

Ю. В. Мокров^{1,2,*}, А. Г. Молоканов¹, С. В. Морозова¹,
Г. Н. Тимошенко^{1,2}, В. А. Крылов¹

**КОРРЕКЦИЯ ПОКАЗАНИЙ АЛЬБЕДНОГО ДОЗИМЕТРА
НЕЙТРОНОВ ДВГН-01 В КАБИНЕ МЕДИЦИНСКОГО
ПУЧКА РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ**

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

² Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

* E-mail: mokrov@jinr.ru

Мокров Ю. В. и др.

P16-2018-36

Коррекция показаний альбедного дозиметра нейтронов ДВГН-01 в кабине медицинского пучка различными методами

Представлены результаты коррекции показаний альбедных дозиметров ДВГН-01 в кабине медицинского пучка фазотрона различными методами. Пучок протонов с энергией 170 МэВ тормозился в тканеэквивалентном фантоме, помещенном в кресло пациента. С помощью многосферового спектрометра был измерен спектр нейтронов вблизи кресла, а также выполнены измерения с шаровой альбедной системой в месте измерения спектра нейтронов и около стены кабины. На основе спектра нейтронов и по показаниям шаровой альбедной системы были рассчитаны поправочные коэффициенты для ДВГН-01 в двух геометриях — передне-задней для индивидуального эквивалента дозы и изотропной для эффективной дозы нейтронов. Рекомендованы значения поправочных коэффициентов для использования в индивидуальном дозиметрическом контроле лиц, сопровождающих пациентов в кабине медицинского пучка.

Работа выполнена в Лаборатории радиационной биологии ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2018

Mokrov Yu. V. et al.

P16-2018-36

The Correction of Albedo Dosimeter DVGН-01 Readings in Medical Beam Cabin by Various Methods

The paper presents the results of correction of albedo dosimeters DVGН-01 readings in the medical beam cabin at the LNP phasotron by various methods. A beam of 170 MeV protons was stopped in a tissue-equivalent phantom placed in the patient's chair. Using a multisphere spectrometer, the neutron spectrum was measured near the chair, and measurements were made with the spherical albedo system at the place of the neutron spectrum measurement and near the cabin wall. Based on the neutron spectrum and the spherical albedo system readings, correction coefficients were calculated for DVGН-01 in two geometries — isotropic and antero-posterior for the individual dose equivalent and effective dose of neutrons. Recommended values of correction coefficients for use in individual dosimetric control of persons accompanying patients in the cabin of a medical beam are presented.

The investigation has been performed at the Laboratory of Radiation Biology, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2018

ВВЕДЕНИЕ

У персонала, работающего в полях ионизирующего излучения на таких ядерно-физических установках (ЯФУ), как ускорители и реакторы, проводится индивидуальный дозиметрический контроль (ИДК) с целью определения степени радиационного риска при профессиональном облучении и его снижения. ИДК осуществляется с помощью индивидуальных дозиметров, которые носятся на теле персонала в нагрудном кармане спецодежды. По данным ИДК определяются дозы облучения, полученные конкретным работником.

Одним из видов ИДК является контроль по нейтронному излучению, который проводится с помощью альбедных дозиметров ДВГН-01 комплексов АКИДК-301 и 302 [1, 2]. Однако наряду с несомненными достоинствами указанные дозиметры имеют тот недостаток, что их энергетическая зависимость чувствительности (ЭЗЧ) существенно отличается от требуемой для индивидуальных дозиметров нейтронов [3]. Вследствие этого показания альбедных дозиметров существенно зависят от энергетического спектра поля нейтронов, в котором проводятся измерения с такими дозиметрами. Это вызывает необходимость в определении и использовании поправочных коэффициентов к показаниям дозиметров в зависимости от условий их эксплуатации в полях нейтронов на ЯФУ. Данной задаче был посвящен ряд работ, выполненных в ОИЯИ в последние годы на различных установках [4–6].

Целью настоящей работы является определение поправочных коэффициентов к показаниям дозиметра ДВГН-01 различными методами при его использовании в кабине медицинского пучка фазотрона ЛЯП.

1. МЕТОДЫ КОРРЕКЦИИ ПОКАЗАНИЙ АЛЬБЕДНЫХ ДОЗИМЕТРОВ

В настоящее время для определения поправочных коэффициентов используются два основных метода: расчетный метод с использованием спектров нейтронов и экспериментальный с применением шаровой альбедной системы.

1.1. Расчетный метод по известным спектрам нейтронов. Данный метод коррекции показаний основан на расчете поправочных коэффициентов с использованием спектров нейтронов и ЭЗЧ альбедного дозиметра [3]. Для известного спектра нейтронов $\Phi(E)$ поправочный коэффициент для определения индивидуального эквивалента дозы на глубине ткани 10 мм направленного облучения в передне-задней геометрии $k_n(\text{ПЗ})$ представляет собой отношение

рассчитанного индивидуального эквивалента дозы $H_p(10,0^\circ)$ к рассчитанному по показаниям ДВГН-01 значению дозы $H_{\text{ДВГН}}(\text{ПЗ})$. Он определяется по формуле

$$k_n(\text{ПЗ}) = \frac{H_p(10,0^\circ)}{H_{\text{ДВГН}}(\text{ПЗ})} = \frac{\int h_p(10,0^\circ)(E)\Phi(E) dE}{k_{\text{ГР}} \cdot \int R_{\text{ПЗ}}(E)\Phi(E) dE}, \quad (1)$$

где $R_{\text{ПЗ}}(E)$ — ЭЗЧ ДВГН-01 к нейтронам при направленном облучении тканеэквивалентного эллиптического цилиндра (ПЗ-геометрия) как наиболее близкого к торсу человека; $k_{\text{ГР}}$ — градуировочный коэффициент в мЗв/имп., полученный для условий направленного облучения дозиметра на плоском водном фантоме в поле градуировочного источника со спектром нейтронов $\Phi_{\text{ГР}}(E)$ как отношение рассчитанной дозы облучения при градуировке $H^{\text{ГР}}(10,0^\circ)$ к показаниям ДВГН-01 $N_{\text{ДВГН}}^{\text{ГР}}$ при градуировке на плоском водном фантоме:

$$k_{\text{ГР}} = \frac{H_p^{\text{ГР}}(10,0^\circ)}{N_{\text{ДВГН}}^{\text{ГР}}} = \frac{\int h_p(10,0^\circ)(E)\Phi_{\text{ГР}}(E) dE}{\int R_{\text{ПЗ}}^{\text{ГР}}(E)\Phi_{\text{ГР}}(E) dE}, \quad (2)$$

где $R_{\text{ПЗ}}^{\text{ГР}}$ — ЭЗЧ ДВГН-01 для индивидуального эквивалента дозы в ПЗ-геометрии для водного фантома, используемого при градуировке, см⁻².

Расчет поправочных коэффициентов для эффективной дозы E — $k_E(\text{ПЗ})$ и $k_E(\text{ИЗО})$ — в передне-задней и изотропной геометрии проводится по аналогичным формулам:

$$\left\{ \begin{array}{l} k_E(\text{ПЗ}) = \frac{E(\text{ПЗ})}{H_{\text{ДВГН}}(\text{ПЗ})} = \frac{\int e_{\text{ПЗ}}(E)\Phi(E) dE}{k_{\text{ГР}} \cdot \int R_{\text{ПЗ}}(E)\Phi(E) dE} \\ k_E(\text{ИЗО}) = \frac{E(\text{ИЗО})}{H_{\text{ДВГН}}(\text{ИЗО})} = \frac{\int e_{\text{ИЗО}}(E)\Phi(E) dE}{k_{\text{ГР}} \cdot \int R_{\text{ИЗО}}(E)\Phi(E) dE} \end{array} \right., \quad (3)$$

где $R_{\text{ПЗ}}(E)$ и $R_{\text{ИЗО}}(E)$ — функции чувствительности ДВГН-01 передне-задней и изотропной геометрий при облучении на эллиптическом фантоме; $e_{\text{ПЗ}}$ и $e_{\text{ИЗО}}$ — эффективная доза нейтронов на единичный флюенс (удельная доза) в передне-задней и изотропной геометриях из [7].

Указанные поправочные коэффициенты могут использоваться для оценки эффективных доз облучения персонала в изотропной и передне-задней геометриях по показаниям альбедного дозиметра в мЗв, определенных с использованием градуировочного коэффициента $k_{\text{ГР}}$. Возможность оценки эффективной дозы, как сказано выше, обусловлена наличием зависимости удельной эффективной дозы от энергии и ЭЗЧ дозиметра в этих геометриях.

1.2. Использование шаровой альбедной системы. Другим и наиболее простым методом коррекции является метод с использованием шаровой альбедной системы [8]. Шаровая альбедная система (далее — система) состоит из полиэтиленового шара диаметром 25,4 см (10 дюймов), на поверхности которого располагаются симметрично относительно центра шесть дозиметров ДВГН-01. В центре шара находится слайд ДВГН-01, который размещается в шаре 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 различные условия облучения ДВГН-01 на фантоме (теле человека) — изотропного, направленного и др. Это обосновано тем, что ЭЗЧ ДВГН-01 на поверхности шара и на эллиптическом тканеэквивалентном фантоме, наиболее близком к телу человека, различаются незначительно.

Слайд ДВГН-01 в центре шара предназначен для оценки эффективной дозы нейтронов при изотропном облучении и амбиентного эквивалента дозы при передне-задней геометрии облучения. 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. При использовании системы для коррекции показаний ДВГН-01 со значениями этого параметра для различных полей нейтронов однозначно связаны значения поправочных коэффициентов $k_E(\text{ИЗО})$. В работе [8] для 120 низкоэнергетических спектров были рассчитаны поправочные коэффициенты $k_E(\text{ИЗО})$. Для этих же спектров в ней были рассчитаны также значения отношений H_c/H_s . Зависимость поправочных коэффициентов $k_E(\text{ИЗО})$ от отношения H_c/H_s показана на рис. 2. Коридор неопределенности составляет $\pm 15\%$. Здесь же показаны результаты экспериментально определенных в [8] коэффициентов $k_E(\text{ИЗО})$ в зависимости от отношения H_c/H_s для различных источников нейтронов по (α, n) -реакции и делящихся материалов.

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

$$k_E(\text{ИЗО}) = 0,235 \cdot (H_c/H_s)^{1,18}. \quad (4)$$

Эта зависимость представлена на рис. 2.

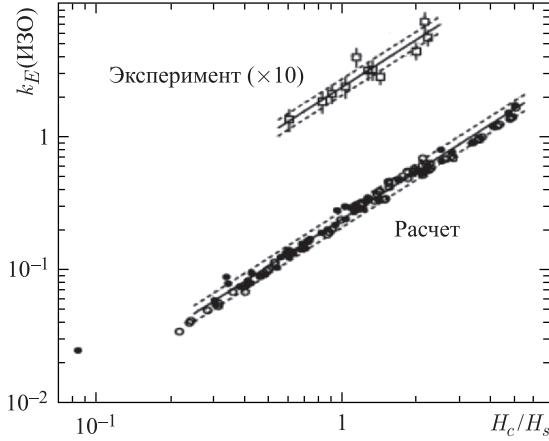


Рис. 2. Зависимость $k_E(\text{ИЗО})$ от параметра жесткости низкоэнергетических спектров H_c/H_s

Для 26 спектров за защитой ЯФУ ОИЯИ, взятых из литературы, были рассчитаны [5] основные характеристики системы: поправочные коэффициенты $k_E(\text{ИЗО})$, $k_H(\text{ПЗ})$, показания дозиметров H_c и H_s , характеризующие жесткость спектров. Зависимость значений поправочных коэффициентов от отношения H_c/H_s для низкоэнергетических спектров ОИЯИ аппроксимирована следующими формулами:

$$k_E(\text{ИЗО}) = 0,297 \cdot (H_c/H_s)^{1,264}, \quad (5)$$

$$k_H(\text{ПЗ}) = 0,221 \cdot (H_c/H_s)^{1,071}. \quad (6)$$

Указанные зависимости представлены на рис. 3 и 4.

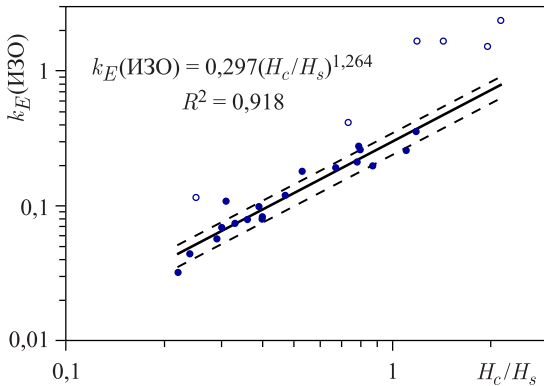


Рис. 3. Зависимость поправочного коэффициента $k_E(\text{ИЗО})$ от отношения H_c/H_s

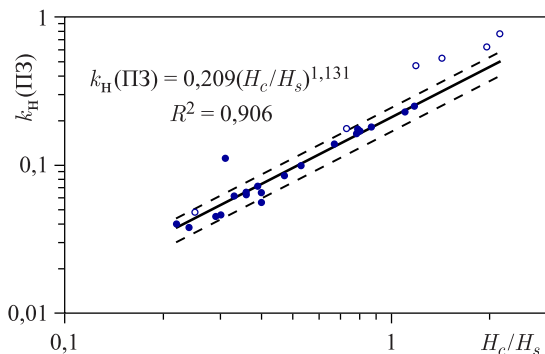


Рис. 4. Зависимость поправочного коэффициента $k_H(\text{ПЗ})$ от отношения H_c/H_s

В настоящей работе использованы оба метода определения поправочных коэффициентов для двух точек в кабине № 1 медицинского пучка фазотрона: расчетный по измеренному спектру нейтронов и с помощью шаровой альбедной системы.

2. КОРРЕКЦИЯ ПОКАЗАНИЙ ДВГН-01 В КАБИНЕ МЕДИЦИНСКОГО ПУЧКА ФАЗОТРОНА

2.1. Проведение измерений в кабине медицинского пучка. Процедура кабин № 1 медицинского пучка для протонной терапии онкологических опухолей медико-технического комплекса ЛЯП представляет собой небольшое помещение площадью $\sim 17 \text{ м}^2$, в которое выводится пучок протонов с энергией до 200 МэВ. Основная специализация кабин № 1 — лечение новообразований головного мозга, опухолей головы и шеи. При проведении протонной терапии пациент фиксируется в специальном терапевтическом кресле в положении сидя. Пучок протонов формируется системой коллиматоров, в том числе с помощью индивидуально изготавливаемого коллиматора из сплава Вуда, а для придания конформности дозного распределения протонного пучка по глубине и форме мишени рассчитываются и затем изготавливаются так называемые болюсы — замедлители сложной формы, учитывающие гетерогенную структуру тканей и органов пациента, расположенных на пути пучка. Мониторинг пучка протонов и измерение поглощенной дозы, отпускаемой пациенту в течение сеанса, осуществляется с помощью мониторинговой ионизационной камеры, расположенной на входе пучка протонов в кабину.

В процессе лечения пациент подвергается не только локальному облучению протонами опухоли и соседствующих с ней тканей, но и облучению всего тела вторичными нейтронами, возникающими при взаимодействии протонов пучка с коллиматорами, болюсами и человеческими тканями. Из-за малого размера кабин с бетонными стенами и потолком внутри нее форми-

руется также смешанное рассеянное поле альбедных (отраженных) нейтронов и гамма-квантов, образующихся в результате захвата ядрами вещества тепловых нейтронов. Оценка дозы нейтронного излучения в кабине необходима не только с точки зрения уточнения дозы, получаемой пациентом в ходе лечения, но также для рассмотрения вопроса о возможности нахождения в кабине вместе с малолетним ребенком родителя в процессе кратковременного сеанса облучения опухоли.

В настоящей работе представлены результаты измерения спектра вторичных нейтронов и эффективной дозы внутри кабины при проведении терапевтического сеанса. В кабину выводился пучок протонов с энергией 170 МэВ. Вместо пациента в терапевтическом кресле устанавливался тканеэквивалентный фантом размерами 30 × 40 см и толщиной по пучку протонов 20 см, соответствующий торсу среднего человека. Спектр нейтронов, испускаемых из фантома, измерялся с помощью многосферного спектрометра на основе детектора медленных нейтронов LiI(Eu) с набором гомогенных полиэтиленовых шаров (замедлителей) диаметром 2, 3, 5, 7, 8, 10 и 12 дюймов. Спектрометр размещался на высоте пучка (1,5 м) под углом 90° вправо к его направлению на расстоянии 1 м от центра фантома. Общий план эксперимента в терапевтической кабине № 1 показан на рис. 5.

Мониторирование пучка протонов в ходе измерения спектра нейтронов осуществлялось мониторинговой ионизационной камерой.



Рис. 5. План кабинного медико-технического комплекса и расположения приборов

Точка 1 с шаровым замедлителем альбедной системы располагалась на расстоянии 1 м от центра замедлителя под углом 90° влево относительно направления пучка протонов, т.е. симметрично спектрометру нейтронов в точке 3. Условия измерений и рассеяния нейтронов таковы, что можно предположить одинаковость спектра нейтронов в точках 1 и 3. Точка 2 находилась на расстоянии 2 м от замедлителя в том же направлении около стены кабины.

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

$$N_i = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \Phi(E) \cdot R_i(E) dE.$$

Здесь E_{\max} , E_{\min} — границы энергетического спектра $\Phi(E)$, $R_i(E)$ — функция чувствительности спектрометра с замедлителем i -го диаметра (имп. $\cdot \text{см}^2 \times \text{нейтрон}^{-1} \cdot \text{МэВ}$), N_i — показания спектрометра (скорость счета, имп. $\cdot \text{с}^{-1}$). При восстановлении спектров использовалась априорная информация в виде требования гладкости искомого спектра $\Phi(E)$ и ограничение спектра сверху энергией 170 МэВ.

2.2. Результаты измерений и расчетов. На рис. 6 показан восстановленный спектр нейтронов в точке 3. Средняя энергия спектра равна 2,1 МэВ.

Результаты измерений с шаровой альбедной системой и расчеты по измеренному спектру нейтронов значений поправочных коэффициентов показаны в таблице. В ней представлены усредненные значения показаний ДВГН-01 на

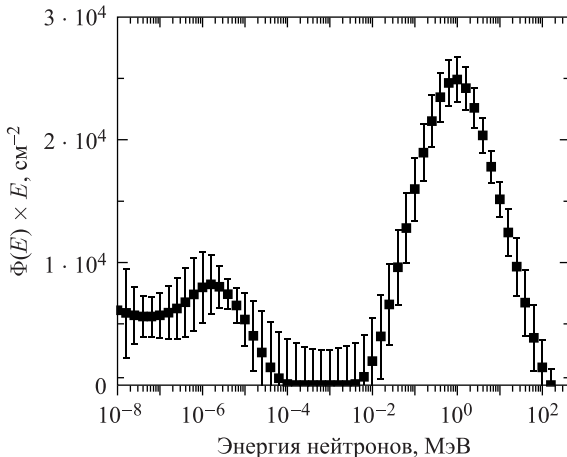


Рис. 6. Спектр нейтронов в точке 3

Результаты измерений с шаровой альбедной системой и расчетов по спектру

Место измерений	Средняя энергия спектра, МэВ	H_s , МЗВ	H_c , МЗВ	H_c/H_s	Коэфф. изотропности $k_{из}$	$k_E(ИЗО)$		$k_n(ПЗ)$	
						Расчет по формуле	Расчет по спектру	Расчет по спектру	Расчет по формуле
Точка 1	2,1	0,86	1,43	1,66	1,52	0,56	1,04	0,39	0,37
Точка 2	—	0,54	0,59	1,09	1,82	0,33	—	—	0,23

поверхности шара H_s , показания слайда дозиметра H_c в центре шара, отношения этих показаний H_c/H_s , значение коэффициента изотропности $k_{из}$, равное отношению суммы показаний максимального значения A и значения на противоположной стороне шара B к максимальному значению, т. е. $k_{из} = (A + B)/A$, результаты расчетов поправочных коэффициентов по шаровой альбедной системе по формулам (5) и (6) и расчет по спектру для точки 1.

2.3. Анализ полученных результатов. На основании представленных в таблице данных можно сказать следующее.

1. В точке 1 средняя энергия спектра равна 2,1 МэВ, что говорит о жесткости спектра нейтронов, вылетающих из фантома. Об этом говорит и значение H_c/H_s , равное 1,7, которое характеризует ускорительные спектры как жесткие. В соответствии со значением $k_{из}$, равным 1,52, геометрия облучения в этой точке является промежуточной между изотропной и передне-задней.

2. Различие коэффициентов в изотропной геометрии, определенных по спектру и по шаровой альбедной системе в точке 1, достигает 2. В соответствии с рис. 3 различие между этими коэффициентами в изотропной геометрии для спектров на ускорителях при значениях отношения H_c/H_s выше 1,5 может достигать и больших значений. Использование шаровой альбедной системы в таких точках может давать заниженное значение поправочных коэффициентов и, соответственно, занижать значение эффективной дозы в сравнении со значением, полученным с коэффициентами, определенными по спектру. Это согласуется с выводами работы [6] об ограниченности использования шаровой альбедной системы в относительно жестких полях нейтронов на ускорителях.

3. С другой стороны, коэффициенты в точке 1 в передне-задней геометрии, определенные по спектру и по формуле, практически равны, что говорит о возможности использования шаровой альбедной системы в такой геометрии даже в относительно жестких полях на ускорителях для определения индивидуального эквивалента дозы. Однако в таком случае индивидуальный эквивалент дозы не позволяет достоверно оценить эффективную дозу, что вытекает из сравнения $k_E(ИЗО)$ и $k_n(ПЗ)$, определенных по спектру.

4. В точке 2 спектр сформирован в основном рассеянными в кабине нейтронами, и геометрия облучения в этой точке ближе к изотропной, чем

к передне-задней. Об этом говорит и значение коэффициента изотропности, близкое к 2. Значение же отношения H_c/H_s , равное 1,1, говорит о достаточной мягкости спектра в этой точке. В таких полях обосновано использование шаровой альбедной системы.

5. Следует отметить близость значений поправочных коэффициентов $k_n(\text{ПЗ})$ и $k_E(\text{ИЗО})$, рассчитанных по шаровой альбедной системе для точки 2 (отличие от среднего не превышает 20 %). Это говорит о корректности определения нормируемой величины эффективной дозы с помощью рекомендованной для ИДК операционной величины — индивидуального эквивалента дозы в передне-задней геометрии в мягких полях рассеянного излучения на ускорителях.

6. Для более жесткого спектра нейтронов в точке 1 такого заключения сделать нельзя — коэффициенты $k_n(\text{ПЗ})$ и $k_E(\text{ИЗО})$ по результатам расчета поправочного коэффициента по спектру нейтронов различаются почти в 3 раза. Для таких полей излучения коэффициент $k_n(\text{ПЗ})$ и рассчитанное по нему значение индивидуального эквивалента дозы в несколько раз меньше значения эффективной дозы, т. е. в жестких полях на ускорителях необходимо определять эффективную дозу с помощью коэффициента $k_E(\text{ИЗО})$, близкого к единице.

7. По результатам настоящей работы можно определить предварительные границы использования шаровой альбедной системы в жестких полях фазотрона: отношение H_c/H_s больше 1,5 и средняя энергия спектра больше 2 МэВ.

ВЫВОДЫ

В настоящей работе измерен спектр нейтронов в кабине медицинского пучка фазотрона вблизи места облучения пациентов при расположении на нем фантома и проведены измерения с шаровой альбедной системой в двух точках: в месте измерения спектра и в поле рассеянного излучения около стены кабины.

Определены значения поправочных коэффициентов к показаниям индивидуального альбедного дозиметра ДВГН-01 в жестком поле в точке 1 двумя методами: расчетным по спектру нейтронов и с помощью шаровой альбедной системы. Показано, что в относительно жестких полях на ускорителях использование шаровой альбедной системы для определения поправочных коэффициентов для эффективной дозы в изотропной геометрии неправомерно. В таких полях для определения эффективной дозы рекомендуется использовать значение $k_E(\text{ИЗО})$, равное 1.

Определены примерные границы использования шаровой альбедной системы в жестких спектрах на ускорителях: отношение H_c/H_s больше 1,5 и средняя энергия спектра нейтронов больше 2 МэВ.

С помощью шаровой альбедной системы определены поправочные коэффициенты в поле рассеянного излучения у стены кабины в точке 2. Показана близость значений поправочных коэффициентов k_n (ПЗ) и k_E (ИЗО), рассчитанных по шаровой альбедной системе. Это говорит о корректности определения нормируемой величины эффективной дозы с помощью рекомендованной для ИДК операционной величины — индивидуального эквивалента дозы в передне-задней геометрии в относительно мягких полях рассеянного излучения на ускорителях. В таком поле рекомендовано использовать значение k_n (ПЗ), равное 0,23.

ЛИТЕРАТУРА

1. Комплекс автоматизированный индивидуального дозиметрического контроля АКИДК-301. Руководство по эксплуатации. Ангарск, 2007.
2. Комплекс автоматизированный индивидуального дозиметрического контроля АКИДК-302. Руководство по эксплуатации. Ангарск, 2013.
3. Санников А. В. и др. Индивидуальный дозиметр смешанного излучения ДВГН-01: разработка и исследование характеристик. Препринт ИФВЭ-6 ОРИ, 2005.
4. 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.
5. Мокров Ю. В. и др. Коррекция показаний альбедных дозиметров на МЦ400 ЛЯР с помощью шаровой альбедной системы и сравнение с другими методами коррекции // Письма в ЭЧАЯ. 2014. Т. 11, № 6(190). С. 1243–1255.
6. 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.
7. Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection Against External Radiation. ICRU Report 57. Bethesda, 1998.
8. Санников А. В. и др. Препринт ИФВЭ 2008-1 ОРИ, 2008.

Получено 6 июля 2018 г.

Редактор *Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 13.09.2018.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,75. Уч.-изд. л. 0,96. Тираж 170 экз. Заказ № 59488.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/