

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ШАРОВОЙ АЛЬБЕДНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ КОРРЕКЦИИ ПОКАЗАНИЙ АЛЬБЕДНЫХ ДОЗИМЕТРОВ В ПОЛЯХ НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ФАЗОТРОНА ОИЯИ

Ю. В. Мокров, С. В. Морозова

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Представлены результаты градуировки шаровой альбедной системы в полях излучения радио-нуклидного Pu–Be-источника нейтронов, которую можно использовать для коррекции показаний альбедного дозиметра ДВГН-01. Приведены результаты измерений с системой в полях нейтронов фазотрона ОИЯИ с целью коррекции показаний ДВГН-01 в этих полях. Определены значения поправочных коэффициентов для альбедных дозиметров ДВГН-01 при их использовании в индивидуальном дозиметрическом контроле персонала на фазотроне ОИЯИ.

Results of graduation of sphere albedo system in the fields of the neutron Pu–Be source are presented. It was shown that the system can be used for the readout correction of the DVGН-01 dosimeters. Results of measurements with the system in neutron fields of JINR phasotron for DVGН-01 measurement results correction in these fields are presented. Values of correction coefficients for DVGН-01 for its application in personal radiation monitoring are obtained.

PACS: 29.20.dk; 87.53.Bn

ВВЕДЕНИЕ

Альбедные дозиметры нейтронов находят довольно широкое применение в индивидуальном дозиметрическом контроле (ИДК) по нейтронному излучению. Однако использование индивидуальных дозиметров такого типа вызывает необходимость проведения ряда исследований, обусловленных как особенностями некоторых характеристик этих дозиметров, так и спецификой регистрации измеряемых дозиметрических величин. Прежде всего, это энергетическая зависимость чувствительности (ЭЗЧ) альбедных дозиметров, которая существенно отличается от требуемой зависимости. Кроме того, используемые в ИДК величины, такие как эффективная доза и индивидуальный эквивалент дозы, зависят как от энергетического, так и от углового распределения падающего на дозиметры нейтронного излучения. Эти и другие причины вызывают необходимость проведения коррекции показаний дозиметров при их использовании в полях нейтронов широкого энергетического диапазона в зависимости от выбранных условий облучения. Решению этой задачи в последнее время посвящен ряд работ [1–4]. В них, в основном, приведены

результаты исследований, направленных на определение поправочных коэффициентов к показаниям альбедных дозиметров при коррекции их показаний в полях нейтронов с различными энергетическими распределениями и с наиболее типичными геометриями облучения.

Однако задача оперативного определения поправочных коэффициентов в полях излучения нейтронов широкого энергетического диапазона без применения сложных экспериментальных или расчетных методик пока не решена. Как и не нашла удовлетворительного решения проблема выбора и учета углового распределения нейтронного излучения при использовании индивидуальных альбедных дозиметров нейтронов и коррекции их показаний.

В работе [5] описано устройство на основе полиэтиленового шара с альбедными дозиметрами, названное авторами дозиметром эффективной дозы. В настоящей работе это устройство будем называть шаровой альбедной системой (далее системой). С помощью системы может быть реализован более простой метод коррекции показаний альбедных дозиметров без необходимости измерения спектров нейтронов и экспериментального определения действительного значения индивидуального эквивалента дозы в местах работы персонала. В настоящей работе представлены результаты изучения характеристик системы в полях радионуклидного Pu–Be-источника нейтронов и результаты его использования при определении поправочных коэффициентов для альбедного дозиметра ДВГН-01 в полях нейтронов на фазотроне ОИЯИ.

1. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ СИСТЕМЫ

Система состоит из полиэтиленового шара диаметром 25,4 см (10 дюймов), на поверхности которого располагаются симметрично относительно центра шесть дозиметров ДВГН-01. Условно эти положения можно определить как вверх, вниз, вправо, влево, вперед и назад относительно преимущественного направления падающего на шар нейтронного излучения. В центре шара находится слайд ДВГН-01, который помещается в шар с помощью полиэтиленовой вставки. Внешний вид системы показан на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид шаровой альбедной системы

Усреднение показаний шести ДВГН-01, расположенных на поверхности шара, позволяет моделировать условия изотропного облучения ДВГН-01 на фантоме (теле человека). Это обосновано тем, что ЭЗЧ ДВГН-01 на поверхности шара и на эллиптическом тканеэквивалентном фантоме, наиболее близком к телу человека, отличаются незначительно. На рис. 2 [5] приведены энергетические зависимости на единичный флюенс нейтронов следующих величин: эффективной дозы E (ISO) при изотропном облучении, амбиентного $H^*(10)$ и индивидуального $H_p(10,0^\circ)$ эквивалентов доз — и энергетическая зависимость детектора LiI(Eu) в центре полиэтиленового шара диаметром 25,4 см $R_c(E)$ в относительных единицах.

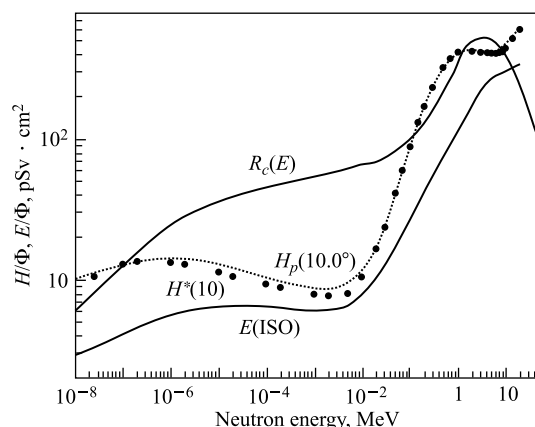


Рис. 2. Энергетические зависимости на единичный флюенс нейтронов $E(ISO)$, $H^*(10)$, $H_p(10,0^\circ)$ и ЭЗЧ слайда ДВГН-01 в центре шара $R_c(E)$

Слайд ДВГН-01 в центре шара предназначен для оценки по результатам измерений с системой амбиентного эквивалента дозы. Энергетическая зависимость $R_c(E)$ в [5] взята из [6], где она рассчитана для детектора 6LiI в полиэтиленовом шаре диаметром 25,4 см. Эта зависимость использовалась в [5] для расчета чувствительности слайда ДВГН-01 в центре шара.

2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОПРАВочНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ

Отношение показания слайда в центре шара H_c к усредненному показанию ДВГН-01 на поверхности шара H_s может служить оценкой жесткости спектра нейтронов — с ростом энергии нейтронов оно растет. Это видно из рис. 2 и энергетической зависимости ДВГН-01 на поверхности шара, приведенной в [5]. При использовании системы для коррекции показаний ДВГН-01 со значениями этого параметра для различных полей нейтронов однозначно связаны значения поправочных коэффициентов $K_E(ISO)$. В работе [5] для 120 низкоэнергетических спектров были рассчитаны поправочные коэффициенты $K_E(ISO)$. Для этих же спектров в ней были рассчитаны также значения отношений H_c/H_s . Зависимость поправочных коэффициентов $K_E(ISO)$ от отношения H_c/H_s показана на рис. 3. Коридор неопределенности составляет $\pm 15\%$. Здесь же показаны результаты экспериментально определенных в [5] коэффициентов $K_E(ISO)$ в зависимости от отношения H_c/H_s для различных источников нейтронов по (α, n) -реакции и делящихся материалов.

Эти зависимость в широком диапазоне отношений H_c/H_s от 0,25 до 5 описывается формулой

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

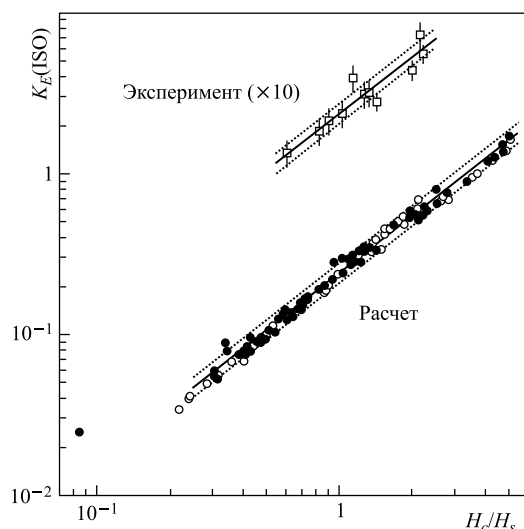


Рис. 3. Зависимость K_E (ISO) от параметра жесткости низкоэнергетических спектров H_c/H_s

При расчете приведенной на рис. 3 и в формуле (1) зависимости использовались результаты градуировки системы в опорном поле рассеянного излучения от источника ^{252}Cf за рассеивающим конусом. При градуировке определялось значение отношения $H^*(10)/H_c$, которое получено равным $0,67 \pm 0,10$. Было показано, что для большинства рассмотренных выше низкоэнергетических спектров оно слабо зависит от спектров и постоянно в пределах $\pm 15\%$.

Таким образом, для того чтобы можно было использовать полученные в [5] результаты для определения поправочных коэффициентов K_E (ISO) в низкоэнергетических полях нейтронов, необходимо проградуировать систему в поле рассеянного излучения и найти значение отношения $H^*(10)/H_c$ в этом поле.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ АМБИЕНТНОЙ ДОЗЫ К ПОКАЗАНИЮ СЛАЙДА ДВГН-01 В ЦЕНТРЕ ШАРА

Градуировка системы состоит в определении отношения ambientной дозы $H^*(10)$ к значению H_c показаний слайда, расположенного в центре шара. Это отношение в пределах погрешности должно совпадать со значением $0,67 \pm 0,10$, приведенным в [5].

Градуировка проводилась на поверочной установке по нейтронам Pu-Be-источника нейтронов. Измерения проводились с использованием экранирующего конуса — с конусом, расположенным между источником нейтронов и шаром, и без конуса. При этом выделены три условия облучения, характеризующиеся различными спектрами нейтронов в зависимости от условий облучения:

- 1) рассеянным в помещении излучением — при облучении за экранирующим конусом;
- 2) рассеянным и распространяющимся напрямую к шару от источника излучением — при облучении без конуса;
- 3) излучением, распространяющимся только напрямую от источника, — при вычитании из показаний при облучении без конуса показаний при облучении с конусом.



Рис. 4. Геометрия измерений на поверочной установке

Указанные условия облучения характеризуются спектрами нейтронов с различной жесткостью, то есть средней энергией нейтронов. В случае 1 спектр нейтронов наиболее мягкий, т. е. имеющий наименьшую среднюю энергию, так как он обусловлен только рассеянным в помещении излучением. В случае 2 он жестче, так как обусловлен как рассеянными, так и распространяющимися непосредственно от источника нейтронами. В случае 3 спектр наиболее жесткий и представляет собой непосредственно спектр самого источника.

Геометрия измерений на поверочной установке показана на рис. 4.

Измерения с конусом и без конуса проводились на расстояниях 70, 150 и 300 см. Расстояния 150 и 300 см выбирались, чтобы исключить геометрический фактор при облучении, который возникает при малых расстояниях, а также проверить воспроизводимость результатов измерений в разных условиях. Измерение показаний ДВГН-01, расположенных на шаре, и слайда в центре шара проводилось на считывателе СТЛ-301 комплекса АКЖДК-301 по принятой методике.

Амбиентный эквивалент дозы определялся на тех же расстояниях с помощью дозиметра ДКС-96 с нейтронным датчиком. При этом центр замедлителя прибора помещался в ту же точку, что и центр системы. Дозиметр ДКС-96 поверен во ВНИИФТРИ, и его основная погрешность не превышает 10%. Доза тепловых нейтронов определялась с помощью датчика ДВС-96 без замедлителя, который был предварительно проградуирован по этим нейтронам.

3.1. Градуировка ДКС-96 по тепловым нейтронам. Для определения дозы тепловых нейтронов используется датчик дозиметра без замедлителя, который проградуирован по тепловым нейтронам на поверочной установке. В качестве источника тепловых нейтронов использовался рабочий эталон — Pu–Be-источник, помещенный в полиэтиленовый шар диаметром 190 мм с цилиндрической полостью в центре диаметром 58,5 мм и высотой 123 мм [7]. Для определения вклада рассеянных тепловых нейтронов при градуировке использовался кадмиевый экран толщиной 1 мм и диаметром 21 см. Отношение потока тепловых нейтронов Φ к полному потоку Pu–Be-источника Ω принимается равным 0,11 с погрешностью 7% [7].

Градуировка по тепловым нейтронам проводилась на двух расстояниях следующим образом. Датчик прибора ДКС-96 располагался на приборном столике поверочной установке на расстоянии R от центра шарового источника нейтронов, расположенного на

держателе источника нейтронов поверочной установки. Плотность потока тепловых нейтронов Φ на расстоянии R определялась по формуле

$$\Phi = \frac{\Omega \cdot 0,11}{4\pi R^2}. \quad (2)$$

Так, на расстоянии 70 см плотность потока тепловых нейтронов составила $8,58 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Измерения включали четыре серии:

1. Измерения с кадмиевым экраном и кадмиевым колпачком на датчике прибора — определялся вклад в показания прибора от рассеянных надкадмиевых нейтронов (с энергией более 0,4 эВ) N_1 .

2. Измерения с кадмиевым экраном без кадмиевого колпачка на датчике — определялся вклад рассеянных тепловых нейтронов всего диапазона энергий N_2 .

3. Измерения без кадмиевого экрана с кадмиевым колпачком на датчике — определялся вклад в показания датчика прибора от всех тепловых нейтронов с энергией выше 0,4 эВ, испускаемых источником (рассеянных и прямых) N_3 .

4. Измерения без кадмиевого экрана и без кадмиевого колпачка — определялся вклад в показания от всех тепловых нейтронов, испускаемых источником N_4 .

Разница показаний прибора N_2-N_1 дает вклад в показания от рассеянных нейтронов с энергией ниже 0,4 эВ.

Разница показаний прибора N_4-N_3 дает вклад в показания от всех тепловых нейтронов, испускаемых источником.

Разница $(N_4-N_3)-(N_2-N_1)$ дает вклад в показания прибора, обусловленные тепловыми нейтронами с энергией менее 0,4 эВ, падающими непосредственно от источника на прибор («прямые» тепловые нейтроны), для которых рассчитывается плотность потока в месте расположения датчика.

Показания ДКС-96 определяются в единицах мкЗв/ч. Градуировочный коэффициент по тепловым нейтронам определяется как отношение плотности потока тепловых нейтронов к показаниям прибора и выражается в $(\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1})/(\text{мкЗв/ч})$.

Результаты градуировки датчика ДКС-96 по тепловым нейтронам представлены в табл. 1.

Среднее значение градуировочного коэффициента принято равным $0,27 \pm 0,03$ $(\text{см}^{-2} \times \text{с}^{-1})/(\text{мкЗв} \cdot \text{ч}^{-1})$. Погрешность градуировочного коэффициента складывается из погрешности поверки источника (5%), погрешности переходного коэффициента (7%) и разброса коэффициента по результатам измерений на двух расстояниях (7%). Результирующая погрешность, определенная как корень квадратный из составляющих, равна 11%.

Таблица 1. Результаты градуировки ДКС-96 по тепловым нейтронам

Расстояние R , см	Показания ДКС-96, мкЗв/ч					Φ , $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$K_{\text{гр}}$, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$K_{\text{гр}}$ среднее
	N_1	N_2	N_3	N_4	$(N_2-N_1)-$ (N_4-N_3)			
70	8,4	22,2	9,0	56,6	33,8	8,6	0,25	$0,27 \pm 0,03$
150	3,4	17,2	3,6	23,8	6,4	1,9	0,29	

3.2. Результаты измерения амбиентной дозы и отношения $H^*(10)/H_c$. Амбиентный эквивалент дозы в точках измерения определялся по результатам измерения мощности амбиентного эквивалента дозы прибором ДКС-96 с учетом вклада тепловых нейтронов, умноженного на время облучения слайда ДВГН-01 в центре шара.

Показание слайда ДВГН-01 в центре шара определялось путем размещения его в корпусе дозиметра и измерений по принятой для АКЖДК-301 методике.

Результаты измерений представлены в табл. 2. В ней приведены также результаты определения отношений показаний слайда в центре шара к усредненным показаниям ДВГН-01, облученных на поверхности шара H_c/H_s . Как будет показано ниже, эти отношения могут использоваться для определения амбиентной и эффективной доз.

Как видно из таблицы, значение отношения $H^*(10)/H_c$ не зависит от условий измерения и, как это отмечено в [5], и от спектра нейтронов. Среднее значение этого отношения, определенное как среднее арифметическое из представленных в табл. 2 значений, получено равным $0,59 \pm 0,07$ ($\pm 12\%$).

Погрешность отношения δ определена по формуле

$$\delta = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2}, \quad (3)$$

где δ_1 — погрешность поверки ДКС-96, равная 10%; δ_2 — предельная погрешность, равная максимальному значению относительного отклонения отношения от среднего значения, составляющего 7%.

Таким образом, определенное экспериментально значение отношения амбиентного эквивалента дозы к показанию слайда, расположенного в центре шара системы, в пределах погрешности его определения совпадает со значением, приведенным в [5]. Эти отношения различаются на 13%. Это означает, что предложенная в [5] методика определения поправочных коэффициентов для ДВГН-01 с помощью системы может использоваться в ОИЯИ с применением имеющегося комплекса АКЖДК-301. В настоящей работе система использовалась для определения поправочных коэффициентов для ДВГН-01 в полях излучения за защитой фазотрона ОИЯИ.

Следует отметить, что данная методика имеет ограничения при использовании в жестких спектрах на ускорителях с заметным вкладом в дозу от нейтронов с энергией выше 20 МэВ, так как чувствительность детекторов на поверхности шара и в центре шара значительно падает при энергии более 20 МэВ. Поэтому определение поправочных коэффициентов по формуле (1) для таких спектров может привести к занижению их значений. Это иллюстрирует рис. 5 из [5], на котором представлены значения поправочных коэффициентов для ускорительных спектров, где присутствуют нейтроны с энергией выше 20 МэВ.

Таблица 2. Результаты определения отношения $H^*(10)/H_c$

$R, \text{ см}$	Без конуса				С конусом				Разница (без конуса – с конусом)			
	H^*	H_c	H^*/H_c	H_c/H_s	H^*	H_c	H^*/H_c	H_c/H_s	H^*	H_c	H^*/H_c	H_c/H_s
70	2,9	4,9	0,59	4,2	0,3	0,5	0,60	1,6	2,6	4,4	0,59	5,6
150	0,8	1,4	0,57	3,4	0,7	1,2	0,58	1,3	1,9	3,3	0,58	6,6
300	—	—	—	—	0,5	0,8	0,63	—	—	—	—	—

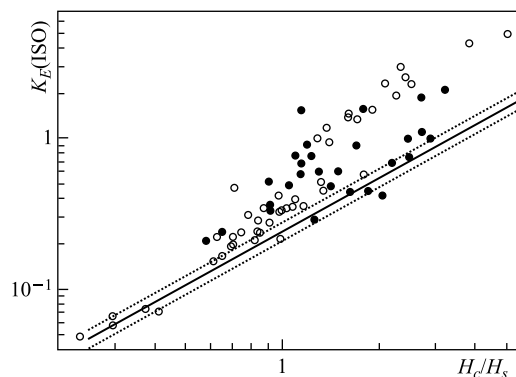


Рис. 5. Значения поправочных коэффициентов для ускорительных спектров

Из рисунка следует, что если оценивать поправочные коэффициенты по линейной зависимости и формуле (1), то для жестких ускорительных спектров даже при том же отношении H_c/H_s , что и для мягких спектров, ошибка может достигать нескольких раз. Поэтому при применении данной методики на ускорителях необходимо быть уверенным в том, что измерения проводятся в достаточно низкоэнергетических полях со спектрами, в которых сверхбыстрые нейтроны не дают заметного вклада. В противном случае в ускорительных спектрах данная методика будет давать лишь нижний порог значений поправочных коэффициентов. Корректное определение поправочных коэффициентов с помощью данной методики возможно с использованием наряду с ней детекторов, которые регистрируют нейтроны с энергией выше 20 МэВ, например, трековых детекторов типа CR-39.

4. КОРРЕКЦИЯ ПОКАЗАНИЙ ДВГН-01 В ПОЛЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ФАЗОТРОНА С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ

4.1. Точки измерения на фазотроне. Измерения на фазотроне ЛЯП проводились в кабине № 1 и в зале медико-технического комплекса, в лаборатории № 4, в пристройке № 2, в мягком опорном поле и на обваловке здания фазотрона. Ниже описаны точки измерения и условия, при которых измерения проводились.

За исключением мягкого опорного поля и обваловки точки измерения располагались вблизи датчиков системы дозиметрического контроля фазотрона (СДКФ), по которым проводилось мониторингирование облучения. Датчик СДКФ представляет собой комбинированный замедлитель с расположенным по его оси счетчиком СММ-14 [8]. Поэтому в настоящей работе этим точкам измерения присвоены номера датчиков СДКФ, вблизи которых они расположены. План размещения датчиков СДКФ на фазотроне и, соответственно, точек измерения представлен на рис. 6. Во всех точках измерения шар располагался на расстоянии 1–1,5 м от датчиков СДКФ для исключения их взаимного влияния и на высоте около 1,5 м. Точки измерения на фазотроне показаны на рис. 6 стрелками.

При проведении измерений протоны ускорялись в камере фазотрона до энергии 660 МэВ. После этого они замедлялись в углеродном замедлителе, расположенном в зале

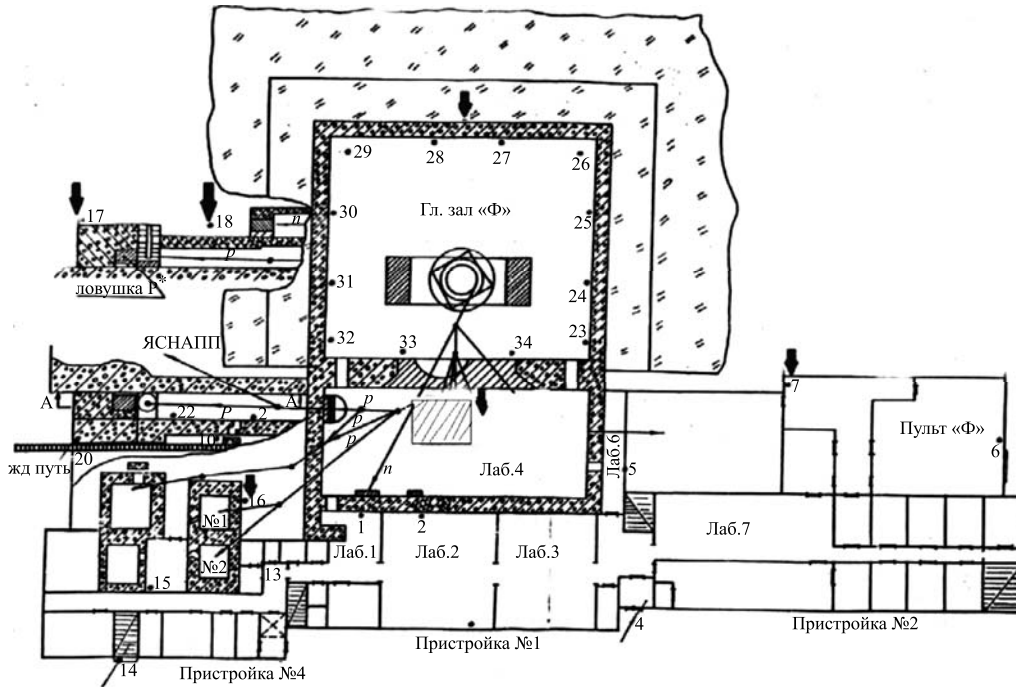


Рис. 6. План размещения датчиков СДКФ на фазотроне ЛЯП

ускорителя, до энергии 170 МэВ и выводились в кабину № 1 медико-технического комплекса. Только при измерениях в лаборатории № 4 условия вывода и энергия протонного пучка были другими, они описаны ниже в п. 4.1.3.

4.1.1. Кабина № 2 клиничко-физического комплекса. Схема кабины № 1 клиничко-физического комплекса представлена на рис. 7. Протоны с энергией 170 МэВ выводились в кабину № 1 и падали на плексигласовый замедлитель РС, расположенный в центре кабины в месте, в котором находится пациент при его облучении. Точка 1 располагалась на расстоянии 0,5 м от центра замедлителя под углом 90° влево относительно направления пучка протонов. Точка 2 находилась на расстоянии 2 м от замедлителя в том же направлении около стены кабины. На рис. 7 они обозначены цифрами 1 и 2. При облучении пациента персонал находится в кабине не может. Нейтронное излучение в кабине возникает при взаимодействии протонов с замедлителем и проходит из зала комплекса через отверстие в стене кабины, в котором расположен коллиматор.

4.1.2. Зал медико-технического комплекса. В зале медико-технического комплекса измерения проводились в точках 16, 17 и 18 при выводе пучка протонов с энергией 170 МэВ в кабину № 1. Ней-

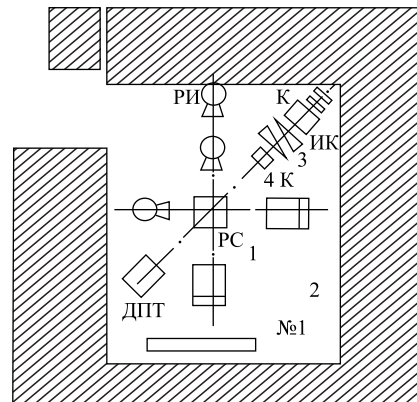


Рис. 7. План кабины медико-технического комплекса

тронное излучение в этих точках возникает как при взаимодействии протонов с магнитом и линзами при транспортировке протонов в кабину № 1, так и при прохождении нейтронов из зала ускорителя через его боковую и верхнюю защиты. Пребывание персонала в зале медико-технического комплекса при выводе протонов в кабины невозможно.

4.1.3. Лаборатория № 4. Точка измерения в лаборатории № 4 находилась справа от защиты, расположенной за поворотным магнитом, при выводе из зала ускорителя пучка протонов с энергией 25 МэВ. Нейтронное излучение в этой точке возникает при взаимодействии протонов с ловушкой, на которую они падают, а также при прохождении нейтронов из зала ускорителя через боковую защиту зала. Пребывание персонала в лаборатории № 4 при работе фазотрона запрещено.

4.1.4. Пристройка № 2. В пристройке № 2 точка измерений 7 находилась в районе пульта управления фазотрона. В этой точке может находиться персонал при работе фазотрона. Нейтронное излучение в этой точке обусловлено прохождением его через боковую защиту из зала ускорителя и лаборатории № 4.

4.1.5. Мягкое опорное поле фазотрона. Мягкое опорное поле фазотрона расположено в цокольном этаже фазотрона в начале туннеля, ведущего в корпус № 2 [9]. Источником нейтронного излучения в этом поле служит вторичное излучение из камеры и конструктивных элементов ускорителя. Мягкое опорное поле находится в лабиринте туннеля под ускорителем и отделено от него боковой и потолочной защитой из тяжелого бетона толщиной 2 и 1 м соответственно. Многократно рассеянные в зале ускорителя нейтроны попадают в лабиринт через два проема в защите. Вследствие этого средняя энергия спектра в данном поле равна 0,25 МэВ, т. е. спектр в этом поле является наиболее мягким из всех рассмотренных в работе точек.

4.1.6. Обваловка здания ускорителя. Точка измерений 1 расположена на обваловке ускорителя вплотную к северной стене здания фазотрона. Нейтронное излучение в этой точке формируется нейтронами утечки из сплошной бетонной двухметровой защиты фазотрона. На эту защиту падает вторичное излучение из камеры ускорителя.

Выбор точек измерения на фазотроне обусловлен несколькими критериями. Во-первых, они должны быть доступны для проведения измерений в течение длительного времени вследствие низких уровней излучения за защитой фазотрона. Так, в точке 7 облучение проводилось в течение 16 сут, в точке 17 — в течение 24 сут. Во-вторых, спектры нейтронов в точках измерения должны быть достаточно низкоэнергетичными, т. е. в них должны отсутствовать нейтроны с энергией выше 20 МэВ. В-третьих, измерения желательно проводить в местах возможного пребывания персонала либо в тех полях, в которых спектры нейтронов наиболее близки к спектрам в местах пребывания персонала.

В данной работе точками, в которых возможно пребывание персонала или которые по характеристикам поля нейтронов близки к таким точкам, являются точки 7, 17, 18 и мягкое опорное поле. При этом в точке 7 может непосредственно находиться персонал. Необходимо отметить, что спектр нейтронов в точке 7 по результатам отношения H_c/H_s является наиболее жестким наряду со спектрами в точках измерения к кабине № 1. Это объясняется тем, что нейтроны приходят в точку 7 через сплошную бетонную защиту практически без проемов. В кабине № 1 поле нейтронов образуется как при взаимодействии протонов с замедлителем, так и при проникновении нейтронов из зала комплекса через проем в защите кабины. Основная проблема при измерении в этих точках — низкие уровни излучения, что требует длительного облучения системы. Другая проблема —

довольно жесткие спектры нейтронов, в которых данная методика может давать лишь нижнюю границу значений поправочных коэффициентов.

Полями нейтронов с наиболее мягкими спектрами в настоящей работе являются мягкое опорное поле, поле в лаборатории № 4 и в точках № 17 и 18. В лаборатории № 4 это обусловлено низкой энергией протонов, падающих на защиту, а в точках 17 и 18 тем, что значительный вклад в спектры в них вносят многократно рассеянные нейтроны, что уменьшает среднюю энергию спектра.

В целом, выбранные в настоящей работе точки измерения на фазотроне удовлетворяют всем перечисленным выше требованиям и являются достаточно представительными для определения значений поправочных коэффициентов для коррекции показаний ДВГН-01.

4.2. Результаты измерений. Результаты измерений в перечисленных выше точках представлены в табл. 3. Кроме того, в таблице приведены результаты измерений с системой при ее градуировке на поверочной установке по Pu–Be-источнику нейтронов на расстоянии 150 см от источника с конусом и без конуса.

В таблице представлены следующие величины.

Во второй колонке приведено максимальное значение показаний ДВГН-01 на шаре.

В третьей колонке показано усредненное значение показаний шести дозиметров ДВГН-01, расположенных на замедлителе, в четвертой — показание слайда в центре шара системы, в пятой — отношение этих показаний.

В шестой колонке показано значение поправочного коэффициента для определения значения эффективной дозы по показаниям ДВГН-01 при изотропном облучении, найденное по формуле (1).

В седьмой колонке даны значения коэффициента, аналогичного коэффициенту изотропности излучения, который определяется по формуле

$$K_{\text{из}} = (A + B)/A, \quad (4)$$

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 излучения нейтронов с энергией меньше 20 МэВ для определения дозы облучения дозиметра, зарегистрировавшего максимальное значение показаний.

В восьмой колонке приведены значения амбиентного эквивалента дозы, определенные по показаниям H_c слайда, расположенного в центре шара по формуле

$$H^*(10) = H_c \cdot 0,59. \quad (5)$$

В девятой колонке представлены результаты определения доз облучения дозиметров $H_{\text{обл}}$:

$$H_{\text{обл}} = H^*(10)/K_{\text{из}}. \quad (6)$$

Величина $H_{\text{обл}}$ рассчитывается для нахождения значений поправочных коэффициентов $K_H(AP)$ к показаниям ДВГН-01 в передне-задней (ПЗ) геометрии облучения для индивидуального эквивалента дозы, т. е. когда излучение падает нормально на фантом. 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 $K_H(AP)$ приведены в колонке 10. Они определяются по формуле

$$K_H(ПЗ) = H_{\text{max}}/H_{\text{обл}}. \quad (7)$$

Таблица 3

Место измерений	H_{\max} , мЗв	H_s , мЗв	H_c , мЗв	H_c/H_s	$K_E(ISO) =$ $0,235 (H_c/H_s)^{1,18}$	$K_{НЗ} =$ $(A+B)/A$	$H^*(10)$, мЗв	$H_{\text{обл}} =$ $H^*(10)/K_{НЗ}$	$K_H(ПЗ) =$ $H_{\max}/H_{\text{обл}}$
Кабина №1 0,5 м от зам. слева	9,3	4,8	12,9	2,69	0,76	1,23	7,5	6,10	0,66
Кабина №1 2 м от зам. стеллаж	4,2	3,5	4,5	1,28	0,31	1,74	2,6	1,49	0,35
Фазотрон, лаб. №4	16,1	10,2	7,0	0,69	0,15	1,47	4,1	2,83	0,17
Пристройка №2, т. 7 СДКФ	0,3	0,19	0,39	2,02	0,55	1,27	0,22	0,17	0,57
Мягкое опорное поле	773	416	115	0,28	0,05	1,16	66,7	57,5	0,07
Фазотрон, т. 1 на обваловке	0,56	0,42	0,60	1,43	0,36	1,60	0,35	0,22	0,39 (по 20 мЗв)
Зал МТК, т. 16 СДКФ	1,10	0,82	1,15	1,40	0,35	1,47	0,67	0,45	0,41
Зал МТК, т. 17 СДКФ	0,40	0,38	0,30	0,79	0,18	1,90	0,18	0,09	0,23
Зал МТК, т. 18 СДКФ	3,31	2,36	1,38	0,58	0,12	1,46	0,80	0,55	0,17
Источник нейтронов Pu-Be с конусом на $R = 150$ см	1,18	0,91	1,18	1,29	0,32	1,50	0,67 (по ДКС-96)	0,45	0,38
Источник нейтронов Pu-Be без конуса на $R = 150$ см	0,63	0,42	1,41	3,38	0,99	1,35	0,80 (по ДКС-96)	0,59	0,95

На основании представленных в табл. 3 результатов можно сделать следующие выводы.

1. В соответствии с условиями формирования полей нейтронов на фазотроне и на поверочной установке с Pu–Be-источником, а также с полученными значениями отношения H_c/H_s можно условно разделить поля нейтронов по степени жесткости спектров (средней энергии нейтронов) на следующие:

— мягкие (низкоэнергетические) спектры, характеризующиеся отношением H_c/H_s меньше единицы — это спектр в мягком опорном поле;

— жесткие спектры нейтронов, для которых отношение H_c/H_s больше двух: в кабине № 1 на расстоянии 0,5 м от замедлителя, в точке 7 пристройки № 2 и от Pu–Be на поверочной установке без конуса;

— промежуточные (близкие к низкоэнергетическим) спектры с отношением H_c/H_s около единицы: в кабине № 1 на расстоянии 2 м от замедлителя, в точке № 1 на обваловке фазотрона, в лаборатории № 4, в точках № 16, 17 и 18 в зале клинко-физического комплекса и от Pu–Be на поверочной установке с конусом.

Необходимо отметить, что жесткость спектров характеризуется не только наличием нейтронов с энергией выше 20 МэВ. Так, в спектре Pu–Be отсутствуют нейтроны такой энергии, однако значение отношения H_c/H_s составляет 3,4.

2. Достигнутые результаты в целом удовлетворительно согласуются со значениями поправочных коэффициентов, полученными для ускорительных спектров другими методами — расчетами по спектрам и сравнением с чувствительностями альбедных дозиметров других типов.

Так, для мягких спектров поправочные коэффициенты не превышают значений 0,10–0,12.

Для жестких спектров на фазотроне значения поправочных коэффициентов могут находиться в диапазоне от 0,5 до 1,0, для эффективной дозы в изотропной геометрии они могут превышать единицу. Полученные в настоящей работе результаты характеризуют, возможно, нижний порог значений возможных значений из-за отмеченной выше ограниченности данной методики для жестких ускорительных спектров. Необходимо отметить, что спектры, использованные в [2] для расчета поправочных коэффициентов, являются более жесткими, чем спектры, в которых проводились измерения в настоящей работе. Это связано с условиями формирования полей нейтронов. Так, спектры нейтронов в [2] в значительной степени были обусловлены излучением от мишени, расположенной в зале ускорителя.

Поправочные коэффициенты для промежуточных спектров находятся в диапазоне от 0,13 до 0,40, что хорошо согласуется с результатами, полученными для ускорительных спектров другими методами.

Поправочные коэффициенты для Pu–Be-источника нейтронов, по которому проводится проверка альбедных дозиметров, должны иметь значения, близкие к единице, с чем хорошо согласуются полученные результаты.

5. ВЫВОДЫ

На основании представленных в работе результатов и их анализа можно сделать следующие выводы:

1. Проведена градуировка шаровой альбедной системы на поверочной установке в полях с различными спектрами нейтронов. Показано постоянство градуировочного ко-

эфициента для различных спектров нейтронов Pu–Be на поверочной установке при его среднем значении $0,59 \pm 0,12$ и возможность использования системы для коррекции показаний альбедных дозиметров.

2. Выполнена градуировка детектора дозиметра ДКС-96 по тепловым нейтронам, и определен вклад тепловых нейтронов в амбиентный эквивалент дозы на поверочной установке при градуировке системы.

3. Проведены измерения с системой в полях излучения фазотрона ЛЯП ОИЯИ, и определены поправочные коэффициенты для коррекции показаний альбедных дозиметров. Погрешность определения поправочных коэффициентов не превышает 20 %.

4. Полученные значения поправочных коэффициентов удовлетворительно согласуются со значениями таких коэффициентов на ускорителях заряженных частиц, полученных другими методами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате настоящей работы в практику внедрена более простая по сравнению применявшиеся ранее способами методика коррекции показаний альбедных дозиметров с помощью шаровой альбедной системы.

Определены поправочные коэффициенты для коррекции показаний альбедных дозиметров при их использовании на фазотроне ОИЯИ. Применение результатов настоящей работы повышает достоверность используемых на практике поправочных коэффициентов при коррекции показаний индивидуальных дозиметров, используемых на фазотроне ОИЯИ.

Авторы выражают благодарность старшему научному сотруднику Лаборатории ядерных проблем А. Г. Молоканову за помощь в проведении измерений на фазотроне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Санников А. В. и др. Препринт ИФВЭ 2005-6. Протвино, 2005.
2. 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.
3. Косьяненко Е. В. и др. Препринт ИФВЭ 2008-22 ОРИ. Протвино, 2008.
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. Санников А. В. и др. Препринт ИФВЭ 2008-1 ОРИ. Протвино, 2008.
6. Mares V., Schraube H. Evaluation of the Response Matrix of a Bonner Sphere // Nucl. Instr. Meth. A. 1994. V. 337. P. 461–473.
7. ГОСТ 8.355-79. Радиометры нейтронов. Методы и средства поверки. М.: Изд-во стандартов, 1979.
8. Алейников В. Е., Бескровная Л. Г., Мокров Ю. В. Сообщение ОИЯИ Р16-2008-46. Дубна, 2008. 20 с.
9. Алейников В. Е. и др. // ПТЭ. 1993. № 3. С. 197.

Получено 17 июня 2013 г.