определения поправки для спектров нейтронов с большим вкладом тепловых нейтронов
2. Введение поправки на фединг	Рекомендуется вводить поправку на фединг. Обычно приводят фединг дозиметров к фотонному излучению. Нет указаний, что фединг к нейтронам отличается от фединга к фотонам	Необходимо учитывать, что фединг к нейтронам может отличаться от фединга к фотонам. Для каждого вида излучения поправка вводится отдельно
3. Введение поправки на характер облучения (угловое распределение)	Вводится коэффициент изотропности, учитывающий степень изотропности облучения человека в поле излучения. Рекомендуется (для фотонного излучения) данный коэффициент определять по отношению показаний дозиметров, расположенных на груди и спине человека	Показано, что использование альбедных дозиметров не позволяет корректно измерить коэффициент изотропности поля нейтронов. Рекомендуется для этих целей использовать дозиметры быстрых нейтронов
Требования при калибровке дозиметров		
4. Условия облучения при калибровке (применение коллиматора, размеры помещения).	Обычно не регламентируются. Обычно рекомендуется вводить поправки на рассеянное излучение в помещении.	Минимизировать вклад рассеянного излучения таким образом, чтобы вклад тепловых нейтронов не превышал 2% в плотность потока нейтронов в точке облучения.
5. Тип используемого фантома	Рекомендуется использовать фантом ISO	Допускается использование других типов фантомов.
6. Размещение дозиметров на фантоме	Не регламентируется	Рекомендуется располагать дозиметры на фантоме таким образом, чтобы исключить влияние их друг на друга и влияние краевого эффекта фантома
7. Использование специальных стендов (установок) для ускорения процедуры калибровки	Для нейтронных дозиметров не регламентируется. (Но, например, для дозиметров фотонов рекомендуется использовать стенды на основе облучения с источниками бетта-излучения)	Рекомендуется использовать два типа стендов для ускорения процедуры калибровки *

* **Примечание.** Дополнительный аргумент в пользу использования стенда УКН-01 экономический, так как в этом случае нет необходимости в установке УКПН и в использовании нейтронных источников с большим потоком нейтронов (стоимость источников нейтронов пропорциональна потоку нейтронов).

Следует отметить, что использование разных типов фантомов (кроме сферического) при калибровке дозиметров не приводит к значительной дополнительной погрешности. Расположение дозиметров на фантоме должно быть таким, чтобы не сказывался краевой эффект (не менее 7 см от края фантома) и эффект влияния других дозиметров (не менее $5\div 7$ см от других дозиметров). Для ускорения процедуры калибровки дозиметров и проверки на линейность ТЛД-считывателей (особенно в области доз до 10 Зв и выше) желательно проводить облучение дозиметров в поле тепловых нейтронов без корпусов и без фильтров тепловых нейтронов в поле излучения специальных стендов для калибровки. Для уменьшения дополнительной погрешности измерений за счет присутствия тепловых нейтронов в спектре желательно использовать стандартные поверочные установки (типа УКПН), в которых источник нейтронов располагается в коллиматоре из материала, поглощающего тепловые нейтроны.

Заключение

В соответствии с методическим указанием [15] при проведении индивидуального дозиметрического контроля нейтронного излучения допустимая неопределенность измерения индивидуального эквивалента дозы может составлять до 100%. Казалось бы, принимать во внимание, какой формы используется фантом, как располагать дозиметры на фантоме и т.д., неважно, если вносимая погрешность не превышает $\pm 20\%$. Но эти факторы могут сработать в одну сторону, занизив результат измерения на 50...60%. Есть и другой аргумент в пользу того, что надо стремиться уменьшить погрешность при проведении калибровки, важный фактор – субъективное доверие пользователя к результатам измерений. Его трудно поддерживать, если калибровка дозиметров по фотонам воспроизводится с погрешностью не хуже 5%, а калибровка по нейтронам меняется более чем на $15\div 30\%$.

Учитывая, что в последнее время особое внимание уделяется качеству (в том числе достоверности) радиационного контроля (в особенности индивидуального дозиметрического контроля), было бы полезным включить рекомендации данной работы в стандартные методики для ИДК.

Авторы приносят благодарность В.Н.Лебедеву за помощь и поддержку при выполнении данной работы, П.Ф.Масляеву и О.Суманееву за проведение расчетов, Г.И.Бритвичу, Ю.В.Мокрову, О.И.Батухтиной за критику и ценные замечания, В.Н.Кустарёву за помощь при разработке стенда УКН-01, В.А.Пикалову и Ю.В.Быстрову за помощь в проведении испытаний УКН-01.

Список литературы

1. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99). Минздрав России. Москва, 1999.
2. Алексеев А.Г., Лебедев В.Н. – Препринт ИФВЭ 2003-8, Протвино, 2003.
3. Piesch E., Burgkhart B. – In: National and International Standardization of Radiation Dosimetry. Vol.2 IAEA, Vienna 1978, p.207.
4. INTERNATIONAL STANDARDS ORGANISATION, Reference Photon Radiations for Calibrating Dosimeters and Dose Ratemeters and for Determination of their Response as a Function of Photon Energy and Angle of Incidence. ISO/DIS 4037-3, 1996.
5. INTERNATIONAL STANDARDS ORGANISATION, Reference Neutron Radiation-Part-2: Calibration Fundamental Related to the Basic Quantities Characterizing the Radiation Field. International Standard, ISO 859-2 (Geneva ISO), 2000.
6. Battlet D.T. and Alberts W.G. Radiat. Prot. Dosim. 54, 259-266, 1994.

7. Determination of Operational Dose Equivalent Quantities For Neutrons. ICRU Report 66. Journal of the ICRU Vol.1 No 3, 2001.
8. Алексеев А.Г., Бараненков Н.Н., Быстров Ю.В. и др. Препринт ИФВЭ 2000-35, Протвино, 2000. АНРИ вып. 1(24) 2001, с. 30-37.
9. О.И. Батухтина, В.Д. Богдан-Курило и др. Автоматизированный комплекс индивидуального дозиметрического контроля при гамма-нейтронном облучении. АНРИ №1 2002, с. 26-31.
10. Ангарский электролизный химический комбинат. Письмо № 0/59-4094 от 28.08.2003.
11. Алексеев А.Г. и др. Препринт ИФВЭ 99-76, Протвино, 1999.
12. «Типовая методика выполнения измерений индивидуального эквивалента дозы Нp(10) нейтронного излучения с помощью индивидуального дозиметра основанного на альбедном принципе при проведении индивидуального дозиметрического контроля (ИДК) персонала АЭС.» Концерн «Росэнергоатом», Москва, 2003.
13. П.Ф.Масляев. В сб.: «Контроль физических факторов производственной среды, опасных для человека». ИПК, изд.-во Стандартов, 2002.
14. Rick J.Tanner. Intercomparison on the Usage of Computational Codes in Radiation Dsimetry. Workshop in Bologna, Italy, June 2003.
15. А.В.Санников и др. Исследование неоднородности характеристик индивидуального дозиметра ДВГН-01 по ослаблению флюенса тепловых нейтронов борным фильтром. Отчет 268 ИФВЭ, ОРИ, Протвино, 2002.
16. МУ 2.6.1.25-2000. Дозиметрический контроль внешнего профессионального облучения. Общие требования. 2000.

Рукопись поступила 9 марта 2004 г.

А.Г. Алексеев, Н.В. Кирякова и др.
Метрологические вопросы использования индивидуальных дозиметров
нейтронов ДВН-А-01 и ДВГН-01.

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

Подписано к печати 12.03.2003. Формат 60x84/16. Офсетная печать.
Печ.л. 1,85. Уч.-изд.л. 1,5. Тираж 130. Заказ 225. Индекс 3649.
ЛР №020498 06.04.97.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий,
142284, Протвино Московской обл.

