



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 98-68

ОРИ

А.Г.Алексеев<sup>1</sup>, Ю.В.Быстров, В.Т.Головачик, С.А.Харлампович<sup>2</sup>

**ДОЗИМЕТР СМЕШАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
НА ОСНОВЕ ИОНИЗАЦИОННЫХ КАМЕР  
ДЛЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ НА УСКОРИТЕЛЕ**

---

<sup>1</sup> E-mail: alexeev@m10.ihep.su,

<sup>2</sup> Настоящий адрес: концерн РОСЭНЕРГООАТОМ, Москва

Протвино 1998

**Аннотация**

Алексеев А.Г. и др. Дозиметр смешанного излучения на основе ионизационных камер для метрологического обеспечения радиационного контроля на ускорителе. : Препринт ИФВЭ 98–68. – Протвино, 1998. – 10 с., 6 рис., 1 табл., библиогр.: 19.

Рассматривается место дозиметра смешанного излучения на основе ионизационных камер высокого давления в метрологической схеме передачи единицы эквивалентной дозы нейтронов, разработанной для радиационного контроля ИФВЭ. Представлено описание метода, характеристики детекторов, погрешность и ограничение метода. Обсуждаются результаты использования дозиметра для градуировки рутинных радиационных мониторов в единицах эквивалентной дозы смешанного излучения.

**Abstract**

Alexeev A.G. et al. Dosimeter Based on Ionization Chambers for Metrology of Radiation Safety at Accelerator: IHEP Preprint 98–68. – Protvino, 1998. – p. 10, figs. 6, tables 1, refs.: 19.

The use of the dosimeter on based of a high pressure ionization chambers for a metrology of neutron radition dosimetry at IHEP is presented. The description of the method, detectors parameters, unsertantly of method, a usefuiness limit are considered. The results of the dosimeter use for calibration of a rutin radiation monitors in the dose equivalent units of mixed radiation are disscused.

## Введение

Измерение радиационных величин для целей радиационной безопасности требует системы передачи размера единицы от эталонов до рабочих, рутинных средств измерения. Для этих целей в метрологических центрах существуют эталоны для соответствующих величин и типов излучений, а также соответствующие поверочные схемы. Уникальность радиационных измерений для радиационной безопасности на ускорителях (в частности, на ускорительном комплексе ИФВЭ) — отсутствие эталонов и поверочных схем в Госстандарте для типов излучений, которые дают значительный вклад в облучаемость персонала на ускорителе, например: нейтроны с энергией выше 20 МэВ, протоны, мюоны и др.

Для того, чтобы заполнить отсутствующими элементами существующую и поддерживаемую Госстандартом метрологическую схему, в ИФВЭ были разработаны дозиметры и опорные поля излучения, выполняющие в ИФВЭ функции эталонов. В данном случае под эталонами понимаются опорные поля нейтронного и смешанного излучений. Дозиметры (спектрометр Боннера, дозиметр на основе тканеэквивалентного пропорционального счетчика (ТЭПС) и дозиметр на основе ионизационных камер высокого давления) выполняют функцию образцовых, т.е. передают размер единицы от Государственного эталона мощности эквивалентной дозы нейтронов опорным полям ИФВЭ.

В данной работе рассматривается метод дозиметрии на основе ионизационных камер высокого давления (аналоговый компонентный бэрметр (АКБ)), характеристики детекторов и место метода в метрологическом обеспечении радиационного контроля ИФВЭ.

### **Аналоговый компонентный бэрметр с коррекцией эквивалентной дозы нейтронов**

Аналоговый компонентный бэрметр является одним из распространенных и удобных дозиметрических средств для измерения эквивалентной дозы смешанного излучения на ускорителях [1]. Метод позволяет проводить измерения эквивалентной дозы отдельных компонентов смешанного излучения. Это достигается посредством использования детекторов, показания которых принимаются пропорциональными

дозе излучения того или иного вида и энергетического диапазона. В отличие от разработанного ранее варианта [2], в настоящее время в АКБ используются следующие детекторы, внешний вид которых представлен на рис.1:

- Ионизационная камера (ИК), наполненная газом  $^3\text{He}$  до давления 11 атмосфер, объемом 0,1 л, в шаровом полиэтиленовом замедлителе диаметром 25,4 см. Ход энергетической зависимости чувствительности  $\text{He}$  ИК приблизительно повторяет ход зависимости от энергии операционной величины эквивалентной дозы для нейтронов ниже 20 МэВ, что дает основание считать ее показания пропорциональными эквивалентной дозе нейтронов в этом диапазоне энергии.
- Безводородная ИК, наполненная газом  $\text{Ar}$  до давления 11 ата, объемом 1 л.  $\text{Ar}$  ИК имеет высокую чувствительность к фотонам и заряженным частицам и, ввиду отсутствия водорода в составе стенки и газового наполнения, значительно более низкую к нейтронам. Это позволяет считать ее показания пропорциональными в основном поглощенной дозе фотонов и заряженных частиц, или эквивалентной дозе фотонов.
- Тканеэквивалентная (ТЭ) ионизационная камера объемом 1л, стенка (тканеэквивалентная пластмасса П4ЭС-мбт, 5 мм) и газовое наполнение которой (метан, 11 ата) близки по атомному составу мягкой биологической ткани, что позволяет считать ее показания пропорциональными поглощенной дозе излучения любого вида в тканеэквивалентном фантоме на глубине, равной толщине стенки. Использование ТЭ ИК связано с простотой включения ее в измерения (единая регистрирующая система с  $\text{Ar}$  и  $^3\text{He}$  ИК). Следует также отметить, что чувствительности всех ИК подобраны для работы в едином диапазоне мощностей до 0,05-500 предельно допустимых уровней (ПДУ) или  $1,5 \mu\text{Зв/ч} — 15 \text{ мЗв/ч}$ .

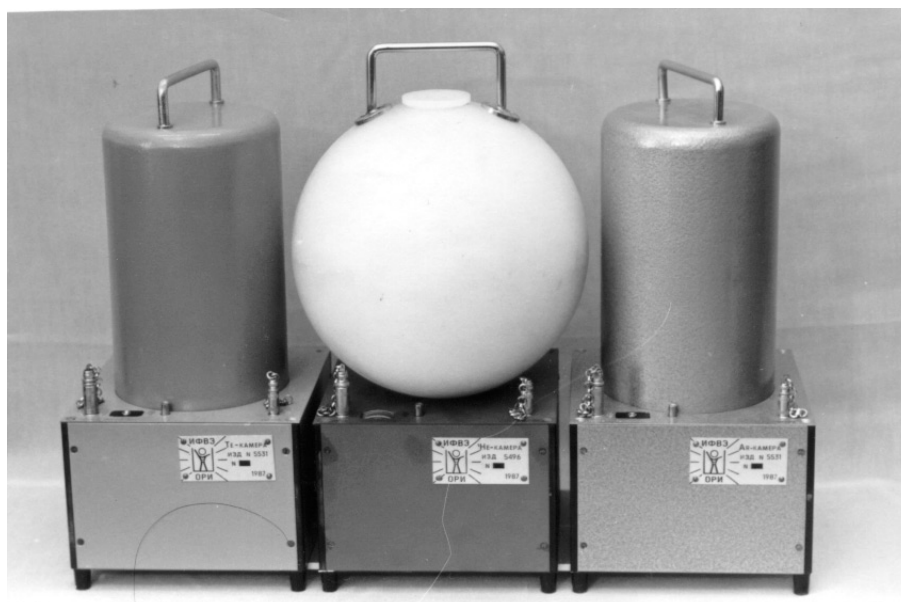


Рис. 1. Внешний вид ионизационных камер высокого давления.

Компонентный метод измерения дозы основан на учете чувствительности детекторов к неосновному виду излучения. На основе показаний Ar и He ИК в полях излучения со сложным спектрально-компонентным составом определяются компоненты эквивалентной дозы:

$$q^{Ar} = H_{\gamma}R_{\gamma}^{Ar} + H_nR_nH^{Ar}, \quad (1)$$

$$q^{He} = H_{\gamma}R_{\gamma}^{He} + H_nR_nH^{He}, \quad (2)$$

где  $q^i$  — отклик  $i$ -го детектора;  $R_{\gamma}H^i$  и  $R_n^i$  — чувствительность  $i$ -го детектора к эквивалентной дозе фотонов источника  $^{137}Cs$  и к эквивалентной дозе нейтронов источника  $^{239}Pu - Be$  соответственно;  $H_{\gamma}$  и  $H_n$  — эквивалентная доза фотонов и нейтронов соответственно.

Известно, что отклонение хода с энергетической зависимостью чувствительности или функции чувствительности (здесь и далее ФЧ) к нейтронам  $1/\sqrt{E}$ -детектора в замедлителе диаметром 25,4 см от хода энергетической зависимости удельной эквивалентной дозы обычно достигает нескольких раз. Следовательно, уменьшения погрешности измерения эквивалентной дозы следует добиваться в первую очередь путем уменьшения погрешности измерения ее нейтронного компонента, связанного с ФЧ. В основу предлагаемого метода коррекции эквивалентной дозы нейтронов положен тот факт, что ФЧ описанной выше тканеэквивалентной камеры имеет принципиально иной ход с энергией, чем ФЧ гелиевой ИК в замедлителе.

На рис.2 представлены ФЧ гелиевой и ТЭ камер, там же приведена энергетическая зависимость эквивалентной дозы нейтронов. Расчет ФЧ гелиевой камеры выполнен по программе РОЗ-11 [3],[4] в диапазоне энергий нейтронов от тепловой до 14 МэВ; в области энергий более 50 МэВ использованы данные для удельной поглощенной дозы нейтронов на глубине 10,5 см в плоскопараллельном тканеэквивалентном фантоме толщиной 30 см при нормальном двухстороннем падении [5]. ФЧ тканеэквивалентной ИК к нейтронам рассчитывались на основе данных [6] по керме в материале стенки и газа с учетом данных [7] по вкладу вторичных фотонов из реакции радиационного захвата в диапазоне малых энергий нейтронов.

Из рис.2 следует, что в диапазоне энергий 0,5 кэВ — 500 МэВ ФЧ тканеэквивалентной камеры возрастает быстрее, чем ФЧ гелиевой. Поэтому взятое в качестве параметра отношение вкладов нейтронов в отклики He и ТЭ ИК однозначно связано с энергией нейтронов в указанном диапазоне энергий (рис.3), который кстати охватывает значимую в смысле вклада в эквивалентную дозу часть большинства известных полей нейтронного излучения за защитой ускорителей высоких энергий [8], а также некоторых полей на основе радионуклидных источников [9]. Это отношение с точностью до постоянного коэффициента совпадает с величиной

$$Q'_n = H'_n/D_n, \quad (3)$$

где  $H'_n$  — результат измерения эквивалентной дозы нейтронов, полученный из системы (1);  $D_n$  — поглощенная доза нейтронов, полученная из решения системы уравнений:

$$q^{Ar} = D_{\gamma}R_{\gamma}^{Ar} + D_nR_nH^{Ar}, \quad (4)$$

$$q^{T\vartheta} = D_\gamma R_\gamma^{T\vartheta} + D_n R_h H^{T\vartheta}, \quad (5)$$

где  $D_\gamma$  — поглощенная доза фотонов и заряженных частиц;  $R_{\gamma i}$  и  $R_H^i$  — чувствительность  $i$ -го детектора к поглощенной дозе фотонов источника  $^{137}\text{Cs}$  и нейтронного источника  $^{239}\text{Pu} - \text{Be}$  соответственно.

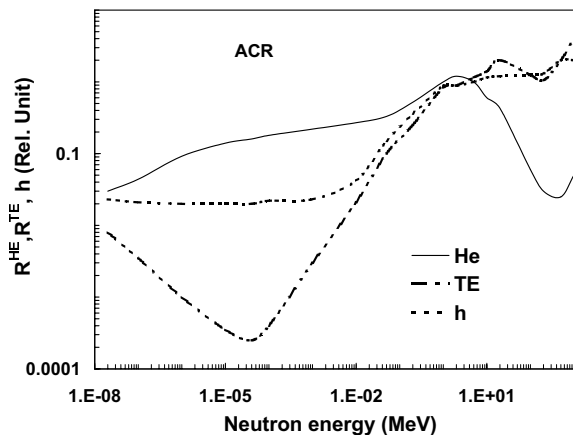


Рис. 2. Энергетическая зависимость чувствительности гелиевой  $R^{HE}$ , тканезэквивалентной  $R^{TE}$  камер и эквивалентной дозы нейтронов  $h$ . Нормировка выполнена для спектра нейтронов  $\text{Pu} - \text{Be}$  источника.

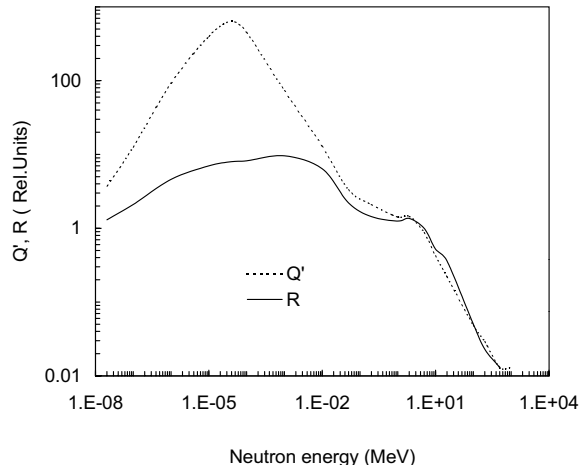


Рис. 3. Отношение чувствительности гелиевой камеры к эквивалентной дозе нейтронов  $R$  и отношению чувствительностей гелиевой и тканезэквивалентной камер для моноэнергетических нейтронов  $Q'$ .

Коррекция эквивалентной дозы нейтронов осуществляется следующим образом:

$$H_n = k(Q'_n)H'_n,$$

где  $k(Q'_n)$  — поправочный коэффициент, зависящий от параметра жесткости спектра нейтронов  $Q'_n$ .

На рис.4 представлена зависимости  $k(Q'_n)$  для моноэнергетических нейтронов для спектров нейтронов, полученная расчетным путем и на основе экспериментальных данных. Все данные нормированы на чувствительность детекторов в нейтронном поле градуировочного источника  $\text{Pu}-\alpha\text{-Be}$ . Экспериментальные точки были получены следующим образом:  $Q'_{nj}$  получено согласно (2),  $k_j$  — как соотношение  $H_{nj}^o/H'_{nj}$ , где  $H'_{nj}$  — эквивалентная доза в  $j$ -м поле, измеренная дозиметром, взятым в качестве образцового (спектрометр Боннера [9], [10], [12] и ЛПЭ-спектрометра [13]). Экспериментальные данные были получены в ходе совместных измерений с образцовыми дозиметрами в полях излучения опорных полей нейтронов ИФВЭ [14], в опорных нейтронных полях ОИЯИ [15], за верхней и боковой защитой протонного ускорителя ИФВЭ [16].

На рис.4 наблюдается хорошее (в пределах 15%) согласие результатов расчета по спектрам нейтронов с моноэнергетической зависимостью. Экспериментальные

данные в пределах экспериментальной ошибки совпадают с моноэнергетической зависимостью, за исключением спектров со средней энергией нейтронов менее 0,6 МэВ ( $Q'_n > 20$ ), где, по-видимому, сказывается погрешность в определении спектра и хода ФЧ в области  $E_n < 0,5$  кэВ. Дополнительный источник погрешности при определении поправочного коэффициента связан с разделением вкладов нейтронов в отклик ТЭ и  $^3\text{He}$  ИК при решении системы (4),(5).

На рис. 5 представлена зависимость погрешности измерения эквивалентной дозы и поглощенной дозы нейтронов, поглощенной дозы фотонов и заряженных частиц в зависимости от соотношения  $H'_n/D_\gamma$ . При соотношении  $D_n/D_\gamma < 0,3$  погрешность измерения поглощенной дозы нейтронов возрастает выше 50 %, что является границей применимости метода коррекции

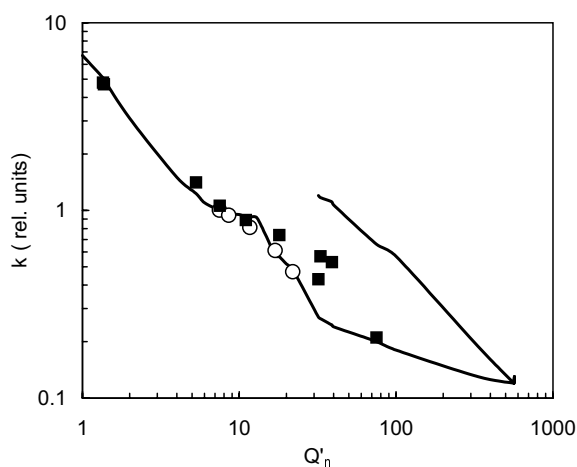


Рис. 4. Зависимость поправочного коэффициента от параметра  $Q'$ . Сплошная линия — зависимость для моноэнергетических нейтронов, кружок — расчет по спектру нейтронов, квадрат — экспериментальные данные.

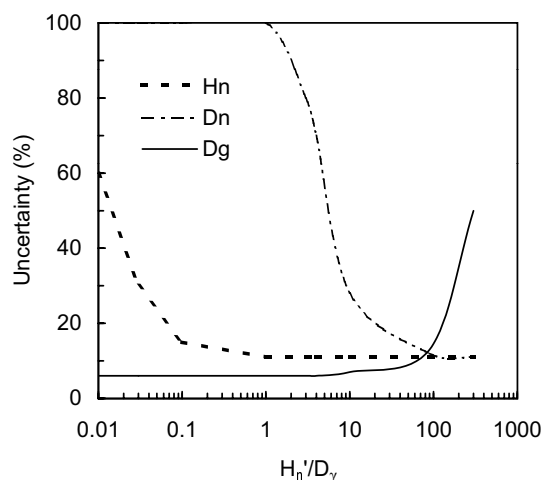


Рис. 5. Зависимость погрешности измерения эквивалентной дозы нейтронов ( $Hn$ ), поглощенной дозы нейтронов ( $Dn$ ), поглощенной дозы фотонов и заряженных частиц ( $Dg$ ).

Результаты измерений АКБ в различных полях радионуклидных источников и за защитой ускорителей показывают, что описанный метод коррекции применим в 65% случаев в полях за защитой ускорителя и в ~80% случаев в полях на основе радионуклидных источников.

## Метрологическая схема измерения эквивалентной дозы нейтронов в ИФВЭ

Место АКБ в системе метрологической поддержки измерений в радиационном контроле, представленной на рис.6. Единицы мощности эквивалентной дозы и

плотности потока нейтронов передаются от Государственных эталонов, находящихся во ВНИИФТРИ и ВНИИМ соответственно, с помощью образцового дозиметра ЛПЭ-спектрометра, образцового всеволнового счетчика (ОВС), образцовых радионуклидных источников и спектрометра нейтронов. Единицы передаются группе опорных полей нейтронов, состоящей из стандартизованной установки УКПН, опорных полей на основе радионуклидных источников помещенных в замедлитель или в лабиринт, а также в высокоэнергетическое опорное поле, находящееся на верхней защите ускорителя [17]. При следовании стандартной поверочной схеме калибровка рутинных (рабочих) дозиметров проводится только на УКПН.

### Метрологическая схема измерения эквивалентной дозы нейтронов в ИФВЭ

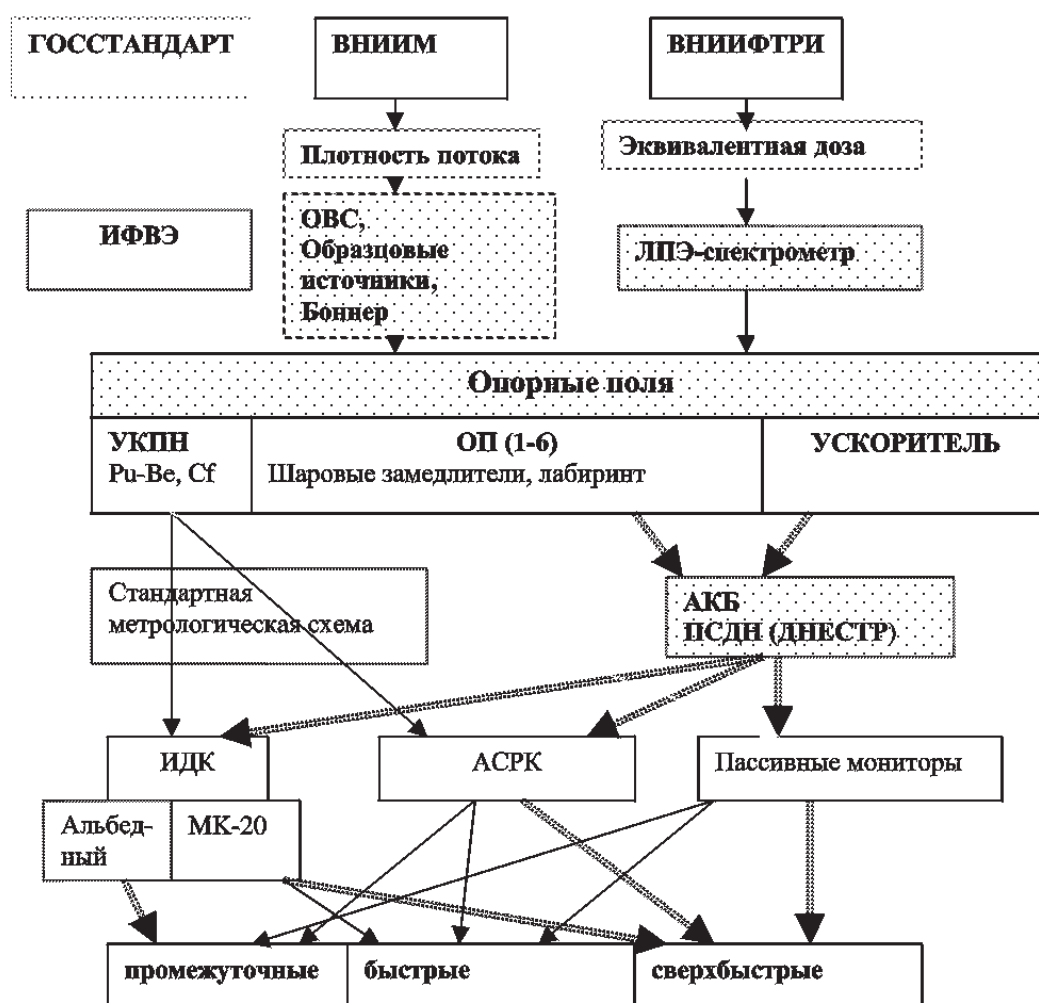


Рис. 6. Метрологическая схема измерения эквивалентной дозы нейтронов в ИФВЭ.



Рабочие дозиметры, используемые в радиационном контроле ИФВЭ состоят из трех групп: индивидуальные дозиметры, дозиметры (радиационные мониторы), системы автоматизированного непрерывного радиационного контроля АСРК и пассивные радиационные мониторы. Анализ на основе функций чувствительности дозиметров все трех групп показывает, что калибровка на УКПН дает приемлемую погрешность (менее 40%) измерения эквивалентной дозы рабочими средствами только в случае их использования в полях, где основной вклад дают быстрые нейтроны. В реальных полях на ускорителе погрешность будет более 100% (погрешность измерения эквивалентной дозы нейтронов) или до 900% (погрешность измерения эквивалентной дозы смешанного излучения) для радиационных мониторов [19] и более 1000% для дозиметров индивидуального дозиметрического контроля (ИДК). Это связано с тем, что за защитой ускорителя встречаются поля с преобладанием а) промежуточных нейтронов, б) сверхбыстрых нейтронов, в) мюонов. Для получения приемлемой погрешности используются калибровка индивидуальных дозиметров в опорных полях с помощью пассивного дозиметра-спектрометра (ПДСН–“ДНЕСТР”) [18] и калибровка радиационных мониторов по полной эквивалентной дозе непосредственно в точке мониторинга, с использованием образцового дозиметра. В данном случае в качестве такого образцового дозиметра в метрологической схеме ИФВЭ используется АКБ.

### **Калибровка рутинных радиационных мониторов по эквивалентной дозе смешанного излучения**

Основной тип детектора в АСРК ИФВЭ — радиационный монитор (РМ) на основе  $\beta$ -счетчика с родиевым радиатором в сферическом полиэтиленовом замедлителе диаметром 25,4 см. РМ мониторирует только нейтронное излучение. Энергетическая зависимость чувствительности РМ практически повторяет ФЧ  $^3\text{He}$ -камеры. Начиная с 1987 года, на протяжении ряда сеансов ускорителя проводилась калибровка РМ по полной эквивалентной дозе в точках мониторинга с помощью АКБ.

В таблице приведено отношение поправочного коэффициента, полученного как отношение измеренной полной эквивалентной дозы смешанного излучения по методу АКБ и показаниям РМ за один и тот же интервал времени и при одних и тех же радиационных условиях, при условии, что оба дозиметра градуировались в одном и том же опорном поле. Точки измерения условно разбиты на три группы: на верхней защите, за боковой защитой и в зонах каналов заряженных частиц. Так как в различных сеансах измерения выполнялись при разных режимах работы каналов и внутренних мишеней, в таблице приведены оценка и диапазон изменения отношения измеренной с помощью РМ и АКБ полной эквивалентной дозы для случаев, когда такие измерения проводились многократно в течение ряда сеансов.

За верхней защитой РМ занижает величину эквивалентной дозы в 1,5-2,0 раза, вследствие вклада сверхбыстрых нейтронов с энергией выше 20 МэВ, к которым РМ имеет пониженную чувствительность. За боковой защитой РМ завышает вели-

чину эквивалентной дозы в 1,5-2,0 раза вследствие повышенной чувствительности к промежуточным нейтронам. В районе каналов заряженных частиц основной вклад в полную эквивалентную дозу дают мюоны, к которым РМ не чувствителен. Занижение в измерении с помощью РМ эквивалентной дозы в этом случае достигает от 2 до 9 раз. Необходимо отметить, что несмотря на то, что в этом случае вклад мюонов в поглощенную дозу превышает 80%, и метод коррекции нейтронной дозы не применим (вклад нейтронов менее 20%), погрешность измерения полной эквивалентной дозы смешанного излучения с помощью АКБ не превышает 15-20%. Поправочный коэффициент сильно изменяется в зависимости от режима работы канала, так как если мюонная компонента зависит от интенсивности пучка в канале, то нейтронная компонента — от режима работы внутренних мишеней ускорителя. Таким образом, если в случае боковой и верхней защиты использование калибровки по полной эквивалентной дозе позволяет достичь приемлемой точности в измерении радиационных условий, то для зон каналов заряженных частиц она позволяет получить верхнюю оценку величины.

Таблица 1. Отношение полной эквивалентной дозы по методу АКБ к показаниям РМ в точке мониторингования  $H_{total}/H_{PM}$ .

Характеристика точки	Номер РМ	Оценка отн. едн.	Диапазон изменения отн. едн.
Верхняя защита	43	2.0	1,6-2.4
	24	1.5	1.2-1.6
	10	1.5	1.5
	20	1.6	-
	53	2.0	-
Боковая защита	19	0.84	-
	13	0.5	0.4-0.6
	2	0.61	-
	6	0.55	-
Каналы заряженных частиц	2	39	3.5-9.0
	14	28	1.5-2.5
	14	7	2.0-6.0
	22	80	-
	18	36	-
	6	35	1.3

## Заключение

В работе предложен метод коррекции эквивалентной дозы нейтронов, измеренной компонентным дозиметром АКБ в полях сложного спектрально-компонентного состава, который позволяет свести к минимуму в диапазоне энергий нейтронов 0,5 кэВ–1 ГэВ погрешность измерения эквивалентной дозы, связанной с неидеальной

функцией чувствительности детектора нейтронов. Метод основан на использовании дополнительного детектора — тканеэквивалентной ионизационной камеры — при двухкомпонентном способе интерпретации показаний ионизационных камер: фотонов, мюонов и нейтронов. Метод показал свою работоспособность при измерениях в полях за защитой ускорителей и в некоторых полях радионуклидных источников. Отклонение от опорных значений дозы, измеренных образцовыми дозиметрами, не превышает 15% по сравнению со 100% в отсутствие коррекции. Вопрос о применимости метода коррекции в неизвестном поле решается, исходя из соотношения показаний детекторов непосредственно в процессе измерения.

Использование метода АКБ в метрологическом обеспечении радиационного контроля для калибровки рутинных дозиметров по полной эквивалентной дозе позволяет решить проблему с измерением радиационных условий на ускорителях с приемлемой погрешностью.

Авторы выражают благодарность В.Н.Лебедеву и В.Н.Кустареву за поддержку работы, А.В.Санникову за полезные замечания.

### Список литературы

- [1] Комочков М.М., Лебедев В.Н. Практическое руководство по радиационной безопасности на ускорителях высоких энергий. — М.: Энергоатомиздат, 1986.
- [2] Головачик В.Т. и др. — Препринт ИФВЭ 7-114, Серпухов, 1977.
- [3] Базазянц Н.О. и др. — Аромако-2F. Система обеспечения нейтронными константами расчетов переноса нейтронов в реакторах и защите. — Инструкция ИПМ АН СССР. — М.: 1976.
- [4] Гермогенова Т.А. др. — В сб.: Численное решение уравнения переноса в одномерных задачах. / Под ред. Гермогеновой Т.А. — ИПМ АН СССР, 1981, с.11-136; 222-224.
- [5] Белогорлов Е.А. и др. — Препринт ИФВЭ 80-117, Серпухов, 1980.
- [6] Caswell R. et.al. // Rad. Res. V.83, p.217-254, 1980.
- [7] Абагян А.А. и др. Групповые константы для расчета реакторов и защиты. Справочник. — М.: Энергоиздат, 1981.
- [8] Белогорлов Е.А. и др. — Препринт ИФВЭ 85-148, Серпухов, 1985.
- [9] Бритвич Г.И. и др. — Препринт ИФВЭ 90-48, Протвино, 1990.
- [10] Белогорлов Е.А. и др. — Препринт ИФВЭ 85-3, Серпухов, 1985.
- [11] Belogorlov E.A., Zhigunov V.P. // Nuc. Inst. Meth., 1985, A235, p.146.

- [12] Hertel H.E., Davidson T.W. // Nuc. Inst. Meth. 1985, A238, p.509.
- [13] Алексеев А.Г. — Препринт ИФВЭ 95-69, Протвино, 1995.
- [14] Abosimov A.I. et.al — Preprint ИИЕР 93-43, Protvino, 1993.
- [15] Абросимов А.И. и др. — Препринт ОИЯИ Р16-93-37, Дубна, 1993.
- [16] Алексеев А.Г., Харлампиев С.А. — Препринт ИФВЭ 97-18, Протвино, 1997.
- [17] Alexeev A.G., Kharlampiev S.A. // Radiat. Prot. Dosim. 1996, 70(1/4) 341-344.
- [18] Санников А.В. — Препринт ИФВЭ 90-133, Протвино, 1990.
- [19] Алексеев А.Г., Лебедев В.Н., Харлампиев С.А. — Препринт ИФВЭ 95-47, Протвино 1995.

*Рукопись поступила 13 октября 1998 г.*

А.Г.Алексеев и др.

Дозиметр смешанного излучения на основе ионизационных камер для метрологического обеспечения радиационного контроля на ускорителе.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы  $\text{\LaTeX}$ .

Редактор Н.В.Ежела.

Технический редактор Н.В.Орлова.

---

Подписано к печати 15.10.98. Формат  $60 \times 84/8$ .      Офсетная печать.

Печ.л. 1,25.    Уч.-изд.л. 0,96.    Тираж 150.    Заказ 303.    Индекс 3649.

ЛР №020498 17.04.97.

---

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

