

## ИССЛЕДОВАНИЕ АДЕКВАТНОСТИ ПОКАЗАНИЙ АЛЬБЕДНОГО ДОЗИМЕТРА ДВГН-01 ДОЗАМ ОБЛУЧЕНИЯ ПЕРСОНАЛА В ПОЛЯХ НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ОИЯИ

*Л. Г. Бескровная, Е. А. Горошкова, Ю. В. Мокров*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Представлены результаты исследования адекватности показаний индивидуального альбедного дозиметра нейтронов ДВГН-01 индивидуальному эквиваленту дозы нейтронов  $H_p(10)$  и эффективной дозе нейтронов  $E_{\text{эф}}$  в полях излучения ядерно-физических установок (ЯФУ) ОИЯИ для различных геометрий облучения. Полученные в работе результаты свидетельствуют, что показания альбедного дозиметра ДВГН-01 будут адекватны дозам облучения персонала в полях излучения ЯФУ ОИЯИ только после коррекции его показаний с помощью поправочных коэффициентов. Поправочные коэффициенты получены расчетным путем с использованием энергетической зависимости чувствительности дозиметра и спектров нейтронов на ЯФУ ОИЯИ. При использовании поправочных коэффициентов не будут превышены допустимые неопределенности нахождения доз облучения персонала.

The calculated results of the research correspondence of the indication of the individual albedo dosimeter DVGN-01 to the individual equivalent dose for neutrons  $H_p(10)$  and to the effective dose for neutrons  $E_{\text{eff}}$  in the neutron fields at the JINR Nuclear Power Installations (JNPI) at different geometries of irradiations are presented. It has been shown that the correction coefficients are required for specific estimation of doses by the dosimeter. The coefficients were calculated using the energy sensitivity curve of the dosimeter and the known neutron spectra at the JNPI. By using the correction factors the uncertainties of both doses would not exceed the limits given to the personnel according to standards.

PACS: 87.53.Qc

### ВВЕДЕНИЕ

Проведение индивидуального дозиметрического контроля (ИДК) является одним из основных путей обеспечения радиационной безопасности персонала, работающего в полях ионизирующих излучений. В последнее время решению задач индивидуальной дозиметрии уделяется значительное внимание, связанное с выходом новых международных и отечественных нормативных материалов, посвященных различным аспектам радиационной безопасности. Среди них можно отметить Рекомендации международной комиссии по радиологической защите (публикация 60 МКРЗ [1]) и отечественные Нормы радиационной безопасности — НРБ-99 [2].

В перечисленных документах введена новая номенклатура дозиметрических величин: нормируемых — для нормирования облучения персонала, и операционных — для определения в процессе проведения радиационного контроля и использования в качестве консервативной оценки нормируемых величин. В качестве одной из нормируемых величин, используемых для установления предела дозы облучения, принята эффективная доза  $E_{эф}$ , которая, как правило, непосредственно не измеряется и является в основном расчетной величиной. Для оценки эффективной дозы в ИДК используется индивидуальный эквивалент дозы в мягкой биологической ткани, определяемый для проникающего излучения, к которому относится и нейтронное излучение, на глубине 10 мм под рассматриваемой точкой на теле человека  $H_p(10)$ .

Основные проблемы индивидуальной дозиметрии нейтронов обусловлены, прежде всего, ограниченным количеством типов детекторов, которые могут использоваться в индивидуальных дозиметрах нейтронов, и особыми требованиями к зависимости показаний дозиметров с такими детекторами от энергии регистрируемых нейтронов — энергетической зависимости их чувствительности (ЭЗЧ). ЭЗЧ индивидуального дозиметра нейтронов должна быть подобна энергетической зависимости индивидуального эквивалента дозы или эффективной дозы на единичный флюенс, в зависимости от того, для определения какой величины предназначен прибор.

Энергетическая зависимость удельного (на единичный флюенс) индивидуального эквивалента дозы  $h_p(10, 0^\circ)$  нейтронов представлена на рис. 1 [3]. Она определена для фантома в виде плоской тканеэквивалентной пластины размерами  $30 \times 30 \times 15$  см, имитирующего тело человека, при перпендикулярном падении нейтронов на ее поверхность (угол между нормалью к поверхности фантома и направлением излучения равен  $0^\circ$ ).

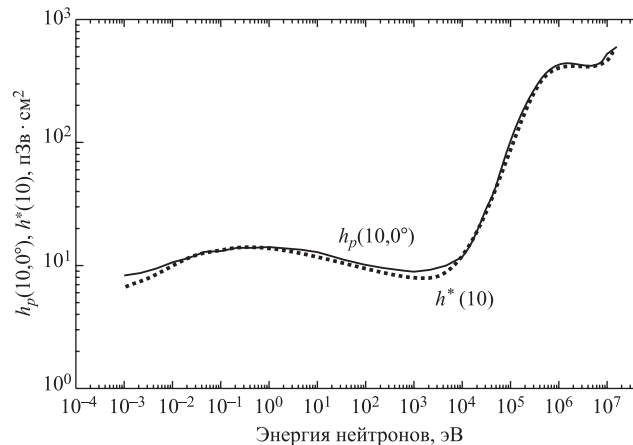


Рис. 1. Зависимость индивидуального эквивалента дозы и амбиентного эквивалента дозы на единичный флюенс нейтронов

На этом же рисунке для сравнения показана энергетическая зависимость удельного амбиентного эквивалента дозы  $h^*(10)$  [3].

До последнего времени одним из наиболее распространенных и разработанных методов индивидуальной дозиметрии нейтронов являлся фотоэмульсионный метод с использованием в дозиметрах в качестве детекторов ядерных эмульсий. В России для этих целей

использовалась ядерная эмульсия МК-20, за рубежом — аналогичная ей ядерная эмульсия NTA. Однако несколько лет назад и в России, и за рубежом был прекращен выпуск этих эмульсий, что вызвало необходимость поиска методов и средств индивидуальной дозиметрии нейтронов, которые могли бы использоваться в массовом ИДК персонала. Работы, проводившиеся в последние годы, показали, что наиболее приемлемыми индивидуальными дозиметрами нейтронов являются альбедные дозиметры с термолюминесцентными детекторами (ТЛД). Однако использование таких дозиметров требует решения некоторых проблем, которые будут рассмотрены ниже.

## 1. АЛЬБЕДНЫЙ МЕТОД В ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ДОЗИМЕТРИИ НЕЙТРОНОВ

Альбедный метод дозиметрии нейтронов основан на регистрации замедлившихся в теле и выходящих из него нейтронов, а также отраженных от тела нейтронов детектором, расположенным на поверхности тела. В качестве детекторов нейтронов в альбедных дозиметрах используются детекторы тепловых нейтронов. При использовании ТЛД это, как правило — детекторы на основе фтористого лития. Обычно используются две пары детекторов — на основе лития-7 ( ${}^7\text{LiF}$ ) и лития-6 ( ${}^6\text{LiF}$ ). Детекторы  ${}^6\text{LiF}$  регистрируют нейтроны и фотоны. Для того чтобы выделить из показаний  ${}^6\text{LiF}$  вклад, обусловленный нейтронами, используются детекторы  ${}^7\text{LiF}$ , которые регистрируют только фотонное излучение. Эти же детекторы служат в индивидуальном дозиметре для измерения доз фотонного излучения. Так как действие альбедного дозиметра основано на регистрации выходящих из тела и отраженных от него тепловых нейтронов, то необходимо исключить регистрацию тепловых нейтронов, падающих на тело извне. Для этого над детекторами располагается слой вещества, поглощающего внешние тепловые нейтроны. Как правило, это различные соединения из бора или кадмий.

После облучения дозиметра определяются показания детекторов  ${}^6\text{LiF}$  и  ${}^7\text{LiF}$  и находится их разница с учетом различной чувствительности детекторов к фотонному излучению. Доза определяется по показаниям дозиметра с помощью градуировочного коэффициента. Градуировочный коэффициент находится при облучении дозиметра на фантоме, имитирующем тело человека, известной дозой при нормальном падении излучения на фантом. Он равен отношению дозы облучения к показанию дозиметра при градуировке. Обычно дозиметры градуируются с использованием радионуклидного источника нейтронов  ${}^{239}\text{Pu-Be}$ .

Поля излучения нейтронов за защитой ЯФУ таких, например, как ускорители заряженных частиц или реакторы, характеризуются спектрами широкого энергетического диапазона от тепловых нейтронов до нейтронов с энергией в сотни МэВ. В связи с этим одной из основных характеристик альбедного дозиметра, определяющей возможности использования в ИДК, является его ЭЗЧ. При этом чувствительность находится как отношение показаний дозиметра к значению флюенса нейтронов данной энергии (или их спектра), падающих на дозиметр. При расчете чувствительности альбедных дозиметров, например, в работе [4], они имеют размерность числа  $(n, \alpha)$ -реакций в ТЛД  ${}^6\text{LiF}$  на единичный флюенс падающих нейтронов, т. е.  $\text{см}^{-2}$ .

Альбедные дозиметры различных конструкций имеют похожие ЭЗЧ. Наиболее характерным их свойством является существенное уменьшение чувствительности с увеличением энергии нейтронов. Это приводит к тому, что зарегистрированная альбедным

дозиметром доза может в разы отличаться от ее действительного значения. Однако, несмотря на отмеченный недостаток, реальной альтернативы альбедным дозиметрам в настоящее время нет. Они являются сейчас наиболее широко используемыми индивидуальными дозиметрами нейтронов как в России, так и за рубежом. К достоинствам этого метода дозиметрии относится то, что альбедные дозиметры имеют большой диапазон измерений дозы, просты по конструкции и в применении, относительно дешевы и доступны, обладают большой кратностью применения. Промышленностью освоен выпуск дозиметров и приборов для считывания их показаний (считывателей), которые позволяют автоматизировать процесс измерения доз облучения и исключить большую долю ручного труда, который был свойствен, например, фотоэмульсионному методу индивидуальной дозиметрии.

На основе альбедных дозиметров создано несколько зарубежных и отечественных комплексов для ИДК, основными элементами которых являются индивидуальные дозиметры и считыватели. Один из них — комплекс АКЖДК-301 с дозиметрами ДВГН-01, выпускаемый Ангарским электролизным химическим комбинатом [5]. Этот комплекс широко используется на многих отечественных предприятиях и на атомных электростанциях. В частности, он эксплуатируется в ОИЯИ. Ниже описаны устройство и основные характеристики комплекса.

## 2. ДОЗИМЕТРИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС АКЖДК-301

Все существующие комплексы с альбедными дозиметрами, несмотря на различную конструкцию, имеют схожую конфигурацию. На рис. 2 представлен общий вид дозиметрического комплекса АКЖДК-301. Комплекс состоит из считывателя СТЛ-301, который служит для определения показаний детекторов дозиметра, персонального компьютера, на котором обрабатываются показания ТЛД, рассчитываются по ним дозы облучения и ведутся базы данных считывателя и персонала, и принтера для вывода информации о дозах облучения на бумажные носители. В считывателе происходит нагрев ТЛД и с помощью фотоэлектронных умножителей определяется светосумма при высвечивании детекторов. Далее она преобразуется в количество импульсов, по которым с помощью градуировочных (калибровочных) коэффициентов рассчитывается доза облучения.

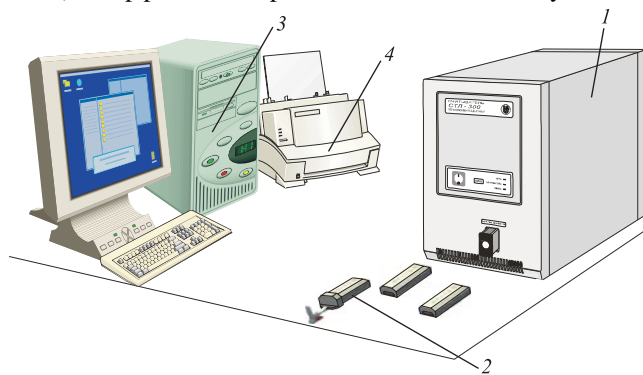


Рис. 2. Общий вид комплекса АКЖДК-301: 1 — считыватель СТЛ-300; 2 — дозиметры ДВГН-01; 3 — персональный компьютер; 4 — принтер

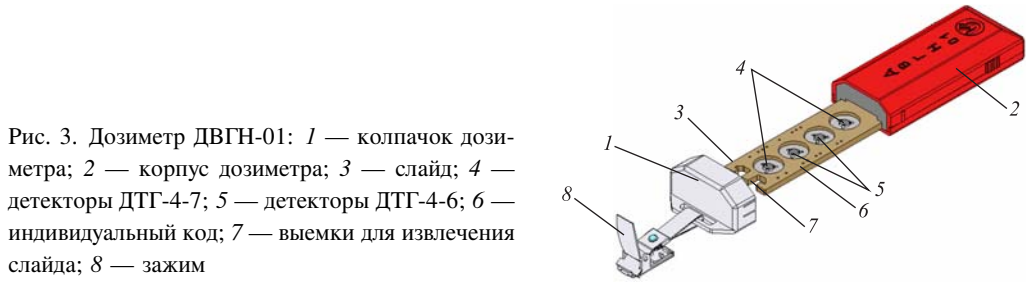


Рис. 3. Дозиметр ДВГН-01: 1 — колпачок дозиметра; 2 — корпус дозиметра; 3 — слайд; 4 — детекторы ДТГ-4-7; 5 — детекторы ДТГ-4-6; 6 — индивидуальный код; 7 — выемки для извлечения слайда; 8 — зажим

Устройство альбедного дозиметра ДВГН-01 показано на рис. 3.

Дозиметр состоит из корпуса, в котором размещается слайд с двумя парами ТЛД: ДТГ-4-7 на основе лития-7 и ДТГ-4-6 на основе лития-6. Для увеличения чувствительности к промежуточным нейтронам над детекторами расположена полиэтиленовая пластина толщиной 10 мм. Над ней расположен борный фильтр из карбида бора, ослабляющий падающие на дозиметр извне тепловые нейтроны в 10 раз. Дозиметр ДВГН-01 является дозиметром как нейтронного, так и фотонного излучений и позволяет измерять их дозы. В дальнейшем под альбедным дозиметром нейтронов будет пониматься дозиметр ДВГН-01, предназначенный для определения доз нейтронов.

В качестве примера ЭЗЧ альбедного дозиметра нейтронов ДВГН-01 для различных геометрий облучения и фантомов представлены на рис. 4 [4].

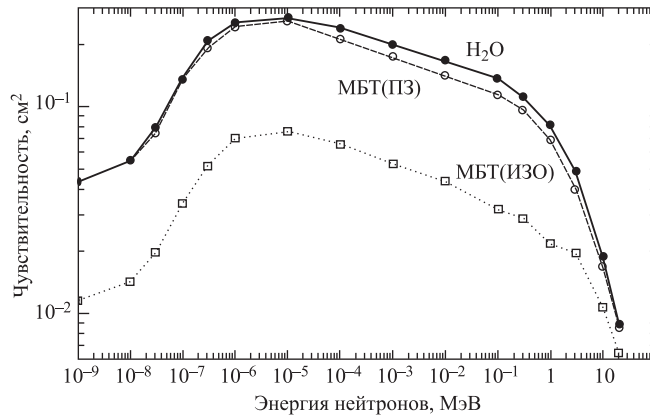


Рис. 4. ЭЗЧ альбедного дозиметра ДВГН-01 к нейтронам

Зависимость, обозначенная как МБТ(ПЗ), рассчитана для так называемой переднезадней геометрии (ПЗ-геометрии) облучения, когда излучение падает параллельным пучком на переднюю поверхность фантома из мягкой биологической ткани с расположенным на ней индивидуальным дозиметром перпендикулярно к ней. Для случая изотропного облучения (ИЗО), т. е. равномерного со всех направлений при расположении дозиметра также на передней стороне фантома из мягкой биологической ткани, ЭЗЧ обозначена как МБТ(ИЗО). На этом же рисунке приведена ЭЗЧ дозиметра ДВГН-01 при облучении его на водном фантоме в форме параллелепипеда размерами  $30 \times 30 \times 15$  см со стенками из

оргстекла (обозначена как  $H_2O$ ). Этот фантом рекомендуется использовать при градуировке альбедных дозиметров в ПЗ-геометрии. Аналогичные ЭЗЧ рассчитаны в [4] и для эффективной дозы.

Из сравнения рис. 1 и 4 видно, что ЭЗЧ дозиметра и зависимость величины  $h_p(10)$  от энергии нейтронов различны, особенно при энергии выше 10 кэВ. Это приводит к тому, что независимо от энергии нейтронов, при которой проводится градуировка дозиметров, их показания могут в разы отличаться от действительного значения дозы облучения в месте измерения.

### 3. АДЕКВАТНОСТЬ ПОКАЗАНИЙ АЛЬБЕДНЫХ ДОЗИМЕТРОВ

В связи с отмеченным недостатком альбедных дозиметров возникает необходимость в изучении адекватности их показаний дозам нейтронов в полях излучения ЯФУ ОИЯИ. Конечной целью этого изучения должно быть получение количественной оценки отличия зарегистрированных дозиметром доз от их действительных значений — поправочных коэффициентов. Это позволит путем введения таких коэффициентов в показания дозиметров скорректировать зарегистрированные ими дозы облучения.

Возможность изучения адекватности показаний альбедных дозиметров в различных полях излучения основана на том, что, зная ЭЗЧ дозиметра и спектры нейтронов в местах использования дозиметров, можно рассчитать и сравнить как зарегистрированные дозиметром, так и действительные значения доз облучения персонала при его работе в этих полях.

Спектры нейтронов являются наиболее информативными характеристиками полей излучения, по которым можно рассчитать практически все необходимые дозиметрические величины, в том числе индивидуальный эквивалент дозы и эффективную дозу. Поэтому измерение спектров нейтронов всегда являлось одной из наиболее приоритетных задач при проведении радиационных исследований на ускорителях и реакторах. За прошедшие годы на ЯФУ ОИЯИ были проведены многочисленные измерения спектров нейтронов для самых разных условий измерений: по виду и энергиям первичного излучения, материалам и размерам мишеней, по конфигурации и составу защиты и т. п. Это позволяет использовать для изучения адекватности показаний дозиметров и расчета поправочных коэффициентов наиболее типичные с точки зрения облучения персонала спектры нейтронов и оценить возможный диапазон изменения поправочных коэффициентов для альбедных дозиметров при использовании их в полях излучения конкретных ЯФУ. Если разброс полученных значений поправочных коэффициентов для различных установок не приведет к превышению допустимых неопределенностей нахождения доз облучения [6], то для таких установок могут использоваться усредненные единые значения поправочных коэффициентов.

**3.1. Выбор геометрии облучения и дозиметрических величин.** Значение индивидуального эквивалента дозы и эффективной дозы существенно зависит от углового распределения излучения, падающего на фантом. При работе же персонала в полях ионизирующего излучения реализуются самые разные геометрии облучения, т. е. излучение может быть направлено на тело человека под разными углами. Это связано как с условиями формирования полей излучения за защитой ЯФУ, так и с перемещениями персонала во время работы. Поэтому для реальных условий облучения невозможно определить ту

геометрию, в которой облучался в процессе работы человек с расположенным на его груди индивидуальным дозиметром. В связи с этим можно выделить несколько наиболее типичных видов геометрий облучения, каждый из которых или суперпозиция которых наиболее часто реализуются на практике. Такие типичные геометрии облучения представлены на рис. 5 [3].

Наиболее простой геометрией облучения является упомянутая выше переднезадняя геометрия, когда излучение падает на фантом перпендикулярно его передней поверхности. Эта геометрия в некоторых случаях может реализовываться на практике. Кроме того, в ней рекомендовано градуировать индивидуальные дозиметры. Другими разновидностями такой геометрии являются условия, когда излучение падает на боковые поверхности или на заднюю поверхность фантома (ЗП-геометрия).

Более распространенными на практике геометриями являются ротационное облучение, т. е. равномерное облучение со всех направлений в горизонтальной плоскости, и изотропное облучение, которое характеризуется равномерным направлением излучения со всех направлений в пространстве  $4\pi$ . Изотропное облучение характерно, например, для облучения от рассеянного в помещении излучения. На практике могут реализовываться различные геометрии облучения, но можно предположить, что чаще всего реализуются комбинации изотропной геометрии с переднезадней или ротационной геометриями.

Для корректного определения адекватности показаний дозиметров и нахождения значений поправочных коэффициентов в различных геометриях облучения необходимо использовать ЭЗЧ альбедного дозиметра именно для этих геометрий. В связи с тем, что приведенные в работе [4] ЭЗЧ альбедного дозиметра рассчитаны только для изотропной и ПЗ-геометрий облучения, в настоящей работе поправочные коэффициенты определены именно для этих геометрий.

**3.2. Используемые спектры нейтронов.** При расчете поправочных коэффициентов использовались 23 спектра нейтронов на следующих ЯФУ ОИЯИ:

- синхрофазотроне (с/ф) Лаборатории высоких энергий (ЛВЭ);
- синхроциклотроне (с/ц) и фазотроне (ф/т) Лаборатории ядерных проблем (ЛЯП);
- циклотроне У-300 Лаборатории ядерных реакций (ЛЯР);
- импульсных реакторах ИБР-30 и ИБР-2 и установке ИРЕН (источнике резонансных нейтронов) Лаборатории нейтронной физики (ЛНФ).

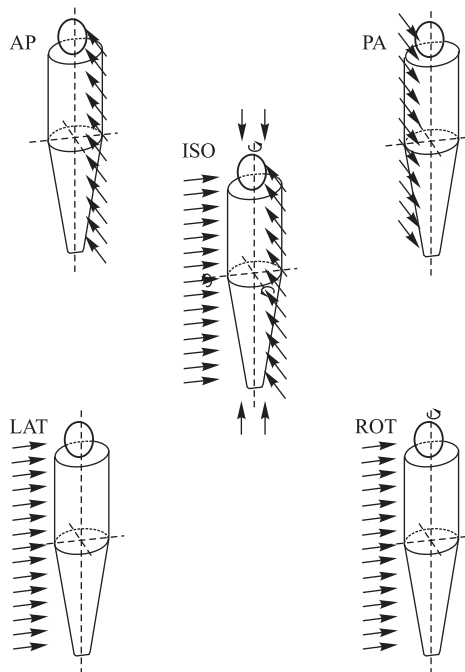


Рис. 5. Типы геометрий облучения: AP (ПЗ) — направленное облучение со стороны груди; PA (ЗП) — направленное облучение со стороны спины; LAT — направленное облучение сбоку; ROT — вращательное облучение в горизонтальной плоскости; ISO (ИЗО) — изотропное облучение

Подробно использованные спектры нейтронов описаны в работах [7, 8]. Эти спектры отличаются энергетическим диапазоном и условиями формирования (материалом и геометрией защиты, за которыми они определялись, видом и энергией первичного излучения, местом измерения и др.). Все спектры для определенности характеризуются средней энергией по флюенсу  $E_{\text{ср}}$  и значением амбиентного эквивалента дозы на единичный флюенс для данного спектра  $h_s^*(10)$ . Величина  $h_s^*(10)$  определяется по формуле

$$h_s^*(10) = \frac{\int h_s^*(10) \Phi(E) dE}{\int \Phi(E) dE}. \quad (1)$$

Значения  $h_s^*(10)$  при расчете  $h_s^*(10)$  для различных спектров взяты из работ [3, 9].

На рис. 6 в качестве примера приведены некоторые спектры нейтронов на ядерно-физических установках ОИЯИ.

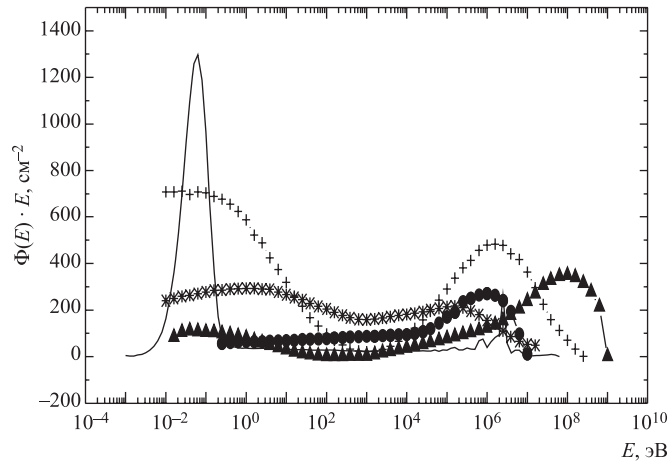


Рис. 6. Спектры нейтронов на ядерно-физических установках ОИЯИ:  $\blacktriangle$  — спектр № 1 обв. (ЛЯП);  $\bullet$  — спектр № 1 ИБР-2 (ЛНФ);  $+$  — спектр № 1 (ЛВЭ);  $*$  — спектр № 1 (ЛЯР); кривая — ИРЕН (ЛНФ)

Несмотря на то, что некоторые установки, спектры нейтронов которых использовались в настоящей работе, уже не существуют или модернизированы, полученные результаты могут быть применены как для исследований на модернизированных (фазотрон, ИБР-2М), так и на новых установках (ускоритель «Нуклотрон», ускорители ЛЯР, установка ИРЕН). Это обусловлено тем, что использованные спектры нейтронов находятся в широком энергетическом диапазоне — от очень мягких до самых жестких как по средней энергии, так и по среднему удельному амбиентному эквиваленту дозы  $h_s^*(10)$  спектров нейтронов рассматриваемых установок. Поэтому с достаточно большой вероятностью можно предположить, что указанные характеристики спектров нейтронов ( $E_{\text{ср}}$  и  $h_s^*(10)$ ) на модернизированных и новых установках также будут находиться в этом же диапазоне. Кроме того, модернизация касается, как правило, только самих установок, а энергия ускоряемых частиц, размеры, материал и конфигурация защиты, оказывающие



в наибольшей степени влияние на вид спектра, остаются неизменными или меняются незначительно с точки зрения формирования спектра.

**3.3. Расчетный метод изучения адекватности показаний.** Адекватность показаний альбедных дозиметров дозе облучения для различных спектров нейтронов определялась расчетным методом. Для известного спектра нейтронов  $\Phi(E)$  рассчитывались действительная доза облучения и доза, которую зарегистрировал бы дозиметр — показание дозиметра. Для этого использовались значения удельного индивидуального эквивалента дозы или удельной эффективной дозы и ЭЗЧ дозиметра. Сравнение этих величин позволяет судить о том, насколько показания дозиметра адекватны действительному значению дозы облучения. В настоящей работе величиной, количественно характеризующей адекватность показаний альбедного дозиметра, выбран поправочный коэффициент, равный отношению действительного значения дозы облучения для данного спектра нейтронов к показанию дозиметра. Характеризуя адекватность показаний дозиметра, поправочный коэффициент может использоваться также для коррекции его показаний.

Операционной величиной, которая должна непосредственно определяться в процессе проведения ИДК, является индивидуальный эквивалент дозы. Однако если известны ЭЗЧ альбедного дозиметра, энергетическая зависимость эффективной дозы на единичный флюенс нейтронов для выбранной геометрии облучения и спектр нейтронов в месте измерений, то можно рассчитать поправочные коэффициенты для получения по его показаниям значений эффективной дозы. В настоящей работе поправочные коэффициенты рассчитаны для индивидуального эквивалента дозы и эффективной дозы в изотропной и ПЗ-геометриях.

Для известного спектра нейтронов  $\Phi(E)$  поправочные коэффициенты для направленного облучения дозиметра  $k_n(\text{ПЗ})$  и для облучения в изотропной геометрии  $k_n(\text{ИЗО})$  представляют собой отношение рассчитанных значений индивидуального эквивалента дозы  $H_p(10)$  и  $H_p(10, \text{ИЗО})$  к рассчитанным показаниям ДВГН-01  $H_{\text{ДВГН}}(\text{ПЗ})$  и  $H_{\text{ДВГН}}(\text{ИЗО})$  и определяются по формулам

$$k_n(\text{ПЗ}) = \frac{H_p(10)}{H_{\text{ДВГН}}(\text{ПЗ})} = \frac{\int h_p(10, 0^\circ, E) \Phi(E) dE}{k_{\text{гр}} \int R_{\text{ПЗ}}(E) \Phi(E) dE}, \quad (2)$$

$$k_n(\text{ИЗО}) = \frac{H_p(10, \text{ИЗО})}{H_{\text{ДВГН}}(\text{ИЗО})} = \frac{\int h_p(10, \text{ИЗО}, E) \Phi(E) dE}{k_{\text{гр}} \int R_{\text{ИЗО}}(E) \Phi(E) dE}, \quad (3)$$

где  $R_{\text{ПЗ}}(E)$  и  $R_{\text{ИЗО}}(E)$  — ЭЗЧ ДВГН-01 в переднезадней и изотропной геометриях при облучении на фантоме в виде тканеэквивалентного эллиптического цилиндра [4];  $k_{\text{гр}}$  — рассчитанное значение градуировочного коэффициента при градуировке дозиметра на плоском водном фантоме в форме параллелепипеда в поле градуировочного источника со спектром нейтронов  $\Phi_{\text{гр}}(E)$ ;  $h_p(10, 0^\circ, E)$  — удельный индивидуальный эквивалент дозы для тканеэквивалентного параллелепипеда (пластины) размерами  $30 \times 30 \times 15$  см в переднезадней геометрии [3, 9];  $h_p(10, \text{ИЗО}, E)$  — удельный индивидуальный эквивалент дозы в изотропной геометрии для нейтронов с энергией до 20 МэВ, взят из работы [10].

Выбор эллиптического цилиндра для расчета показаний дозиметра обусловлен тем, что такой фантом наиболее близок к телу человека в сравнении с фантомами в форме шара или параллелепипеда.

Градуировочный коэффициент находится как отношение рассчитанной дозы облучения  $H_P^{IP}(10)$  к показаниям ДВГН-01  $N_{ДВГН}^{IP}$  при градуировке:

$$k_{гр} = \frac{H_P^{IP}(10)}{N_{ДВГН}^{IP}} = \frac{\int h_P(10, 0^\circ, E) \Phi_{гр}(E) dE}{\int R_{ПЗ}^{IP}(E) \Phi_{гр}(E) dE}, \quad (4)$$

где  $R_{ПЗ}^{IP}$  — ЭЗЧ ДВГН-01 в ПЗ-геометрии для плоского водного фантома, используемого при градуировке,  $\text{см}^{-2}$  [4];  $\Phi_{гр}(E)$  — спектр Pu–Be-источника для установки УКПН [11], на которой градуируются ДВГН-01.

Расчет поправочных коэффициентов для эффективной дозы  $k_{E_{эф}}(ПЗ)$  и  $k_{E_{эф}}(ИЗО)$  в переднезадней и изотропной геометриях проводится по аналогичным формулам:

$$\begin{aligned} k_{E_{эф}}(ПЗ) &= \frac{E_{эф}(ПЗ)}{H_{ДВГН}(ПЗ)} = \frac{\int \epsilon_{ПЗ}(E) \Phi(E) dE}{k_{гр} \int R_{ПЗ}(E) \Phi(E) dE}, \\ k_{E_{эф}}(ИЗО) &= \frac{E_{эф}(ИЗО)}{H_{ДВГН}(ИЗО)} = \frac{\int \epsilon_{ИЗО}(E) \Phi(E) dE}{k_{гр} \int R_{ИЗО}(E) \Phi(E) dE}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $R_{ПЗ}(E)$  и  $R_{ИЗО}(E)$  — ЭЗЧ ДВГН-01 в переднезадней и изотропной геометриях при облучении на фантоме в виде эллиптического цилиндра [4];  $\epsilon_{ПЗ}$  и  $\epsilon_{ИЗО}$  — эффективная доза нейтронов на единичный флюенс в переднезадней и изотропной геометриях, соответственно, для тканеэквивалентного параллелепипеда [3, 12].

Указанные поправочные коэффициенты могут использоваться для оценки эффективных доз облучения персонала в изотропной и переднезадней геометриях по показаниям альбедного дозиметра, определенных с использованием градуировочного коэффициента  $k_{гр}$ .

Пределы интегрирования в приведенных формулах при расчете поправочных коэффициентов в зависимости от ЯФУ изменялись от минимальной энергии ( $10^{-8}$  МэВ) до максимальной энергии нейтронов для рассматриваемых спектров (вплоть до  $10^3$  МэВ).

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ПОПРАВОЧНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ

Результаты расчета поправочных коэффициентов для различных установок представлены в табл. 1. В ней приведены значения поправочных коэффициентов для индивидуального эквивалента дозы и эффективной дозы, полученные для изотропной и переднезадней геометрий. В этой же таблице указаны номера спектров в точках измерений для каждой установки, которые более подробно описаны в работе [7], и такие характеристики спектров, как средняя энергия по флюенсу нейтронов  $E_{ср}$  и средний удельный амбиентный эквивалент дозы (АЭД)  $h_s^*(10)$  по спектру.

Вследствие отсутствия данных по удельной дозе  $h_p(10, ИЗО)$  для энергий нейтронов выше 20 МэВ для спектров, в которых присутствуют нейтроны с такой энергией и которые имеют среднюю энергию до 10 МэВ, значения  $k_n(ИЗО)$  приняты равными  $k_{E_{эф}}(ИЗО)/1,05$ . Это обосновано тем, что в соответствии с [10] отношение эффективной дозы в изотропной геометрии к индивидуальному эквиваленту дозы в той же геометрии для спектров нейтронов со средней энергией от 0,3 до 8 МэВ не превышает значения 1,1 при среднем значении этого отношения 1,05. Значения  $k_n(ИЗО)$  для жестких спектров на фазотроне и синхрофазотроне со средней энергией спектров более 10 МэВ не рассчитывались вследствие отсутствия необходимых данных.

Таблица 1. Значения поправочных коэффициентов

Установка	Номер спектра	Средняя энергия спектра нейтронов $E_{ср. \text{ЭВ}}$	Средний удельный АЭД спектра нейтронов $h_s^*(10), \text{пЗв} \cdot \text{см}^2$	Коэффициенты				Отношение $k_{ИЗО}(\text{ИЗО})/k_{ИЗО}(\text{ПЗ})$	Отношение $k_{E_{эф}}(\text{ПЗ})/k_{E_{эф}}(\text{ИЗО})$
				$k_{ИЗО}(\text{ПЗ})$	$k_{E_{эф}}(\text{ПЗ})$	$k_{ИЗО}(\text{ИЗО})$	$k_{E_{эф}}(\text{ИЗО})$		
ЛЯП, ф/г	№ 5 мягкое опорное поле	$2,58 \cdot 10^5$	30,5	0,045	0,057	0,035	0,057	1,28	1,27
				0,176	0,383	0,170	0,383	1,03	2,18
ЛЯП, ф/г	№ 4 жесткое опорное поле	$9,30 \cdot 10^6$	109,9	0,174	0,302	0,156	0,302	1,11	1,74
				0,468	—	0,562	1,659	0,83	3,55
				0,527	—	0,619	1,724	0,85	3,27
				0,046	0,075	0,043	0,075	1,07	1,62
				0,768	—	0,896	2,365	0,86	3,08
				0,628	—	0,677	1,648	0,93	2,62
ЛВЭ, с/ф	№ 1	$2,84 \cdot 10^6$	126,2	0,174	0,302	0,156	0,302	1,11	1,74
				0,250	0,393	0,221	0,393	1,13	1,57
				0,170	0,286	0,154	0,286	1,10	1,69
				0,138	0,213	0,120	0,213	1,15	1,54
				0,048	0,113	0,050	0,113	0,97	2,34
				0,038	0,041	0,031	0,048	1,21	1,09
ЛНФ, ИБР 30	№ 2	$1,18 \cdot 10^6$	100,5	0,099	0,175	0,101	0,193	0,98	1,77
				0,062	0,076	0,050	0,082	1,24	1,23
				0,162	0,229	0,137	0,234	1,18	1,42
				0,065	0,082	0,054	0,088	1,21	1,25
				0,227	0,291	0,188	0,289	1,21	1,28
				0,181	0,226	0,143	0,224	1,27	1,25
ЛНФ, ИБР 2	№ 3	$2,57 \cdot 10^5$	43,6	0,072	0,093	0,06	0,105	1,2	1,29
				0,065	0,080	0,054	0,104	1,21	1,16
				0,111	0,131	0,084	0,128	1,32	1,19
ЛЯР, У-300	№ 2	$2,45 \cdot 10^5$	95,7	0,040	0,04	0,031	0,046	1,32	0,99
				0,040	0,04	0,031	0,046	1,32	0,99

Характеристика спектра с помощью среднего удельного AMBIENTного эквивалента дозы  $h_s^*(10)$  является более предпочтительной для целей определения поправочных коэффициентов, чем средняя энергия, которой часто характеризуют спектры. Это связано с тем, что такая характеристика спектра, как  $h_s^*(10)$ , может быть оценена экспериментально по результатам измерения с многосферным спектрометром (спектрометром Боннера [13]) как отношение его показаний с шарами диаметром 5 и 10 дюймов [14]. Показания спектрометра с шаром диаметром 10 дюймов пропорциональны AMBIENTному эквиваленту дозы, а с шаром диаметром 5 дюймов они пропорциональны флюенсу нейтронов до энергий около 1 МэВ. Поэтому отношение их показаний пропорционально удельному AMBIENTному эквиваленту дозы в полях нейтронов с энергией около 1 МэВ. Кроме того, зависимости величин  $h_p(10)$  и  $h_s^*(10)$  от энергии нейтронов довольно близки, и их различие не превышает 15 % для широкого диапазона энергий.

В таблице приведены также отношения поправочных коэффициентов для индивидуального эквивалента дозы и эффективной дозы в ПЗ-геометрии и для индивидуального эквивалента дозы в ИЗО- и ПЗ-геометриях. Первое из них показывает, в какой степени индивидуальный эквивалент дозы является оценкой эффективной дозы в ПЗ-геометрии. Видно, что это отличие не превышает 30 % для всех спектров и индивидуальный эквивалент дозы действительно является оценкой эффективной дозы. Второе отношение показывает, что выбор геометрии облучения при использовании поправочных коэффициентов имеет существенное значение.

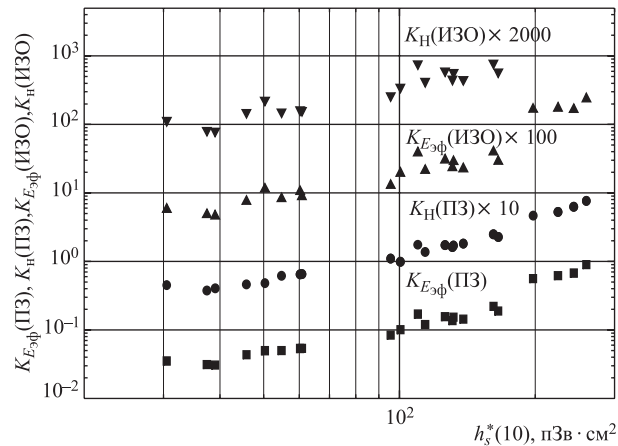


Рис. 7. Значения поправочных коэффициентов для различных значений  $h_s^*(10)$  использованных спектров

Значения поправочных коэффициентов представлены также на рис. 7 для различных спектров, характеризуемых значениями  $h_s^*(10)$ .

## 5. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

**5.1.** Поправочные коэффициенты для различных спектров, как видно из табл. 1, в большей степени коррелируют с удельным AMBIENTным эквивалентом дозы, чем со средней энергией спектра. Более наглядно это видно из сравнения рис. 7 и представленного

ниже рис. 8, на котором показаны значения поправочных коэффициентов для индивидуального эквивалента дозы для различных спектров в ПЗ-геометрии, которые характеризуются средней энергией по флюенсу нейтронов.

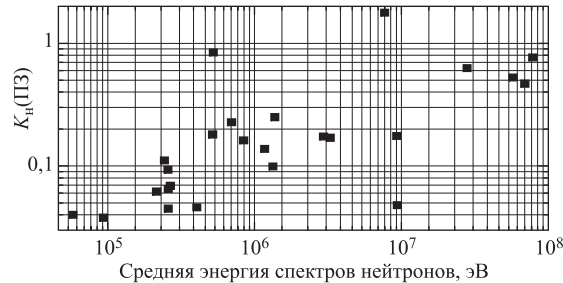


Рис. 8. Значения поправочных коэффициентов для спектров нейтронов с различной средней энергией

Из этих рисунков видно, что для некоторых спектров на разных установках с одной и той же средней энергией значения  $h_s^*(10)$  могут отличаться в несколько раз, что обусловлено видом конкретного спектра. Поэтому более корректным является сопоставление поправочных коэффициентов не со средней энергией спектра, а с величиной  $h_s^*(10)$ , которая характеризует жесткость спектра. Это позволяет использовать поправочные коэффициенты, определенные на одной установке, и для других установок в полях нейтронов с такими же или близкими значениями  $h_s^*(10)$ . Как видно из табл. 1 и из рис. 7, наблюдается закономерный рост поправочных коэффициентов с ростом удельного амбиентного эквивалента дозы  $h_s^*(10)$ .

**5.2.** Представленные в табл. 1 результаты позволяют сделать следующие выводы.

Для всех ЯФУ довольно четко выделяются мягкие спектры с удельной дозой по спектру не выше  $60 \text{ пЗв} \cdot \text{см}^2$ . Поправочные коэффициенты для таких спектров имеют наименьшие значения из всех рассчитанных в настоящей работе и не превышают 0,06 для всех геометрий облучения.

Также явно выделяются жесткие спектры с удельной дозой по спектру выше  $200 \text{ пЗв} \cdot \text{см}^2$ . Эти спектры — только на фазотроне. Для них поправочные коэффициенты имеют наибольшее значение и в некоторых случаях, особенно для эффективной дозы в изотропной геометрии, превышают единицу. Как правило, эти спектры реализуются в таких местах на ЯФУ, которые не характерны или просто невозможны для постоянного пребывания в них персонала при работающих установках. Поправочные коэффициенты для этих спектров можно использовать при проведении ИДК только в случае явного установления того факта, что персонал работал именно в таких полях.

Остальные спектры, представленные в табл. 1, можно отнести к промежуточным со значениями удельной дозы от 60 до  $200 \text{ пЗв} \cdot \text{см}^2$ . Поправочные коэффициенты для них меньше единицы.

На основе проведенного анализа можно установить для использования в ИДК на каждой ЯФУ рекомендованные значения поправочных коэффициентов и возможный диапазон их изменения. Это либо средние значения, полученные усреднением по нескольким

однотипным по жесткости спектрам (например, на фазотроне), либо значения, взятые из табл. 1 для отдельных спектров на установках (например, на ИРЕН и У-300). Рекомендованные значения поправочных коэффициентов представлены в табл. 2.

Здесь и далее величиной, характеризующей разброс значений поправочных коэффициентов вокруг среднего значения, является среднее арифметическое абсолютных значений разностей между средним и каждым использованным значением коэффициента. Эта величина является оценкой погрешности среднего значения поправочного коэффициента. Как видно из табл. 2, она не превышает 25 %.

Таблица 2. Рекомендованные значения поправочных коэффициентов

Установка		Поправочные коэффициенты			
		$K_n(\text{ПЗ})$	$K_n(\text{ИЗО})$	$K_E(\text{ПЗ})$	$K_E(\text{ИЗО})$
Мягкие спектры на всех ЯФУ ОИЯИ		$0,05 \pm 0,01$	$0,07 \pm 0,01$	$0,04 \pm 0,01$	$0,08 \pm 0,01$
Фазотрон	Жесткие спектры	$0,60 \pm 0,10$	—	$0,69 \pm 0,10$	$1,85 \pm 0,26$
	Промежуточные спектры	0,18	0,38	0,17	0,38
Синхрофазотрон	Промежуточные спектры	$0,18 \pm 0,03$	$0,30 \pm 0,07$	$0,16 \pm 0,03$	$0,30 \pm 0,07$
Импульсные реакторы	Промежуточные спектры	$0,17 \pm 0,04$	$0,23 \pm 0,03$	$0,14 \pm 0,02$	$0,23 \pm 0,03$
Циклотрон У-300	Промежуточные спектры	0,11	0,13	0,08	0,13

Из табл. 2 следует, что для фазотрона значение поправочного коэффициента существенно зависит от жесткости спектра нейтронов, в котором облучается дозиметр. Если же не известно, в поле с каким спектром работал персонал, то в ИДК можно использовать среднее арифметическое значений для жесткого и промежуточного спектров. Например, для индивидуального эквивалента дозы в ПЗ-геометрии он равен  $(0,60 + 0,18)/2 = 0,39$ .

Для импульсных реакторов и циклотрона У-300 наблюдается довольно хорошая корреляция между их поправочными коэффициентами для спектров, характеризуемых близкими значениями  $h_s^*(10)$ . Для установки ИРЕН поправочный коэффициент близок к коэффициентам для мягких спектров, каким и является спектр на этой установке в соответствии со значением  $h_s^*(10)$ .

Для синхрофазотрона ЛВЭ все используемые спектры, кроме одного мягкого спектра № 6, измеренного за ловушкой протонов в экспериментальном помещении, можно отнести к промежуточным спектрам.

Представленные в табл. 2 значения поправочных коэффициентов являются в основном средними значениями, полученными для ограниченного числа точек измерения на каждой ЯФУ. Однако для некоторых новых установок, например, У-400М в ЛЯР, ИРЕН и ИБР-2М в ЛНФ и нуклотрона в ЛВЭ, желательно получить дополнительные значения поправочных коэффициентов в различных полях излучения за их защитой. Это может быть сделано либо расчетным путем, как в настоящей работе с использованием спектров нейтронов, либо экспериментально, путем определения в точках измерений значений индивидуального эквивалента дозы и эффективной дозы и показаний ДВГН-01 при облучении их в этих же точках на фантоме.

**5.3.** При использовании полученных результатов в практике ИДК важное значение имеет выбор геометрии, для которой рассчитаны и будут использоваться поправочные коэффициенты, например, переднезадняя или изотропная геометрии. Практически невозможно представить реальные условия на ЯФУ, в которых реализуется только одна из показанных на рис. 5 геометрий облучения. Можно предположить, что более близкой к реальной геометрии облучения является суперпозиция различных геометрий. Так, практически в любом поле нейтронов присутствует как рассеянная компонента излучения, потому что персонал работает, как правило, в помещении, так и направленная — всегда можно выделить направление, откуда выходит излучение. Поэтому некоторые авторы [15] предлагают, например, использовать среднее арифметическое значение поправочных коэффициентов для ИЗО- и ПЗ-геометрий, если неизвестна реальная геометрия, в которой облучался персонал.

Выбор геометрий облучения и типов спектров для каждой ЯФУ, в соответствии с которыми устанавливаются поправочные коэффициенты в ИДК для ДВГН-01, зависит от анализа условий, в которых работает персонал. При этом желательно учитывать всю совокупность доступной информации по поправочным коэффициентам, в том числе результаты градуировки дозиметров в реальных полях облучения.

**5.4.** Представляет интерес сравнить значения поправочных коэффициентов как для ДВГН-01, так и для альбедных дозиметров других конструкций, полученных разными авторами в полях с различными спектрами нейтронов.

**5.4.1.** В работе [15] приведены поправочные коэффициенты для ДВГН-01 на рабочих местах персонала горно-химического комбината (ГХК). Так, в реакторном цехе в мягких спектрах с удельным амбиентным эквивалентом дозы по спектру не выше  $100 \text{ пЗв} \cdot \text{см}^2$  среднее значение поправочного коэффициента для эффективной дозы в ПЗ-геометрии составляет 0,08, что удовлетворительно согласуется со значением поправочного коэффициента для подобных полей в ОИЯИ (отклонение от среднего значения поправочного коэффициента не превышает 30 %).

Для промежуточных по жесткости спектров среднее значение такого же поправочного коэффициента на всем ГХК составляет 0,18, тогда как для промежуточных спектров на всех установках ОИЯИ это значение равно 0,16.

Таким образом, наблюдается довольно хорошее согласие между поправочными коэффициентами для похожих по жесткости спектров в различных условиях измерений.

**5.4.2** В работе [4] приведены расчетные значения поправочных коэффициентов для ДВГН-01 для различных спектров нейтронов. Сравнение рис. 7 настоящей работы и рис. 8 работы [4] показывает, что приведенный в них ход зависимости однотипных поправочных коэффициентов от среднего удельного амбиентного эквивалента дозы по спектрам похож, а значения этих коэффициентов близки.

**5.4.3.** В работе [16] приведены значения чувствительности альбедного дозиметра, созданного и изученного на ЯФУ ОИЯИ, аналогичного по конструкции дозиметру, описанному в работе [17]. Используя значения чувствительности, экспериментально полученные при градуировке на Pu–Be-источнике и в полях ЯФУ, можно рассчитать для этого дозиметра значения поправочных коэффициентов. Эти средние значения поправочных коэффициентов в ПЗ-геометрии для максимального эквивалента дозы равны для У-300 ЛЯР — 0,15, для ИБР-30 — 0,12, для синхрофазотрона — 0,17.

Из представленных результатов видно, что поправочные коэффициенты для альбедных дозиметров различной конструкции имеют близкие значения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая работа посвящена решению актуальной и имеющей большое практическое значение задачи определения адекватности показаний альбедного дозиметра ДВГН-01 дозе облучения персонала при использовании его в ИДК на ЯФУ ОИЯИ. В ней адекватность показаний дозиметров оценивается по рассчитанным значениям поправочных коэффициентов.

Показано, что дозиметр, как правило, завышает значения доз облучения персонала, и это завышение может быть существенным (до 20 раз для мягких спектров), зависящим от вида спектра нейтронов. В некоторых случаях (для жестких спектров) дозиметр может недооценивать эффективную дозу облучения в изотропной геометрии до двух раз.

Полученные результаты могут использоваться для коррекции показаний ДВГН-01. В работе приведены для ЯФУ ОИЯИ рекомендованные значения поправочных коэффициентов. При этом погрешность значений этих поправочных коэффициентов не более 25 %, что позволяет не превышать допустимые неопределенности нахождения индивидуальных доз, приведенные в нормативных документах [6].

Из результатов работы следует, что показания альбедного дозиметра ДВГН-01 будут адекватны дозам облучения персонала в полях ЯФУ ОИЯИ только после коррекции его показаний с помощью поправочных коэффициентов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радиационная безопасность. Рекомендации МКРЗ 1990. Ч. 1, 2. М.: Энергоатомиздат, 1994.
2. СП 2.6.1.758-99. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99). Гигиенические нормативы. М.: Центр сан.-эпид. нормирования, гигиен. сертификации и экспертизы М-ва здравоохранения РФ, 1999. 116 с.
3. Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External Radiation. ICRU Report 57. Bethesda, 1998. P. 119.
4. Санников А. В. и др. Индивидуальный дозиметр смешанного излучения ДВГН-01: Разработка и исследование характеристик. Препринт ИФВЭ 2005-6. Протвино, 2005. 13 с.
5. Комплекс автоматизированный индивидуального дозиметрического контроля АКЖДК-301. Руководство по эксплуатации. Ангарск, 2007.
6. Методическое обеспечение радиационного контроля на предприятии / М-во РФ по атом. энергии, М-во здравоохранения РФ, Федер. управ. медико-биол. и экстрем. проблем. М., 2001. Т. 1. С. 81.
7. Алейников В. Е., Бескровная Л. Г., Мокров Ю. В. Исследование возможности измерения  $^{10}\text{B}$ -счетчиком нейтронов в комбинированном замедлителе амбиентной дозы нейтронов в полях ядерно-физических установок ОИЯИ. Сообщ. ОИЯИ Р16-2008-46. Дубна, 2008. 20 с.
8. Shvetsov V. N. *et al.* Physical Startup of the First Stage of IREN Facility // Abstracts of the XVII Intern. Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei, Dubna, 2009. P. 58.
9. Sannikov A. V., Savitskaya E. N. Ambient Dose Equivalent Conversion Factors for High Energy Neutrons Based on the ICRP 60 Recommendations // Radiat. Prot. Dosim. 1997. V. 70, No. 1-4. P. 383-386.



10. МУ 2.6.1.45-2001. Дозиметрия. Определение индивидуальных эффективных доз нейтронного излучения. Метод. указания / ДБЧС М-ва атом. энергии РФ, Федер. управ. медико-биол. и экстрем. проблем, М-ва здравоохранения РФ. 2001. 15 с.
11. Санников А.В. и др. Многошаровой спектрометр нейтронов на основе серийного прибора РСУ-01. Препринт ИФВЭ 2007-21 ОРИ. Протвино, 2007. 10 с.
12. Yoshizawa N. et al. External Radiation Conversion Coefficients Using Radiation Weighting Factor and Quality Factor for Neutron and Proton from 20 MeV to 10 GeV // J. Nucl. Sci. Techn. 1998. V. 35, No. 12. P. 928–942.
13. Bramblet R.L. et al. A New Type of Neutron Spectrometer // Nucl. Instr. Meth. 1960. V. 9. P. 1.
14. Алейников В.Е. и др. Опорные поля нейтронного излучения для метрологического обеспечения радиационного контроля. Препринт ОИЯИ Р16-92-36. Дубна, 1992. 12 с.
15. Косьяненко Е.В. и др. Спектры и дозиметрические характеристики полей нейтронов на рабочих местах персонала горно-химического комбината. Препринт ИФВЭ 2008-22 ОРИ. Протвино, 2008.
16. Касканов Г.Я. и др. Чувствительность альbedo-дозиметров с термолюминесцентными детекторами к нейтронам различных энергетических спектров. Сообщ. ОИЯИ 16-84-804. Дубна, 1984. 8 с.
17. Piesch E., Burghardt B., Hassib G. A Universal Albedo Neutron Dosimeter Combined with a Track Etch Detector // The 9th DOE Workshop on Personnel Neutron Dosimetry, Las Vegas, 1982. P. 1–8.

Получено 28 июля 2009 г.