

Сравнительные испытания индивидуальных электронных прямопоказывающих нейтронных дозиметров

В работе приводятся данные по результатам сравнительных испытаний основных типов индивидуальных электронных прямопоказывающих нейтронных дозиметров, эксплуатирующихся на территории Российской Федерации.

А.Г.Алексеев (ФГУП «ГНЦ ИФВЭ», г.Протвино, Московской обл.), П.Ф.Масляев (ФГУП «ВНИИФТРИ», п.Менделеево, Московской обл.)

Несмотря на то, что в Государственный реестр средств измерений (Госреестр СИ) внесено и допущено к применению в сфере государственного метрологического контроля и надзора несколько типов индивидуальных нейтронных дозиметров, основанных на различных методах измерений (термолюминесцентный, пузырьковый, регистрация осколков деления делящихся материалов, регистрация продуктов взаимодействия нейтронов с ядрами различных мишеней кремниевыми полупроводниковыми детекторами), каждый из которых имеет определенные недостатки, проблему индивидуальной дозиметрии нейтронов в радиационном контроле нельзя считать полностью решенной.

Наиболее перспективными нейтронными индивидуальными дозиметрами в настоящее время являются прямопоказывающие электронные дозиметры с детекторами из кремния, с размещенными на них специальными радиаторами. Как

правило, такие дозиметры одновременно измеряют индивидуальный эквивалент дозы гамма- и нейтронного излучения.

Измерение индивидуального эквивалента дозы гамма-излучения осуществляется независимо как в аналогичных дозиметрах гамма-излучения.

Регистрация нейтронов в этих дозиметрах осуществляется по двум каналам: канал регистрации альбедных нейтронов (нейтронов, замедленных телом человека и выходящих на поверхность в месте расположения дозиметра на теле), и канал регистрации быстрых нейтронов (падающих на тело извне). В альбедном канале регистрация нейтронов осуществляется за счет попадания в детектор продуктов реакции ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{He}$ из радиатора (мишени), расположенного на поверхности кремниевого детектора. Для регистрации быстрых нейтронов на детектор помещается радиатор (мишень) из полиэтилена, и при этом регистрируются ядра отдачи (в основном протоны отдачи),

возникающие при упругом рассеянии быстрых нейтронов. Значение индивидуального эквивалента дозы получают путем обработки по соответствующему алгоритму информации, поступающей на встроенный микропроцессор с «альбедного» и «быстрого» канала.

Основными преимуществами данного метода индивидуальной дозиметрии нейтронов перед другими методами являются:

- возможность одновременного отдельного измерения индивидуального эквивалента дозы гамма-излучения и нейтронного излучения в широком диапазоне доз и соотношений доз отдельных компонент;
- возможность визуального контроля значений индивидуальных эквивалентов доз;
- звуковая и световая сигнализация при превышении установленных значений индивидуальных эквивалентов доз и их мощностей;
- сохранение во встроенной памяти истории накопления индивидуального эквива-

лента дозы с последующей передачей информации на ПЭВМ;

- возможность использования дозиметров в автоматизированных системах ИДК;

- доступ к параметрам дозиметра через ПЭВМ;

- возможность получения существенно лучшей по сравнению с другими методами энергетической зависимости чувствительности дозиметров при измерениях в широком диапазоне доз.

Ранее в ГНЦ ИФВЭ [1] были проведены исследования энергетической зависимости чувствительности (отклика) индивидуального нейтронного дозиметра PDM-303, изготовленного фирмой «АЛОКА», Японии, который не внесен в Госреестр СИ РФ.

Почти одновременно в 2006–2007 гг. в Госреестр СИ внесены два типа индивидуальных электронных прямопоказывающих гамма-нейтронных дозиметра: ДВС-01С, изготавливаемый ООО «Радкон» (Россия), и DMC 2000 GN, изготавливаемый фирмой MGP Instruments (Франция) и поставляемый ЗАО «Приборы».

В ФГУП «ВНИИФТРИ» и ФГУП «ГНЦ ИФВЭ» были проведены сравнительные испытания этих дозиметров.

Сравнительные испытания проведены по следующим направлениям:

- основные характеристики;
- функциональные возможности;

- влияние мощности дозы гамма-излучения на вклад гамма-излучения в дозу нейтронов;

- зависимость чувствительности дозиметра от энергии нейтронного излучения;

- удобство в эксплуатации.

Основные характеристики.

Основные характеристики дозиметров ДВС-01С и DMC 2000 GN приведены в таблице 1.

Функциональные возможности. На дисплей дозиметра DMC 2000 GN последовательно может быть выведена информация о значениях МИЭД и ИЭД гамма-излучения, МИЭД и ИЭД нейтронного излучения, о значениях установленных порогов по каждой измеряемой величине. Если значение какой-либо из измеряемых величин превышает установленный для неё порог, то появляется звуковой и визуальный сигнал тревоги. Переключение режимов работы и установка порогов может осуществляться как вручную с помощью одной управляющей кнопки, расположенной на корпусе дозиметра, так и с помощью ПЭВМ, связь с которой устанавливается дистанционно посредством специального устройства связи типа LDM 220. Получение информации об истории накопления дозы, о значениях градуировочных коэффициентов и изменение их значений может быть осуществлено с помощью ПЭВМ.

На дисплей дозиметра ДВС-01С последовательно может быть выведена информация о суммарном значении ИЭД гамма- и нейтронного излучения, и ИЭД нейтронного излучения, о значениях установленных порогов по суммарному значению ИЭД, значениям МИЭД гамма- и нейтронного излучения. Если значение какой-либо из этих величин превышает установленный для неё порог, то появляется звуковой и визуальный сигнал тревоги. Получение информации о истории накопления дозы,

установка порогов, изменение градуировочных коэффициентов осуществляется с помощью ПЭВМ, связь с которой обеспечивается с помощью специального считывающего устройства, которое одновременно может использоваться как зарядное устройство.

Влияние мощности дозы гамма-излучения на вклад гамма-излучения в дозу нейтронов.

В зависимости от конструктивных особенностей дозиметра и алгоритма обработки измерительной информации возможно появление показаний в нейтронном канале при использовании дозиметра в интенсивном поле гамма-излучения. Наиболее вероятная причина этого эффекта – наложение импульсов от гамма-излучения, за счет чего появляются импульсы, которые воспринимаются как импульсы от нейтронов.

Данный эффект наблюдается в дозиметре DMC 2000 GN. При этом погрешность измерения ИЭД нейтронного излучения за счет влияния сопутствующего гамма-излучения составляет при значениях МИЭД гамма-излучения в диапазоне:

от 20 мкЗв/ч до 50 мЗв/ч – не более 1 %;

от 50 мЗв/ч до 100 мЗв/ч – не более 10 %.

При значениях мощности дозы гамма-излучения, превышающих 0,1 Зв/ч, погрешность становится недопустимо большой. Например, при значениях мощности дозы гамма-излучения порядка 1 Зв/ч в отсутствии нейтронного излучения значения ИЭД (показания дозиметра) в «гамма-канале» и «нейтронном канале» становятся примерно одинаковыми.

В дозиметре ДВС-01С при

Таблица 1. Основные характеристики дозиметров.

Характеристика	DMC 2000 GN	ДВС-01С
Диапазон измерения индивидуального эквивалента дозы (ИЭД) гамма-излучения, мкЗв	1 – 1·10 ⁷	1 – 1,5·10 ⁷
Диапазон измерения мощности индивидуального эквивалента дозы (МИЭД) гамма-излучения, мкЗв/ч	10 – 1·10 ⁵	1 – 10 ^{7*}
Диапазон измерения ИЭД нейтронного излучения, мкЗв	20 – 1·10 ⁷	20 – 1,5·10 ⁷
Диапазон измерения МИЭД нейтронного излучения, мкЗв/ч	20 – 1·10 ⁷	1 – 2·10 ^{6**}
Диапазон регистрируемых энергий нейтронного излучения, МэВ	0,025·10 ⁻⁶ – 15***	0,025·10 ⁻⁶ – 20
Пределы допускаемой основной относительной погрешности измерения МИЭД гамма-излучения, %	$\pm(20+50/H'_g)$ где H'_g – измеренное значение МИЭД гамма-излучения в мкЗв/ч	
Пределы допускаемой основной относительной погрешности измерения ИЭД нейтронного излучения, %	$\pm(20+2000/H_n)$ где H_n – измеренное значение ИЭД нейтронного излучения в мкЗв	
Пределы допускаемой основной относительной погрешности измерения МИЭД нейтронного излучения, %	$\pm(20+5000/H'_n)$ где H'_n – измеренное значение МИЭД нейтронного излучения в мкЗв/ч	
Пределы допускаемой основной относительной погрешности измерения ИЭД, %****		$\pm 15+(20+1900 \cdot H_{pn}/H_p)/H_p$, где H_p – измеренное значение ИЭД в мкЗв; H_{pn} – измеренное значение ИЭД нейтронного излучения в мкЗв
Время непрерывной работы, не менее, час	6000 (с батареей питания типа CR 2450 Toshiba с напряжением 3 В)	90 (без заряда встроенной аккумуляторной батареи с напряжением 3,6 В)
Габаритные размеры, не более, мм	86,5x48x32 (с клипсой)	97x48x32 (с клипсой)
Масса, не более, г	80	100

*, ** – непосредственно МИЭД гамма-излучения и МИЭД нейтронного излучения не отображаются на дисплее (мощность суммарного ИЭД вычисляется и участвует в работе прибора как пороговая величина при подаче сигнала тревоги), здесь указаны рабочие диапазоны МИЭД, в которых значение погрешности измерения ИЭД не превышает указанных пределов;

*** – при измерении МИЭД и ИЭД нейтронного излучения с энергией 14,5 МэВ показания дозиметра DMC 2000 GN превышают условно истинное значение в 4 раза;

**** – на дисплей дозиметра можно вывести значение ИЭД смешанного гамма-нейтронного излучения и отдельно ИЭД нейтронного излучения, при этом погрешность измерения ИЭД смешанного гамма-нейтронного излучения рассчитывается по общей формуле, приведенной в 3-ем столбце.

мощностях дозы до 10 Зв/ч этим эффектом можно пренебречь.

Зависимость чувствительности дозиметров от энергии нейтронного излучения. Энергетическая зависимость чувствительности дозиметров ДВС-01С и DMC 2000 GN имеет сложный вид со значительным провалом в области энергий от 0,1 МэВ до 0,6–0,8 МэВ. Однако для широких спектров нейтронов, в случае если градуировка дозиметров проводится в поле нейтронов с широким спектром, погрешность результатов измерений для наиболее часто встречающихся на практике

спектров нейтронов укладывается в разумные пределы. В соответствии с руководством по эксплуатации для дозиметров ДВС-01С и DMC 2000 GN установлены пределы изменения чувствительности для типовых спектров нейтронов от минус 50 до +80 %.

В ФГУП «ВНИИФТРИ» и ФГУП «ИФВЭ» на источниках нейтронов (установках), создающих поля нейтронов с различными спектрами, были проведены измерения индивидуального эквивалента дозы дозиметрами ДВС-01С и DMC 2000 GN. Измерения проводились в одинаковых для дозиметров условиях.

Предварительно дозиметры были проградуированы в условиях, регламентируемых методикой поверки, т.е. в поле ²³⁸PuBe источника нейтронов, размещенного в контейнере-коллиматоре установки УКПН-1М.

При градуировке и измерениях дозиметры размещались на поверхности фантома размером 300x300x150 мм из тканеэквивалентной пластмассы по центру вплотную к фантому. Расстояние от центра источника до эффективного центра дозиметра составляло 1 м. Сторона каждого дозиметра, обращенная к источнику излучения, выбиралась в соответствии с требованиями руководства по

эксплуатации на каждый дозиметр. При этом для дозиметра DMC 2000 GN минимальное расстояние от поверхности

фантома составляло примерно 10 мм из-за размещенной на дозиметре клипсы.

Результаты измерений в по-

лях нейтронов с различными спектрами приведены в таблице 2.

Обозначение источника (спектра) в таблице 1: PuBe и Cf означает, что поле нейтронов получают с использованием PuBe и Cf-252, соответственно.

В скобках приведены условия, в которых применяются эти источники для создания полей нейтронов с определенными спектрами. При этом использованы следующие обозначения:

– (кон) – означает, что облучение проведено в поле рассеянного нейтронного излучения в помещении размером 6х9х3,5 м с бетонными стенами толщиной 40 см, когда первичное излучение, выходящее из источника в направлении дозиметра, поглощается полиэтиленовым усеченным конусом длиной 50 см;

– (ог) – означает, что облучения проведены в открытой геометрии при размещении источника в центре помещения на высоте 1,5 м от пола;

– (кол) – означает, что источник размещался в контейнере коллиматора установки УКПН-1М;

– (Fe) – означает, что между источником, размещенном в установке УКПН-1М, и дозиметром размещался усеченный конус из железа длиной 19 см;

– (D₂O) – означает, что источник размещался в сфере диаметром 30 см, заполненной тяжелой водой;

– (тн) – означает, что источник размещен в установке УКПН-1М, используемой в варианте для получения поля тепловых нейтронов.

– Л – поле излучения на выходе из лабиринта. Лабиринт находится в толстой боковой

Таблица 2. Результаты тестирования дозиметров в полях нейтронов.

Условное обозначение источников нейтронов (спектры нейтронов)	Средняя энергия по спектру, МэВ*	Отклонение показаний дозиметра от условно истинного значения индивидуального эквивалента дозы, %	
		ДВС-01С	DMC 2000 GN
PuBe (кон)	1,05	+7 %	-13 %
PuBe (ог)	3,33	-1,5 %	+10 %
PuBe (Fe)	1,76	+13 %	-20 %
PuBe (D ₂ O)	1,33	+70 %	+40 %
PuBe (тн)	2,23	+45 %	-10 %
Cf (кон)	0,60	-1,8 %	-37 %
Cf (кол)	1,89	-10 %	-35 %
Cf (ог)	1,75	-34 %	-50 %
Cf (Fe)	1,11	+6 %	-19 %
Cf (D ₂ O)	0,42	+50 %	+40 %
Cf (тн)	0,90	+23 %	-7 %
T(d,n) ⁴ He	14,5	-16 %	+400 %
Ускоритель протонов У-70			
А	~49	-11 %	+710 %
Д	~20	+220 %	+340 %
Л	0,6	+49 %	+20 %

* – средние значения энергий для спектров нейтронов определялись для нейтронов с энергией более 0,4 эВ.

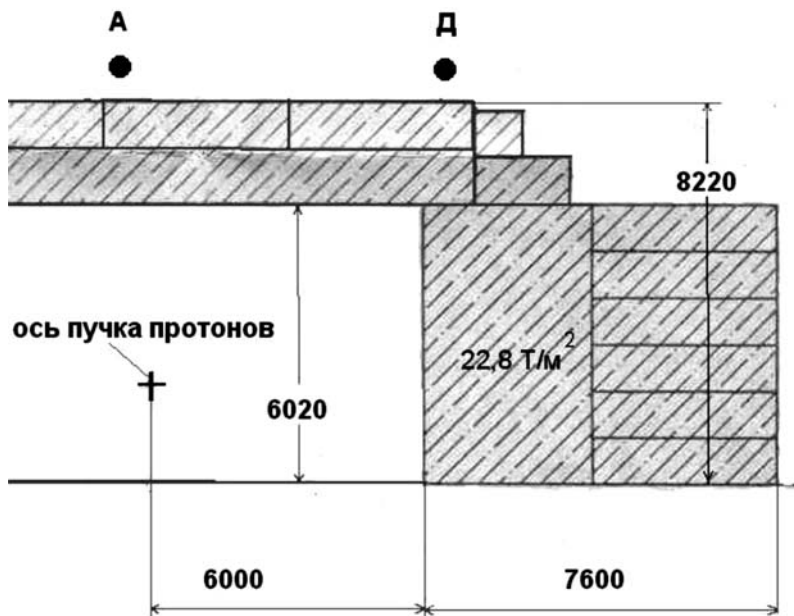


Рис. 1. Схема расположения точек облучения дозиметров на верхней бетонной защите ускорителя. Толщина верхней защиты – 2 м. Точка А – над осью пучка протонов, точка Д – в стороне от оси пучка (в 7,5 м от точки А).



Рис.2. Расположение дозиметров на фантоме во время облучения на ускорителе. Одновременно облучались ДВС-01С, DMC 2000 GN, ДВГН-01, PDM 303.

бетонной защите ускорителя протонов У-70 (энергия протонов 70 ГэВ). Вклад тепловых нейтронов в спектре составляет 30 %;

– А – поле излучения на верхней бетонной защите протонного ускорителя У-70, непосредственно над трассой пучка протонов. Схема приведена на рис.1. Пример расположения дозиметров на фантоме приведен на рис.2;

– Д – поле излучения на верхней бетонной защите протонного ускорителя У-70, в стороне (7,5 м от точки А) от трассы пучка протонов. Схема приведена на рис.1.

Для измерения условно истинных значений индивидуального эквивалента нейтронов использовались различные средства измерений.

Для спектров нейтронов, получаемых с использованием радионуклидных нейтронных источников PuBe и Cf-252, условно истинные значения индивидуального эквивалента дозы получены с использованием средств измерений из состава государственного первичного эталона ГЭТ 117-78.

Определение условно истинного значения индивидуального эквивалента дозы для

нейтронов с энергией 14,5 МэВ проведено путем умножения значения измеренного значения флюенса нейтронов на значение удельного индивидуального эквивалента дозы для этой энергии нейтронов [2]. Флюенс нейтронов определялся на основе счета числа альфа-частиц в определенном телесном угле, возникающих в реакции $T(d, n) \text{ } ^4\text{He}$, с использованием средств измерений государственного специального эталона ГЭТ 51-80.

Для спектров ускорителя (точки А, Д и Л) использовались результаты показаний дозиметра ДКС-96Н (в единицах амбиентной дозы нейтронов) за время облучения дозиметров. Для нейтронов выше 10 МэВ ДКС-96Н занижает величину амбиентной дозы. Расчет поправок для ДКС-96Н был сделан на основе расчетных данных по энергетической зависимости чувствительности ДКС-96Н и спектров нейтронов. Данные по спектрам были взяты из работ [1,3,4]. Величина поправки составила: для спектра в точке А – 1,75; Д – 1,16; Л – 1,0. Для оценки дополнительной погрешности измерения ДКС-96Н в импульсном поле излучения ускорителя одновременно с ДКС-96Н использовался дозиметр ДВН-Д-01. ДВН-Д-01 представляет собой сферический полиэтиленовый замедлитель диаметром 24,7 см (у ДКС-96Н диаметр замедлителя – 24 см), в центре которого помещаются ТЛД (пары ^6LiF и ^7LiF). Дозиметр ДВН-Д-01 так же, как и ДКС-96Н градуировался в единицах амбиентной дозы нейтронов. Измерения показали, что дополнительная погрешность измерения у ДКС-96Н за счет импульсности излучения

ускорителя не превышала 15 % для условий проведения измерений.

Удобство в эксплуатации.

Вопрос удобства в эксплуатации достаточно субъективен, поэтому следует отметить, что представлено мнение ограниченного круга экспертов, принимавших участие в измерениях.

DMC 2000 GN. Эксперты единодушно отмечают, что кнопка управления у дозиметра слишком жесткая. Ее чрезвычайно сложно переключать. По мнению экспертов, у данного дозиметра имеется излишнее количество параметров, которые доступны при ручном управлении. Никому из экспертов в процессе работы с этим дозиметром не удалось осуществить переключение всех доступных параметров. Попытки осуществить это привели к выводу из строя кнопки управления и соответственно к невозможности дальнейшей эксплуатации дозиметра и необходимости его ремонта. Доступ ко всем параметрам легко осуществляется через ПВЭМ, что требует наличия устройства связи, стоимость которого превышает стоимость дозиметра. Очевидно, что при большом количестве дозиметров, находящихся в эксплуатации в одной организации, эта проблема, по-видимому, не будет актуальной. По сложившейся практике индивидуальный дозиметр крепится на нагрудном кармане спецодежды. Клипса у дозиметра расположена так, что при закреплении дозиметра на спецодежде он оказывается снаружи кармана. Это приводит, с одной стороны, к тому, что расстояние дозиметра относительно тела в процессе работы

меняется, что приводит к дополнительной погрешности из-за градиента альбедных нейтронов; с другой стороны, увеличивается вероятность утери дозиметра или его механического повреждения.

ДВС-01С. По мнению экспертов, дозиметр имеет, хотя и ограниченный, но достаточно оптимальный набор параметров, доступных при ручном управлении. С другой стороны, наличие двух очень легко переключаемых кнопок позволяет исключить несанкционированное включение-выключение дозиметра. Положение клипсы у дозиметра такое, что дозиметр при ношении его на спецодежде оказывается в кармане.

В практике использования индивидуальных дозиметров несомненным достоинством является возможность подсветки дисплея. В дозиметре ДВС-01С возможность подсветки дисплея есть, а в дозиметре DMC 2000 GN она отсутствует.

Оба дозиметра имеют прочный пластмассовый брызгозащищенный корпус.

Комментарии и выводы.

1. Дополнительная погрешность дозиметров DMC 2000 GN и ДВС-01С за счет энергетической зависимости чувствительности при измерениях индивидуального эквивалента дозы нейтронного излучения для широкого набора спектров нейтронов, возникающих на основе спектра деления и спектров радионуклидных источников нейтронов, укладывается в диапазон от минус 50 % до плюс 80 %, что соответствует значениям, приведенным в руководстве по эксплуатации. Это обстоятельство делает возможным использование обоих дозиметров при работе с радионуклидными источниками и в околореакторной зоне без предварительного определения спектров нейтронного излучения.

2. Дополнительная погрешность за счет энергетической зависимости чувствительности для спектров нейтронов, имеющих место на ускорителях и нейтронных генераторах, для дозиметра DMC 2000 GN становится недопустимо большой. Дозиметр ДВС-01С продемонстрировал приемлемую погрешность измерения в поле излу-

чения нейтронного генератора, но при использовании его в условиях ускорителя, где в спектре излучения присутствуют нейтроны с энергиями, превышающими 20 МэВ, погрешность измерения ДВС-01С также превысила заявленные пределы.

3. При измерениях дозиметром DMC 2000 GN в полях гамма-излучения и в смешанных полях следует контролировать значение мощности дозы гамма-излучения, т.к. при значениях мощности дозы гамма-излучения, превышающей 0,1 Зв/ч, возможно значительное увеличение значений показаний в нейтронном канале.

4. Учитывая, что оценка радиационной безопасности осуществляется по суммарному значению индивидуального эквивалента дозы гамма- и нейтронного излучения, существенным недостатком дозиметра DMC 2000 GN является то, что в дозиметре не производится суммирование отдельных компонент в смешанном гамма-нейтронном излучении и, соответственно, не устанавливается значение порога для суммарного значения индивидуального эквивалента дозы и ее мощности.

Литература

1. А.Г.Алексеев, Н.Н.Бараненков, Ю.В.Быстров. Исследование чувствительности индивидуального нейтронного дозиметра PDP-303 к высокоэнергетическому нейтронному излучению. В трудах XIV совещания по ускорителям заряженных частиц, том.2. стр.169-171, ИФВЭ, Протвино 1998.
2. Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation. ICRP Publication 74, 1995.
3. A.G.Alexeev, S.A.Kharlampiev. Dosimetric Characteristics of The IHEP Neutron Reference Fields. Rad. Prot. Dos. Vol.70, Nos. 1-4, pp.341-344, 1997.
4. Е.А.Белогорлов, Г.И.Бритвич, Г.И.Крупный и др. Препринт ИФВЭ 85-148, Серпухов, 1985.