

## **КОРРЕКЦИЯ ПОКАЗАНИЙ АЛЬБЕДНЫХ ДОЗИМЕТРОВ НА МЦ400 ЛЯР С ПОМОЩЬЮ ШАРОВОЙ АЛЬБЕДНОЙ СИСТЕМЫ И СРАВНЕНИЕ С ДРУГИМИ МЕТОДАМИ КОРРЕКЦИИ**

*Ю. В. Мокров<sup>1</sup>, С. В. Морозова, Г. Н. Тимошенко, В. А. Крылов*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В работе представлены результаты коррекции показаний альбедных дозиметров ДВГН-01 за защитой МЦ400 ЛЯР с помощью шаровой альбедной системы. По результатам настоящей работы и выполненным ранее работ получены формулы, аппроксимирующие значения поправочных коэффициентов, используемых при коррекции показаний, в зависимости от параметров жесткости низкоэнергетических спектров нейтронов.

Измерены спектры нейтронов в трех точках за защитой МЦ400, и рассчитаны по этим спектрам поправочные коэффициенты для ДВГН-01. Показано хорошее согласие этих коэффициентов с коэффициентами, полученными с помощью шаровой альбедной системы. Это говорит о достоверности полученных значений поправочных коэффициентов.

На основании результатов настоящей работы и данных, приведенных в других работах, рекомендованы значения поправочных коэффициентов для использования в индивидуальном дозиметрическом контроле (ИДК) в ЛЯР.

The results of readout correction for albedo dosimeters DVGН-01 with using of a spherical albedo system are presented. The measurements were carried out behind the U400M shielding. The functions of correction coefficients in dependence of neutron spectra «hardness» have been approximated previously.

The neutron spectra were measured in three places and the correction coefficients for DVGН-01 readout were estimated by these spectra. A good agreement was shown of the coefficients obtained with the help of these spectra and by the method of spherical albedo system. This is a real evidence of the correction method reliability.

On the base of present results the correction coefficients were recommended for individual radiation control at LNR.

PACS: 29.90.+r; 87.53.Bn

### **ВВЕДЕНИЕ**

В последние годы появился ряд публикаций, посвященных различным методам коррекции показаний альбедных дозиметров при их использовании в полях нейтронного излучения широкого энергетического диапазона. Это связано с использованием дозиметров такого типа в ИДК на различных ядерно-физических установках, в полях которых присутствуют нейтроны от тепловых до сверхбыстрых (с энергией выше 20 МэВ).

---

<sup>1</sup>E-mail: mokrov@jinr.ru

Необходимость коррекции показаний альбедных дозиметров обусловлена ходом энергетической зависимости их чувствительности (ЭЗЧ), а также зависимостью ЭЗЧ от углового распределения падающего на дозиметр излучения.

ЭЗЧ такого распространенного в ИДК альбедного дозиметра, как ДВГН-01 комплекса АКИДК-301 [1], рассчитана в работе [2] для различных геометрий облучения. В этой же работе рассчитаны значения поправочных коэффициентов к показаниям дозиметров ДВГН-01 для индивидуального эквивалента дозы и эффективной дозы в разных геометриях облучения для различных спектров нейтронов. В работе [3] приведены результаты аналогичных расчетов для 23 спектров за защитой ядерно-физических установок ОИЯИ. Альбедные дозиметры нейтронов существуют в различных модификациях. В работах [4, 5] приведены результаты сравнительного изучения чувствительности альбедных дозиметров разных типов в полях нейтронов радионуклидных источников нейтронов и за защитой У-70 в ИФВЭ [4] и на У-400М ЛЯР ОИЯИ [5]. Результаты перечисленных работ позволили установить значения поправочных коэффициентов для дозиметра ДВГН-01 комплекса АКИДК-301 при его использовании в ИДК в ОИЯИ.

Рассмотренные в этих работах методы коррекции показаний альбедных дозиметров основаны либо на использовании измеренных спектров нейтронов и последующих расчетах поправочных коэффициентов, либо на экспериментальном определении чувствительности альбедных дозиметров в полях нейтронов с различной энергией и получении на основании этих данных поправочных коэффициентов. Определение чувствительности альбедных дозиметров, не говоря уже об измерении спектров нейтронов, является довольно сложной экспериментальной задачей, не всегда выполнимой оперативно и с требуемой тщательностью службами радиационного контроля. В связи с этим более предпочтительным является использование простых и оперативных методов коррекции показаний альбедных дозиметров. Так, в работе [6] описан более простой и оперативный, чем используемые ранее, метод определения поправочных коэффициентов. Он основан на использовании устройства, названного авторами дозиметром эффективной дозы, состоящего из полиэтиленового шара, на поверхности которого симметрично размещены шесть дозиметров ДВГН-01, а слайд ДВГН-01 расположен в центре этого шара. В работе [7] представлены результаты использования данного устройства при коррекции показаний ДВГН-01 на фазотроне ЛЯП ОИЯИ. В настоящей работе описано использование этого устройства на МЦ400 ЛЯР ОИЯИ для коррекции показаний ДВГН-01 и приведены результаты сравнения полученных значений поправочных коэффициентов с коэффициентами, рассчитанными по измеренным спектрам нейтронов и по результатам измерения индивидуального эквивалента дозы.

## 1. ГРАДУИРОВКА И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ШАРОВОЙ АЛЬБЕДНОЙ СИСТЕМЫ

**1.1. Результаты градуировки системы в поле Pu–Be-источника.** В работе [7] представлены результаты градуировки устройства на основе полиэтиленового шара с альбедными дозиметрами ДВГН-01 на его поверхности и слайдом дозиметра в центре. Как и в работе [7], в настоящей работе это устройство будет называться шаровой альбедной системой (далее — системой). Градуировка системы проводилась на поверочной установке с помощью Pu–Be-источника нейтронов за экранирующим конусом и без конуса. В результате градуировки получено значение отношения амбиентного эквивалента дозы

к показанию слайда в центре шара, равное  $0,59 \pm 0,07$  ( $\pm 12\%$ ). Полученное значение в пределах погрешности совпадает со значением, приведенным в работе [6]. Это позволяет использовать для расчета поправочных коэффициентов приведенное в этой работе аналитическое выражение, связывающее поправочный коэффициент для эффективной дозы в изотропной геометрии  $k_E(\text{ISO})$  с параметром жесткости низкоэнергетических спектров нейтронов, равным отношению показаний слайда ДВГН-01 в центре шара  $H_c$  к усредненным показаниям шести ДВГН-01 на поверхности шара  $H_s$ :

$$k_E(\text{ISO}) = 0,235 \left( \frac{H_c}{H_s} \right)^{1,18}. \quad (1)$$

**1.2. Методы коррекции показаний ДВГН-01.** Коррекция показаний альбедных дозиметров, как отмечено выше, проводится путем определения и применения поправочных коэффициентов. Поправочные коэффициенты определяются различными методами: расчетными в полях с известными спектрами нейтронов и экспериментальными, например, с помощью шаровой альбедной системы.

Поправочные коэффициенты для эффективной дозы  $E(\text{ISO})$  в изотропной геометрии  $k_E(\text{ISO})$  для спектра нейтронов  $\Phi(E)$  рассчитываются по формуле

$$k_E(\text{ISO}) = \frac{E(\text{ISO})}{H_{\text{ДВГН}}(\text{ISO})} = \frac{\int e_{\text{ISO}}(E) \Phi(E) dE}{k_{\text{гр}} \int R_{\text{ISO}}(E) \Phi(E) dE}, \quad (2)$$

где  $R_{\text{ISO}}(E)$  — ЭЗЧ ДВГН-01 в изотропной геометрии при облучении на фантоме в виде тканеэквивалентного эллиптического цилиндра [2];  $k_{\text{гр}}$  — рассчитанное значение градуировочного коэффициента при градуировке дозиметра на плоском водном фантоме в форме параллелепипеда в поле градуировочного источника со спектром нейтронов  $\Phi_{\text{гр}}(E)$ ;  $e_{\text{ISO}}(E)$  — удельная (на единичный флюенс нейтронов) эффективная доза в изотропной геометрии для нейтронов с энергией до 20 МэВ [8].

Градуировочный коэффициент  $k_{\text{гр}}$  находится как отношение рассчитанной дозы облучения  $H_p^{\text{гр}}(10)$  к показаниям ДВГН-01  $N_{\text{ДВГН}}^{\text{гр}}$  при градуировке:

$$k_{\text{гр}} = \frac{H_p^{\text{гр}}(10)}{N_{\text{ДВГН}}^{\text{гр}}} = \frac{\int h_p(10,0^\circ, E) \Phi_{\text{гр}}(E) dE}{\int R_{\text{ПЗ}}^{\text{гр}}(E) \Phi_{\text{гр}}(E) dE}, \quad (3)$$

где  $R_{\text{ПЗ}}^{\text{гр}}$  — ЭЗЧ ДВГН-01 в передне-задней геометрии для плоского водного фантома, используемого при градуировке,  $\text{см}^{-2}$  [2];  $\Phi_{\text{гр}}(E)$  — спектр Pu-Be-источника для установки УКПН [9], на которой градуируются ДВГН-01 при их производстве.

Использование шаровой альбедной системы основано на измерении показаний шести альбедных дозиметров, расположенных симметрично на поверхности полиэтиленового шара, и слайда ДВГН-01 в центре шара. Получение аналитического выражения (1), связывающего значения поправочного коэффициента  $k_E(\text{ISO})$  с отношением  $H_c/H_s$ , основано на расчете этих величин в полях с известными спектрами нейтронов. Показания ДВГН-01  $H_s$  на поверхности полиэтиленового шара диаметром 25,4 см при изотропной геометрии облучения и показания слайда ДВГН-01 в центре шара  $H_c$  рассчитываются

по формулам [6]

$$H_s = k_{\text{гр}} \int R_s(E) \Phi(E) dE, \quad (4)$$

$$H_c = k \int R_c(E) \Phi(E) dE, \quad (5)$$

где  $R_s(E)$  — энергетическая зависимость чувствительности дозиметра ДВГН-01 на поверхности полиэтиленового шара диаметром 25,4 см;  $R_c(E)$  — энергетическая зависимость чувствительности детектора тепловых нейтронов LiI в центре полиэтиленового шарового замедлителя диаметром 25,4 см;  $k$  — коэффициент для расчета  $H_c$  с учетом градуировки слайда ДВГН-01 в центре шара, который определяется по формуле

$$k = \frac{\int h^*(10) \Phi_{\text{ОПРИ}}(E) dE}{(H^*(10)/H_c)_{\text{экс}} \int R_c(E) \Phi_{\text{ОПРИ}}(E) dE}, \quad (6)$$

где  $\Phi_{\text{ОПРИ}}(E)$  — спектр опорного поля ИФВЭ на основе источника  $^{252}\text{Cf}$  за экранирующим конусом [9], в котором проводилась градуировка системы в работе [6].

Отношение  $H_c/H_s$  увеличивается с ростом энергии, поэтому оно может использоваться в качестве параметра жесткости спектра, в зависимости от которого приводятся рассчитанные значения поправочных коэффициентов.

Зависимость (1), приведенная в [6], получена в результате расчета для 120 литературных низкоэнергетических спектров нейтронов. В настоящей работе аналогичная зависимость получена для 26 спектров на ядерно-физических установках ОИЯИ. При этом использовались как 23 спектра на ядерно-физических установках ОИЯИ, которые приведены и описаны в работе [10], так и 3 спектра за защитой МЦ400, измеренные в процессе выполнения данной работы и описанные ниже.

## 2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ШАРОВОЙ АЛЬБЕДНОЙ СИСТЕМЫ И ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРОВ НЕЙТРОНОВ НА ЦИКЛОТРОНЕ МЦ400

На рис. 1 показаны точки измерений на МЦ400. С шаровой альбедной системой измерения проводились в точках 2, 3, 4 и 5. Точка 2 располагалась в дверном проеме откатной двери Д22 в зал ускорителя, точка 3 напротив заложеного дверного проема Д25Б в зале ускорителя за противоположной защитной стеной. Точка 4 находилась за откатной дверью в зал ускорителя у ворот. Точка 5 находилась в дверном проеме двери Д21 в зал ускорителя в том же коридоре, что и точка 2. Во всех указанных точках измерений может находиться персонал как группы А, так и группы Б. Циклотрон работал в режиме ускорения ионов неона  $^{20}\text{Ne}^{7+}$  до энергии  $\sim 53$  МэВ/нуклон и вывода ионов на сепаратор АКУЛИНА и установку КОМБАС. Размещение приборов в точке 5 демонстрируется на рис. 2.

Спектры нейтронов измерялись в точках 2, 3 и 5 с помощью портативного автономного многосферного спектрометра в режиме вывода пучка ионов неона в канал сепаратора АКУЛИНА (ток пучка ионов на производящей мишени около 600 нА). Детектором

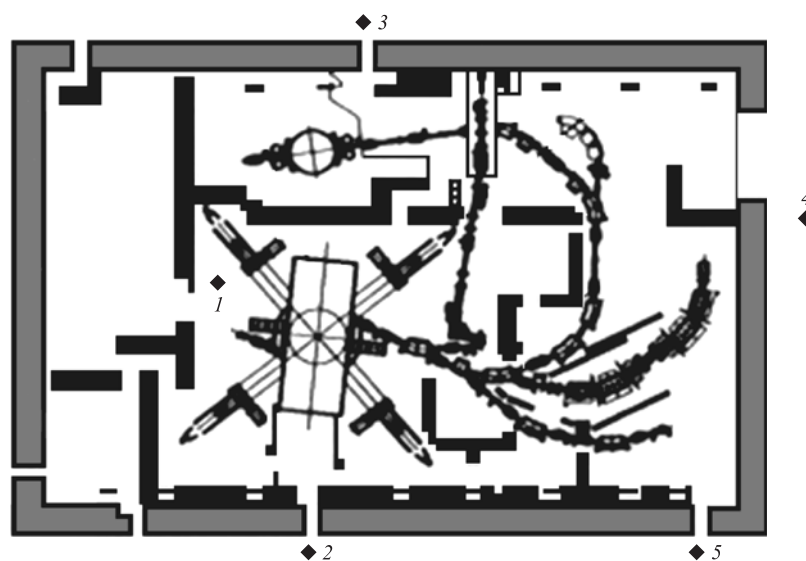


Рис. 1. Точки измерений на МЦ400



Рис. 2. Расположение шаровой альбедной системы и спектрометра нейтронов в точке 5

тепловых нейтронов спектрометра является сцинтиллятор  $\text{LiI}(\text{Eu})$  размерами  $\text{Ø } 4,3 \times 4$  мм, обогащенный  ${}^6\text{Li}$  до 90%. В качестве замедлителей использовался набор полиэтиленовых сфер диаметрами 2, 3, 5, 8, 10, 12 дюймов, а также проводились измерения с «голым» детектором и с детектором в кадмиевом чехле. Мониторирование поля нейтронов осуществлялось с помощью пропорционального  ${}^3\text{He}$ -счетчика в полиэтиленовом замедлителе.

Для восстановления спектра нейтронов по показаниям спектрометра использовался набор функций чувствительности. Восстановление спектра, т. е. решение обратной задачи, основано на методе статистической регуляризации. Программа реализует алгоритм численного решения системы алгебраизированных уравнений

$$N_i = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \Phi(E) R_i(E) dE, \quad i = 1, \dots, m. \quad (7)$$

Здесь  $E_{\max}, E_{\min}$  — границы энергетического спектра  $\Phi(E)$ ;  $R_i(E)$  — функция чувствительности спектрометра с замедлителем  $i$ -го диаметра (имп. · см<sup>2</sup> · нейтрон<sup>-1</sup> · МэВ);  $N_i$  — показания спектрометра (скорость счета, имп. · с<sup>-1</sup>). При восстановлении спектров использовалась априорная информация в виде требования гладкости искомого спектра  $\Phi(E)$  и ограничение спектра сверху энергией первичного иона.

На рис. 3 приведены спектры нейтронов в точке 2, 3 и 5, представленные в виде  $\Phi(E) \times E$  (в единицах летаргии) с логарифмически равномерным разбиением во всем интервале энергий. Спектры представляют собой типичные «мягкие» спектры, формируемые, главным образом, медленными, многократно рассеянными в зале ускорителя

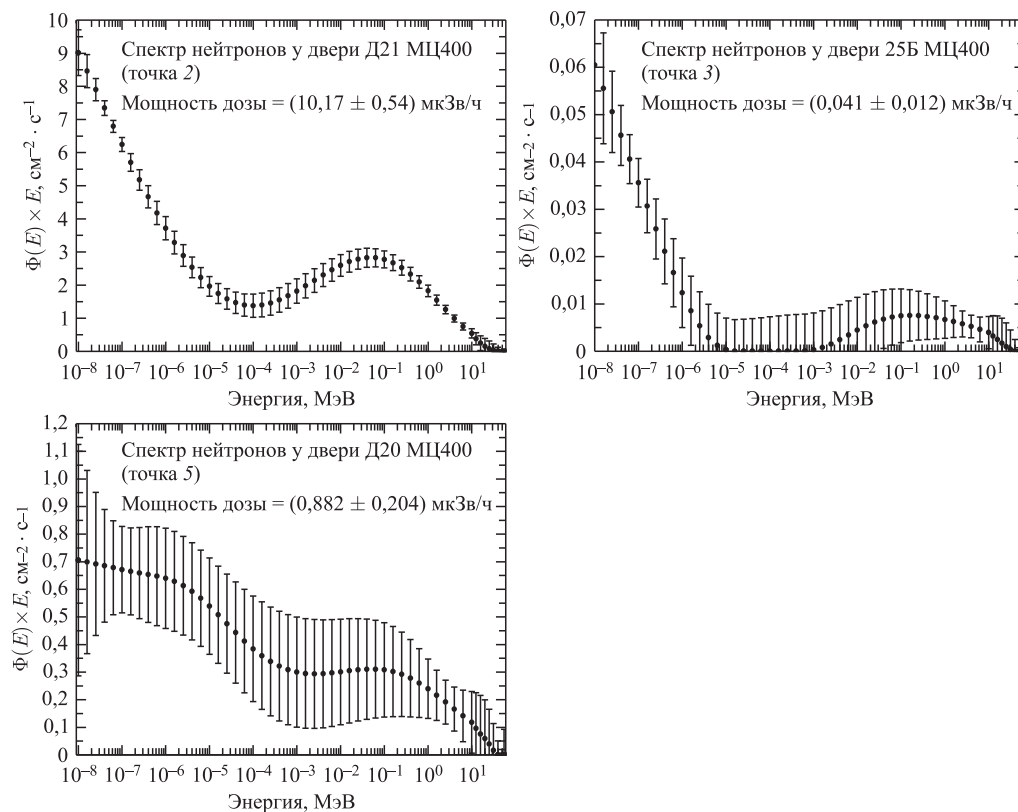


Рис. 3. Спектры нейтронов в точках 2, 3 и 5

нейтронами. Максимумы функции  $\Phi(E) \times E$  в диапазоне энергий  $\sim 0,1$  МэВ обусловлены вкладом испарительных нейтронов. Наибольший вклад испарительных нейтронов проявляется в точке 2, расположенной сравнительно близко к производящей мишени.

Значения мощности дозы нейтронов в точках получены путем свертки спектров с энергетической зависимостью эффективной дозы нейтронов для случая изотропного облучения. Погрешности восстановления спектров в большой мере определяются статистикой показаний спектрометра (счетов  $N_i$ ), поэтому спектры в точках 3 и 5, где наблюдается очень слабое поле нейтронов, восстановлены со значительными погрешностями.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И РАСЧЕТОВ

**3.1. Расчеты по спектрам нейтронов.** Для трех спектров нейтронов на МЦ400, полученных в настоящей работе, были рассчитаны поправочные коэффициенты  $k_E(ISO)$  и

Таблица 1. Результаты расчетов по спектрам

Установка	Номер спектра	Средняя энергия спектра нейтронов $E_{ср}$ , эВ	Средний удельный АЭД спектра нейтронов, $h_s^*(10)$ , пЗв · см <sup>2</sup>	$k_H(ПЗ)$	$k_E(ISO)$	$H_c/H_s$
ЛЯП, ф/т	№ 5 мягкое опорное поле	$2,58 \cdot 10^5$	30,5	0,045	0,057	0,29
ЛЯП, ф/т	№ 4 жесткое опорное поле	$9,30 \cdot 10^6$	109,9	0,176	0,383	0,73
ЛЯП, с/ц	№ 1	$6,00 \cdot 10^7$	197,9	0,468	1,659	1,19
ЛЯП, с/ц	№ 2	$3,68 \cdot 10^7$	224,7	0,527	1,724	1,43
ЛЯП, с/ц	№ 2п	$3,28 \cdot 10^5$	45,8	0,046	0,075	0,29
ЛЯП, с/ц	№ 1 обв.	$7,78 \cdot 10^7$	259,7	0,768	2,365	2,15
ЛЯП, с/ц	№ 1 <sup>а</sup> обв.	$2,78 \cdot 10^7$	243,5	0,628	1,648	1,96
ЛВЭ, с/ф	№ 1	$2,84 \cdot 10^6$	126,2	0,174	0,302	0,79
ЛВЭ, с/ф	№ 3	$1,30 \cdot 10^6$	161,6	0,250	0,393	1,18
ЛВЭ, с/ф	№ 4	$3,15 \cdot 10^6$	131,8	0,170	0,286	0,79
ЛВЭ, с/ф	№ 5	$1,12 \cdot 10^6$	114,1	0,138	0,213	0,67
ЛВЭ, с/ф	№ 6	$9,37 \cdot 10^6$	50,3	0,048	0,113	0,25
ЛНФ, ИБР-30	№ 1	$9,33 \cdot 10^4$	37,4	0,038	0,048	0,24
ЛНФ, ИБР-30	№ 2	$1,18 \cdot 10^6$	100,5	0,099	0,193	0,53
ЛНФ, ИБР-30	№ 3	$2,10 \cdot 10^5$	54,8	0,062	0,082	0,33
ЛНФ, ИБР-30	№ 4	$7,86 \cdot 10^5$	131,1	0,162	0,234	0,78
ЛНФ, ИБР-30	№ 5	$2,42 \cdot 10^5$	60,8	0,065	0,088	0,36
ЛНФ, ИБР-2	№ 1	$7,12 \cdot 10^5$	165,7	0,227	0,289	1,09
ЛНФ, ИБР-2	№ 2	$5,71 \cdot 10^5$	138,6	0,181	0,224	0,87
ЛНФ, ИРЕН	№ 3	$2,57 \cdot 10^5$	43,6	0,072	0,099	0,39
ЛЯР, У300	№ 1	$2,67 \cdot 10^5$	60,2	0,065	0,104	0,40
ЛЯР, У300	№ 2	$2,45 \cdot 10^5$	95,7	0,111	0,128	0,31
ЛЯР, У300	№ 3	$5,88 \cdot 10^4$	39,0	0,040	0,046	0,22
ЛЯР, МЦ400	№ 2	$2,27 \cdot 10^5$	53,9	0,12	0,08	0,40
ЛЯР, МЦ400	№ 3	$3,85 \cdot 10^5$	58,5	0,16	0,12	0,47
ЛЯР, МЦ400	№ 5	$3,69 \cdot 10^5$	53,6	0,11	0,08	0,36

$k_H(\text{ПЗ})$ , средние энергии спектров нейтронов  $E_{\text{ср}}$ , средние удельные амбиентные эквивалентные дозы (эквивалентные дозы на единичный флюенс)  $h_s^*(10)$  и значения отношений  $H_c/H_s$ . Результаты расчета представлены в табл. 1. Кроме того, в таблице приведены аналогичные значения для 23 спектров из работы [3] и рассчитанные для них отношения  $H_c/H_s$ .

На рис. 4 представлены результаты расчетов отношений  $H_c/H_s$  и соответствующие им значения поправочных коэффициентов  $k_E(\text{ISO})$  для различных спектров из табл. 1. При этом сплошными точками показаны значения для низкоэнергетических спектров со средней энергией меньше 1 МэВ, кружками — для высокоэнергетических спектров. На рис. 5 аналогичные величины представлены для поправочных коэффициентов  $k_H(\text{ПЗ})$ .

Приведенные на рис. 4 и 5 значения поправочных коэффициентов  $k_E(\text{ISO})$  и  $k_H(\text{ПЗ})$  аппроксимированы для низкоэнергетических спектров следующими зависи-

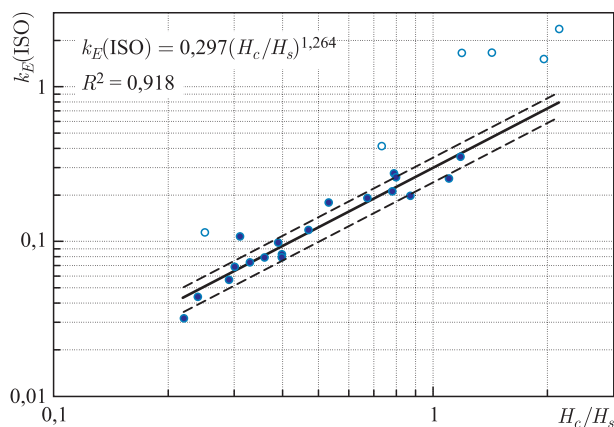


Рис. 4 (цветной в электронной версии). Результаты расчетов по спектрам величин  $k_E(\text{ISO})$  и  $H_c/H_s$

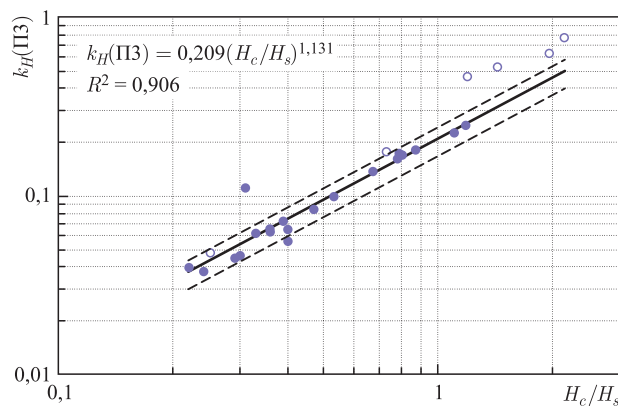


Рис. 5 (цветной в электронной версии). Результаты расчетов по спектрам величин  $k_H(\text{ПЗ})$  и  $H_c/H_s$



мостями от отношения  $H_c/H_s$ :

$$k_E(\text{ISO}) = 0,297 \left( \frac{H_c}{H_s} \right)^{1,264} \quad \text{для } k_E(\text{ISO}), \quad (8)$$

$$k_H(\text{ПЗ}) = 0,209 \left( \frac{H_c}{H_s} \right)^{1,131} \quad \text{для } k_H(\text{ПЗ}). \quad (9)$$

Сплошными линиями на рис. 4 и 5 показаны зависимости (8) и (9), штриховыми — коридор неопределенности, составляющий  $\pm 20\%$  от значений, определенных по формулам (8) и (9). В него входит 85 % точек, соответствующих низкоэнергетическим спектрам.

Полученная аналитическая зависимость для поправочных коэффициентов  $k_E(\text{ISO})$  в низкоэнергетических спектрах на ЯФУ ОИЯИ сравнивалась с аналогичной зависимостью, определенной в работе [6] для 120 низкоэнергетических литературных спектров. Из формул (1) и (8) видно, что значения поправочных коэффициентов, определенных по формуле (8), выше, чем определенных по формуле (1).

На рис. 6 приведены графики функций, описываемых формулами (1) из работы [6] — синим цветом и формулой (8) настоящей работы — оранжевым цветом с соответствующими неопределенностями для коэффициента  $k_E(\text{ISO})$ . Видно, что значения поправочных коэффициентов, полученных по двум сравниваемым формулам, довольно близки и в пределах 15–20 % совпадают для указанного диапазона отношений  $H_c/H_s$  от 0,2 до 1,5.

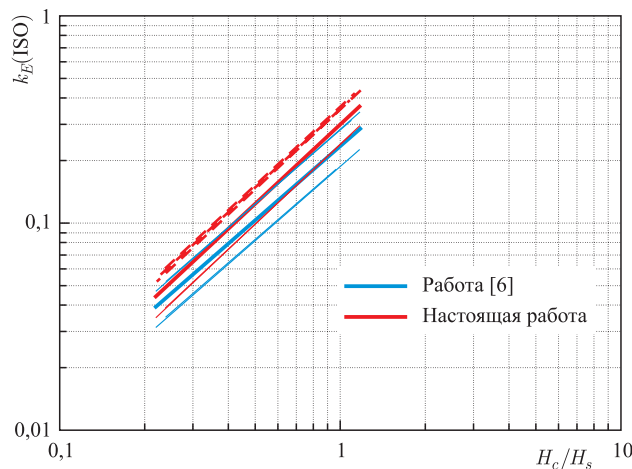


Рис. 6 (цветной в электронной версии). Сравнение двух зависимостей  $k_E(\text{ISO})$  от  $H_c/H_s$

**3.2. Измерения с шаровой альбедной системой.** Результаты измерений с шаровой альбедной системой за защитой МЦ400 представлены в табл. 2. Здесь  $H_{\max}$  — максимальное значение показаний ДВГН-01 на шаре;  $H_s$  — усредненное значение показаний шести дозиметров ДВГН-01, расположенных на шаре;  $H_c$  — показание слайда в центре шара системы. Значения поправочных коэффициентов  $k_E(\text{ISO})$  даны в колонках 6 и 7: в колонке 6 — рассчитанные по формуле (1) из работы [6], в колонке 7 — рассчитанные по формуле (8) настоящей работы. Изотропность поля излучения в точке измерения

Таблица 2. Результаты измерений и расчетов с помощью шаровой альбедной системы в полях нейтронов на МЦ400

Место измерений	$H_{\max}$ , мЗв	$H_s$ , мЗв	$H_c$ , мЗв	$\frac{H_c}{H_s}$	$k_E(\text{ISO})$ , работа [6]	$k_E(\text{ISO})$ , настоящая работа	$K_{\text{из}} = \frac{(A+B)}{A}$	$H^*(10)$ , мЗв	$\frac{H_{\text{обл}}}{K_{\text{из}}} = \frac{H^*(10)}{K_{\text{из}}}$	$k_H(\text{ПЗ}) = \frac{H_{\text{обл}}}{H_{\max}}$	$k_H(\text{ПЗ})$ по формуле (9)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Точка 2	13,53	7,85	3,54	0,45	0,09	0,11	1,25	2,09	1,67	0,12	0,08
Точка 3	0,37	0,29	0,18	0,60	0,13	0,15	1,75	0,10	0,06	0,16	0,12
Точка 4	1,11	0,80	0,24	0,30	0,06	0,06	1,56	0,14	0,09	0,09	0,05
Точка 5	18,38	11,77	4,21	0,36	0,07	0,08	1,25	2,44	1,95	0,11	0,07

оценивалась с помощью коэффициента  $K_{\text{из}}$ , определяемого как отношение  $(A+B)/A$ , где  $A$  — максимальное показание ДВГН-01 на шаре;  $B$  — показание ДВГН-01 на стороне, противоположной той, где наблюдается максимальное значение показаний. Коэффициент  $K_{\text{из}}$  используется в полях нейтронов с энергией меньше 20 МэВ для определения дозы облучения дозиметра, зарегистрировавшего максимальное значение показаний. Значения амбиентного эквивалента дозы  $H^*(10)$  определялись по показаниям  $H_c$  слайда, расположенного в центре шара, по формуле  $H^*(10) = H_c \cdot 0,59$ .

В колонке 10 приведены результаты определения доз облучения дозиметров  $H_{\text{обл}} = H^*(10)/K_{\text{из}}$ . Величина  $H_{\text{обл}}$  рассчитывается для нахождения значений поправочных коэффициентов  $k_H(\text{ПЗ})$  к показаниям ДВГН-01 в передне-задней (ПЗ) геометрии облучения для индивидуального эквивалента дозы, т. е. для той геометрии, когда излучение падает нормально на фантом, а индивидуальный дозиметр находится на передней стороне фантома. Переход от амбиентного эквивалента дозы к индивидуальному правомерен вследствие того, что эти величины в диапазоне энергий до 20 МэВ различаются менее, чем на 10 %.

Значения  $k_H(\text{ПЗ})$  представлены в колонках 11 и 12: определенные как отношение  $H_{\text{обл}}/H_{\max}$  (в колонке 11) и определенное по формуле (9) настоящей работы (в колонке 12).

**3.3. Сравнение различных методов коррекции.** По результатам, полученным в настоящей работе, проведено сравнение значений поправочных коэффициентов, полученных в одних и тех же точках за защитой МЦ400 ЛЯР различными методами: с помощью расчетов по измеренным спектрам и по результатам измерений с шаровой альбедной системой. Результаты сравнения представлены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты сравнения поправочных коэффициентов, полученных различными методами

Номер точки измерения на МЦ400	$k_H(\text{ПЗ})$			$k_E(\text{ISO})$		
	Формула (9) настоящей работы	$H_{\text{обл}}/H_{\max}$	Расчет по спектру	Формула (8) настоящей работы	Формула (5) работы [6]	Расчет по спектру
2	0,08	0,12	0,06	0,11	0,09	0,08
3	0,12	0,16	0,09	0,15	0,13	0,12
4	0,05	0,09	—	0,06	0,06	—
5	0,07	0,11	0,07	0,08	0,07	0,08

В первой колонке показаны номера точек измерения на МЦ400.

Во второй, третьей и четвертой колонках представлены значения поправочного коэффициента  $k_H$ (ПЗ): определенные по измеренным значениям отношений  $H_c/H_s$  и рассчитанные по формуле (9), найденные как отношение дозы облучения к максимальному значению показаний ДВГН-01 на поверхности шара и рассчитанные по измеренному спектру нейтронов.

В пятой, шестой и седьмой колонках показаны значения поправочного коэффициента  $k_E$ (ISO): определенного по формуле (8) настоящей работы и формуле (5) работы [6] с использованием измеренного отношения  $H_c/H_s$  и по измеренному спектру нейтронов.

Из анализа представленных в таблице результатов следует:

1. По коэффициенту  $k_H$ (ПЗ):

а) Поправочные коэффициенты, определенные для одной и той же точки по формуле (9) и измеренному отношению  $H_c/H_s$  и по спектру, хорошо согласуются между собой. При этом максимальное отличие от среднего значения не превышает 15 %.

б) Поправочные коэффициенты, определенные как отношение дозы облучения к максимальному показанию ДВГН-01 на поверхности шара, для всех точек выше, чем найденные по спектру и формуле (9). Отличие максимального значения от среднего значения, определенного всеми тремя методами, может достигать 30 %. Возможно, это различие обусловлено недостаточной корректностью оценки коэффициента изотропности по показаниям только двух ДВГН-01, расположенных на противоположных сторонах шара.

в) Значения, определенные по спектру и формуле (9), хорошо согласуются с результатами, определенными по спектру на У-300 в работе [3]. При этом поправочные коэффициенты не превышают значения 0,12.

г) При определении поправочных коэффициентов для индивидуального эквивалента дозы в ПЗ-геометрии рекомендуется использовать шаровую альбедную систему и формулу (9).

2. По коэффициенту  $k_E$ (ISO):

а) Поправочные коэффициенты, определенные тремя различными методами, отличаются от среднего значения не более чем на 13 %. Максимальное значение коэффициента при этом равно 0,15.

б) Полученные результаты хорошо согласуются с расчетными данными, полученными в работе [3]. Исходя из этого, можно рекомендовать для использования в ИДК в ЛЯР значение поправочного коэффициента, равное 0,15.

В целом, анализируя табл. 3, можно констатировать хорошее согласие в пределах 15 % значений поправочных коэффициентов, определенных различными методами. При этом измеренные и расчетные данные как для отношений  $H_c/H_s$ , так и для поправочных коэффициентов также хорошо согласуются между собой в пределах этого же значения 15 %.

#### 4. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты, представленные в табл. 1 и 2 и на рис. 5 и 6, позволяют сделать следующие выводы:

1. В соответствии с результатами измерения спектров за защитой МЦ400 и с полученными значениями отношений  $H_c/H_s$  спектры нейтронов в точках измерений относятся

к низкоэнергетическим, которые характеризуются отношением  $H_c/H_s$  меньше единицы и средними энергиями спектров менее 1 МэВ. Средний удельный АЭД для таких спектров меньше  $100 \text{ пЗв} \cdot \text{см}^2$ . Это позволяет использовать в полях нейтронов за защитой МЦ400 шаровую альбедную систему при определении поправочных коэффициентов для ДВГН-01.

2. Полученные значения поправочных коэффициентов для МЦ400 хорошо согласуются со значениями поправочных коэффициентов для мягких (низкоэнергетических) спектров на установках ОИЯИ, полученными ранее расчетным путем по спектрам нейтронов. Несколько выше значения поправочных коэффициентов в точке 3, они превышают принятые ранее для мягких спектров значение 0,10.

3. Зависимость поправочного коэффициента  $k_E(\text{ISO})$  от отношения  $H_c/H_s$ , аппроксимированная формулой (8), близка к аналогичной зависимости из работы [6] для низкоэнергетических спектров. Для индивидуального эквивалента дозы может использоваться формула (9).

4. Подтверждены выводы работы [6] о том, что методика определения поправочных коэффициентов с помощью шаровой альбедной системы имеет ограничения для жестких ускорительных спектров из-за существенного падения чувствительности ДВГН-01 и слайда в центре шара при энергиях выше 20 МэВ. Вследствие этого, при проведении ИДК в местах, где возможен вклад в дозу облучения персонала от нейтронов с энергией выше 20 МэВ, необходимо использовать вместе с ДВГН-01 детекторы сверхбыстрых нейтронов, например, трековые детекторы.

5. Сравнение значений поправочных коэффициентов, полученных за защитой МЦ400 различными методами — расчетом по спектрам нейтронов и с помощью шаровой альбедной системы, показывает их близость. Их различие не превышает погрешности нахождения значений этих коэффициентов, равной 15 %.

6. Полученные в настоящей работе значения поправочных коэффициентов для МЦ400 хорошо согласуются со значениями аналогичных коэффициентов, полученных в работе [3] расчетом по спектрам для У-300 ЛЯР. Это подтверждает обоснованность высказанной в работе [3] возможности использования поправочных коэффициентов для У-300 и для современных микротронов ЛЯР.

7. На основе анализа поправочных коэффициентов, полученных в работах [3–5] и в настоящей работе различными методами, можно рекомендовать использовать для циклотронов ЛЯР значение коэффициента  $k_H(\text{ПЗ})$ , равное 0,15. При этом возможно некоторое завышение доз облучения персонала в некоторых точках за защитой МЦ400.

8. Следует отметить близость значений поправочных коэффициентов  $k_H(\text{ПЗ})$  и  $k_E(\text{ISO})$  для всех точек измерения на МЦ400. Это говорит о корректности определения нормируемой величины эффективной дозы с помощью нахождения по результатам ИДК рекомендованной операционной величины — индивидуального эквивалента дозы.

Авторы выражают благодарность В. Ю. Щеголеву за помощь в организации измерений за защитой МЦ400 ЛЯР.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комплекс автоматизированный индивидуального дозиметрического контроля АКИДК-301. Руководство по эксплуатации. Ангарск, 2007.
2. Санников А. В. и др. Индивидуальный дозиметр смешанного излучения ДВГН-01: разработка и исследование характеристик. Препринт ИФВЭ 2005-6 ОРИ. Протвино, 2005. 12 с.

3. *Бескровная Л. Г., Горошкова Е. А., Мокров Ю. В.* Исследование адекватности показаний альбедного дозиметра ДВГН-01 дозам облучения персонала в полях нейтронного излучения ядерно-физических установок ОИЯИ // Письма в ЭЧАЯ. 2010. Т. 7, № 3(159). С. 347–363.
4. *Алексеев А. Г., Мокров Ю. В., Морозова С. В.* Сравнительное изучение чувствительности альбедных дозиметров нейтронов разных типов с целью коррекции их показаний при использовании в полях ядерно-физических установок ОИЯИ // Письма в ЭЧАЯ. 2012. Т. 9, № 2. С. 192–201.
5. *Мокров Ю. В., Морозова С. В., Щеголев В. Ю.* Сравнительное изучение чувствительности и коррекция показаний альбедных дозиметров разных типов в полях нейтронов на У-400М // Письма в ЭЧАЯ. 2013. Т. 10, № 2. С. 268–273.
6. *Санников А. В. и др.* Препринт ИФВЭ 2008-1 ОРИ. Протвино, 2008.
7. *Мокров Ю. В., Морозова С. В.* Использование шаровой альбедной системы для коррекции показаний альбедных дозиметров в полях нейтронного излучения фазотрона ОИЯИ // Письма в ЭЧАЯ. 2014. Т. 11, № 2(186). С. 219–232.
8. МУ 2.6.1.45-2001. Дозиметрия. Определение индивидуальных эффективных доз нейтронного излучения. Методические указания. ДБЧС МАЭ РФ, Фед. упр. медико-биол. и экстремальных проблем Минздрава России, 2001.
9. *Санников А. В. и др.* Препринт ИФВЭ 2007-21 ОРИ. Протвино, 2007.
10. *Алейников В. Е., Бескровная Л. Г., Мокров Ю. В.* Сообщ. ОИЯИ Р16-2008-46. Дубна, 2008. 20 с.

Получено 24 марта 2014 г.