

ИЗУЧЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ АЛЬБЕДНЫХ ДОЗИМЕТРОВ НЕЙТРОНОВ РАЗНЫХ ТИПОВ С ЦЕЛЬЮ КОРРЕКЦИИ ИХ ПОКАЗАНИЙ

А. Г. Алексеев^а, Ю. В. Мокров^б, С. В. Морозова^б

^а Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

^б Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Представлены результаты экспериментального определения чувствительности индивидуальных альбедных дозиметров нейтронов трех типов в опорных полях нейтронов на основе радионуклидных источников и на верхней бетонной защите ускорителя У-70. Полученные результаты показывают, что отношение чувствительностей альбедных дозиметров, разработанных и изученных ранее в ОИЯИ, — альбедного дозиметра (АД) и комбинированного индивидуального дозиметра (КИД) к чувствительности используемого в настоящее время дозиметра ДВГН-01 постоянно в пределах 25 % в широком диапазоне энергий нейтронов. Это позволило использовать полученные ранее результаты измерения чувствительности дозиметров АД и КИД в полях ядерно-физических установок ОИЯИ для коррекции показаний дозиметра ДВГН-01 при его применении в индивидуальном дозиметрическом контроле (ИДК) персонала на этих установках. Для коррекции показаний ДВГН-01 получены и рекомендованы к использованию в ИДК значения поправочных коэффициентов для основных установок ОИЯИ.

Results of experimental definition of sensitivity of three types of individual neutrons albedo dosimeters in neutrons referent fields on the basis of radionuclide sources and at the top concrete shielding of the accelerator U-70 are presented. The presented results show that the relation of responses between albedo dosimeters developed which were designed earlier in JINR (albedo dosimeter (AD) and the multicomponent dosimeter (MD)) and DVGН-01 dosimeter now in use is constant within 25% in a wide range of neutrons energy. It gives possibility to use the measurement results of the AD and MD dosimeters responses which were obtained earlier in neutron fields of nuclear-physical JINR installations for DVGН-01 dosimeter measurement results correction for its application in personal radiation monitoring (PRM) on these installations. The correction factors for DVGН-01 measurement results are obtained and recommended to use in PRM for the majority of JINR installations.

PACS: 87.53.Bn

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в индивидуальном дозиметрическом контроле по нейтронам все большее распространение получают в России альбедные дозиметры. Это обусловлено целым рядом причин, в том числе прекращением выпуска детекторов, в частности, фотоэмульсионных, которые в течение десятилетий широко использовались в индивидуальных дозиметрах нейтронов. Кроме того, альбедные дозиметры нейтронов имеют ряд значительных преимуществ по сравнению с индивидуальными дозиметрами других типов. Они

просты по конструкции и применению в ИДК, относительно дешевы и доступны, выпускаются в массовых количествах, обладают большой кратностью применения, позволяют исключить большую долю ручного труда и автоматизировать процесс обработки дозиметров, повышают оперативность индивидуального контроля. В разных странах освоен промышленный выпуск комплексов ИДК, состоящих из альбедных дозиметров и приборов для считывания их показаний (считывателей). В мире в настоящее время широко используется несколько типов таких комплексов, и можно с уверенностью говорить, что в течение многих ближайших лет альбедные дозиметры будут наиболее широко применяемыми индивидуальными дозиметрами нейтронов.

Однако использование альбедных дозиметров в ИДК, особенно в полях нейтронов широкого энергетического диапазона, требует проведения коррекции их показаний, иногда довольно существенной. Это обусловлено ходом энергетической зависимости чувствительности (ЭЗЧ) таких дозиметров, которая существенно уменьшается при энергии нейтронов выше 10 кэВ [1]. Для того чтобы индивидуальный дозиметр правильно регистрировал дозу облучения персонала, эффективную дозу $E_{эф}$ или индивидуальный эквивалент дозы $H_p(10)$, его ЭЗЧ должна быть подобна зависимости от энергии такой дозы на единичный флюенс нейтронов. Эту величину часто называют удельной дозой и обозначают, например, для индивидуального эквивалента дозы как $h_p(10)$.

Вследствие такой ЭЗЧ показания альбедных дозиметров зависят от энергии регистрируемых нейтронов и от того, нейтронами какой энергии они градуированы. Как правило, альбедные дозиметры градуируются с помощью радионуклидного источника $Ru-Be$, имеющего среднюю энергию спектра нейтронов по флюенсу 4,2 МэВ. Отмеченная особенность ЭЗЧ альбедных дозиметров вызывает необходимость проведения коррекции их показаний при использовании в полях нейтронов различной энергии. Коррекция осуществляется путем использования поправочных коэффициентов, на которые умножаются показания дозиметров, применяемых в тех или иных полях нейтронов.

Чаще всего используются два основных метода коррекции показаний альбедных дозиметров. Первый из них основан на расчете поправочных коэффициентов для полей с известными спектрами нейтронов с применением расчетных ЭЗЧ этих дозиметров. Такой метод использован, например, в работах [1, 2]. Второй метод основан на непосредственной градуировке дозиметров в тех полях излучения, в которых они используются. При этом определяется либо градуировочный коэффициент дозиметров, равный отношению дозы облучения к показаниям дозиметра, либо обратная ему величина — чувствительность дозиметра. В таком случае поправочный коэффициент фактически равен отношению чувствительностей альбедного дозиметра для градуировочного источника к чувствительности в том поле, в котором дозиметр используется.

Альбедные дозиметры разных типов имеют различные конструкции. Однако их ЭЗЧ похожи, так как в основном они обусловлены зависимостью от энергии альбеда нейтронов. Поэтому большой интерес представляет сравнительное изучение чувствительности альбедных дозиметров разных типов в одних и тех же полях нейтронов. Как будет показано ниже, при постоянстве отношений чувствительности альбедных дозиметров двух типов в различных полях нейтронов широкого энергетического диапазона поправочные коэффициенты для дозиметров одного типа могут использоваться в качестве поправочных коэффициентов и для дозиметров другого типа. В настоящее время в ИДК в ОИЯИ используется промышленный комплекс АКЖДК-301 [3] с альбедными дозиметрами ДВГН-01 [1]. Однако до этого здесь были разработаны, изготовлены и в течение

нескольких лет проходили опробование альбедные дозиметры двух типов: альбедные дозиметры (АД) [4], аналогичные дозиметру Пиша [5], и комбинированные индивидуальные дозиметры (КИД) [6]. Чувствительности дозиметров этих двух типов были довольно подробно изучены в различных полях нейтронов на основных ядерно-физических установках (ЯФУ) ОИЯИ.

В связи с тем, что определение чувствительности альбедных дозиметров в реальных полях нейтронов является сложной экспериментальной задачей, целесообразно использовать полученные ранее результаты определения чувствительности этих альбедных дозиметров (АД и КИД) на ЯФУ ОИЯИ для нахождения поправочных коэффициентов дозиметра ДВГН-01 в тех же полях нейтронов. Для этого предпринята настоящая работа по сравнительному изучению чувствительности альбедных дозиметров всех трех перечисленных типов в полях нейтронного излучения на основе радионуклидных источников и на верхней бетонной защите ускорителя У-70 ИФВЭ. При постоянстве отношений показаний ДВГН-01 к показаниям АД и КИД в этих полях для расчета поправочных коэффициентов ДВГН-01 могут использоваться результаты определения в них чувствительности АД и КИД, которые были получены ранее.

1. ИССЛЕДУЕМЫЕ АЛЬБЕДНЫЕ ДОЗИМЕТРЫ

Ниже представлены конструкция и основные характеристики исследуемых дозиметров.

1.1. Альбедный дозиметр (АД). АД был создан и опробован в ОИЯИ в начале 80-х гг. прошлого века. Схематическое изображение дозиметра представлено на рис. 1.

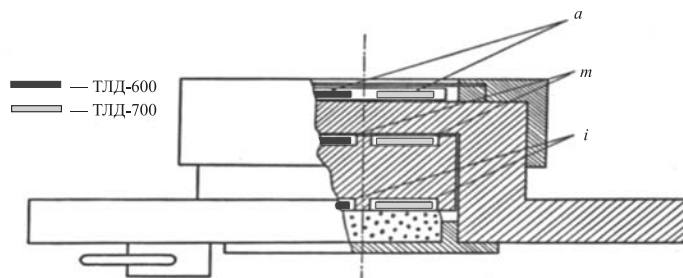


Рис. 1. Конструкция альбедного дозиметра (АД)

Дозиметр состоит из трех пар термолюминесцентных детекторов (ТЛД) ${}^6\text{LiF}$ и ${}^7\text{LiF}$. Две пары детекторов (позиции m и i) расположены внутри экрана из материала, поглощающего тепловые нейтроны. В АД использовался карбид бора в смеси с наполнителем из бакелита и пресс-порошка К-18. Одна пара детекторов (позиция a) расположена на поверхности дозиметра. При этом пара i отделена от поверхности тела материалом, не поглощающим тепловые нейтроны (дозиметр располагается парой i ТЛД к телу человека).

Представленная конструкция дозиметра довольно сложна, а методика его использования для практических целей в ИДК громоздка и требует дополнительных измерений. Как показала практика использования дозиметров такого типа, наличие трех пар детекторов

не рационально, так как информация от пары детекторов m в ИДК не используется. По разным причинам альбедный дозиметр АД не был запущен в серию для практического применения в ИДК в ОИЯИ. Однако были проведены многочисленные исследования его характеристик, в основном чувствительности, в различных полях нейтронов на базовых ЯФУ ОИЯИ.

1.2. Комбинированный индивидуальный дозиметр КИД. В результате опытного использования дозиметра АД, исследования его характеристик на установках ОИЯИ и анализа достоинств и недостатков конструкция дозиметра была изменена. На его основе был фактически создан новый дозиметр — комбинированный индивидуальный дозиметр. В этом дозиметре предусматривалось измерение не только доз облучения всего тела фотонным и нейтронным излучениями, но и кожной дозы (с помощью тонкого детектора — ТТЛД). Для измерения доз сверхбыстрых нейтронов в дозиметре предусматривалось гнездо для размещения трекового или эмульсионного детекторов. Конструкция дозиметра представлена на рис. 2.

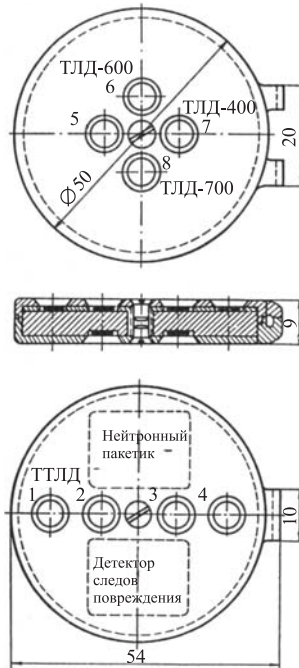


Рис. 2. Комбинированный индивидуальный дозиметр (КИД)

Кассета дозиметра состоит из основного вкладыша, изготовленного из смеси карбида бора B_4C (40 % по массе) и прессматериала на основе фенопласта, дополненного вкладышем с гнездами для размещения ТЛД, ядерной эмульсии (нейтронный пакетик) и трекового детектора (детектор следов повреждения). Две крышки крепятся к основному вкладышу с двух сторон винтами. Основной вкладыш имеет с наружной стороны (при ношении дозиметра на теле) четыре гнезда для размещения ТЛД (пары a) и два гнезда для

ядерной эмульсии и трекового детектора. С внутренней стороны (обращенной к телу) он имеет четыре гнезда для ТЛД (пары i), расположенных симметрично относительно центра вкладыша. Дозиметр крепится к спецодежде с помощью булавки, которая вставляется в держатель на его крышке.

Как правило, чаще всего в дозиметре используются две пары ТЛД (a и i), а при необходимости и трековый детектор или ядерная эмульсия.

1.3. Дозиметр ДВГН-01 комплекса АКЖДК-301. В настоящее время в России промышленностью выпускается комплекс индивидуального дозиметрического контроля с альбедными дозиметрами нейтронов — комплекс АКЖДК-301 Ангарского электролизного химического комбината с дозиметрами ДВГН-01. Подробно комплекс и его характеристики описаны в [1, 3]. Конструкция дозиметра показана на рис. 3.

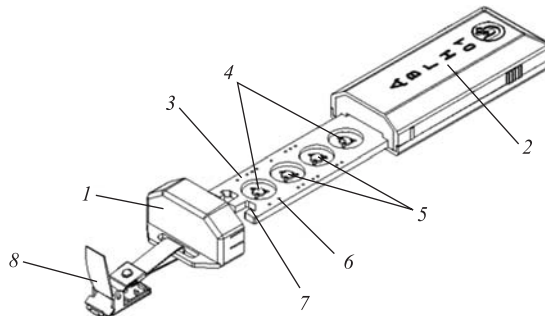


Рис. 3. Конструкция индивидуального дозиметра ДВГН-01: 1 — колпачок дозиметра; 2 — корпус дозиметра; 3 — слайд; 4 — детекторы ДТГ-4-7; 5 — детекторы ДТГ-4-6; 6 — индивидуальный код; 7 — выемки для извлечения слайда; 8 — зажим

2. МЕТОД СРАВНИТЕЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОПРАВОЧНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ

Как было отмечено выше, альбедные дозиметры могут применяться в полях излучения широкого энергетического диапазона, к которым относятся и поля нейтронов на ЯФУ ОИЯИ, только при использовании процедуры коррекции их показаний. Коррекция показаний дозиметров осуществляется умножением значений доз облучения, полученных с помощью ДВГН-01, на поправочный коэффициент, определенный или установленный для тех полей излучения, в которых работает персонал. В соответствии с методикой обработки ДВГН-01 на комплексе АКЖДК-301 поправочный коэффициент может устанавливаться для каждого сотрудника, стоящего на ИДК, путем внесения его значения в соответствующую строку базы данных считывателя. Однако на практике обычно устанавливаются единые значения поправочных коэффициентов либо для персонала, работающего на конкретной ЯФУ, либо для персонала всей лаборатории, в которой находится установка. Это связано с тем, что невозможно учесть все перемещения персонала в процессе работы на установке и определить поправочные коэффициенты для всех мест возможного пребывания персонала. При этом очевидно, что неопределенность поправочных коэффициентов для конкретной установки будет тем меньше, чем в большем количестве точек на ней в однотипных условиях облучения определены поправочные коэффициенты

и найдены их средние значения. Кроме того, это позволит более детально присваивать значения поправочных коэффициентов дозиметрам сотрудников, постоянно работающих в конкретных местах установок. Все это, в свою очередь, уменьшит неопределенность, с которой находится доза облучения персонала.

Таким образом, увеличение числа точек определения поправочных коэффициентов на ЯФУ является одной из основных задач, которые возникают при использовании альбедных дозиметров в ИДК. На практике эта задача сводится к определению чувствительности (другими словами, градуировке) альбедных дозиметров в реальных условиях работы персонала на каждой ЯФУ. При выборе мест, в которых определяется чувствительность дозиметров, необходимо учитывать многие факторы: частоту и длительность нахождения в них персонала, возможность проведения измерений доз облучения и экспозиции альбедных дозиметров, уровни излучения, доступность мест облучения и т. п. Все это говорит о том, что экспериментальное определение чувствительности альбедных дозиметров на ЯФУ является весьма сложной экспериментальной задачей, часто трудновыполнимой. Это обусловлено либо низкими уровнями излучения и необходимостью длительных экспозиций дозиметров, либо невозможностью размещения аппаратуры в местах измерения, либо сложными условиями проведения измерений (наличием сопутствующего излучения, магнитных полей и т. п.). В связи с этим весьма актуальной является задача использования всего объема полученной ранее информации о чувствительности альбедных дозиметров разных типов в полях излучения конкретных ЯФУ. Такая информация может быть использована для установления поправочных коэффициентов к показаниям ДВГН-01 на этих установках. Это вытекает из следующего.

Действительное значение дозы облучения $H_p(10)$ персонала в неизвестном поле излучения определяется как произведение показаний дозиметра ДВГН-01 — $H_{\text{ДВГН}}$ в миллизивертах на поправочный коэффициент K_n :

$$H_p(10) = H_{\text{ДВГН}} K_n. \quad (1)$$

Определяя $H_{\text{ДВГН}}$ как произведение градуировочного коэффициента по Pu–Be $K_{\text{Pu–Be}}^{\text{гп}}$ на показание дозиметра M (в импульсах или эквивалентных рентгенах), получим

$$H_p(10) = K_{\text{Pu–Be}}^{\text{гп}} M K_n. \quad (2)$$

Если известен градуировочный коэффициент $K_X^{\text{гп}}$ (или обратная ему величина чувствительности) для этого неизвестного поля X , то действительное значение дозы облучения определяется как произведение этого градуировочного коэффициента на показание дозиметра M в миллизивертах:

$$H_p(10) = K_X^{\text{гп}} M. \quad (3)$$

Из сравнения (2) и (3) следует, что поправочный коэффициент можно представить как отношение градуировочного коэффициента для данного неизвестного поля к градуировочному коэффициенту для Pu–Be:

$$K_n = \frac{K_X^{\text{гп}}}{K_{\text{Pu–Be}}^{\text{гп}}}, \quad (4)$$

или, в терминах чувствительности как величины, обратной градуировочному коэффициенту, как отношение чувствительности дозиметра для нейтронов Pu–Be к чувствительности для данного поля излучения.

Если предположить, что для дозиметров двух типов, например, ДВГН-01 и АД, отношения их градуировочных коэффициентов (или чувствительностей) в разных полях нейтронов широкого энергетического диапазона (например, для неизвестного поля X и поля Pu–Be-источника) равны, то справедливо соотношение

$$\frac{K_{\text{ДВГН}}^{\text{гр}}(X)}{K_{\text{АД}}^{\text{гр}}(X)} = \frac{K_{\text{ДВГН}}^{\text{гр}}(\text{Pu–Be})}{K_{\text{АД}}^{\text{гр}}(\text{Pu–Be})}, \quad (5)$$

из которого следует, что

$$\frac{K_{\text{ДВГН}}^{\text{гр}}(X)}{K_{\text{ДВГН}}^{\text{гр}}(\text{Pu–Be})} = \frac{K_{\text{АД}}^{\text{гр}}(X)}{K_{\text{АД}}^{\text{гр}}(\text{Pu–Be})}. \quad (6)$$

Отношения (6) представляют собой не что иное, как значения поправочного коэффициента для дозиметров ДВГН и АД в неизвестном поле X .

Это означает, что если экспериментально определены отношения градуировочных коэффициентов или чувствительностей двух альбедных дозиметров разных типов в различных полях нейтронов широкого диапазона энергий и они остаются постоянными в допустимых пределах, то поправочные коэффициенты для дозиметров одного типа будут равны поправочным коэффициентам для дозиметров другого типа. Можно предположить, что это будет справедливо и для полей нейтронов того широкого диапазона энергий, в который входят поля, для которых экспериментально определялись отношения чувствительностей. Допустимые пределы постоянства отношений чувствительностей двух дозиметров должны быть такими, чтобы при определении доз облучения с помощью ДВГН-01 и поправочных коэффициентов не были превышены допустимые неопределенности нахождения доз облучения персонала [7], которые зависят от уровней облучения и для любых значений доз превышают 50 %.

Таким образом, если экспериментально определить чувствительности альбедных дозиметров ОИЯИ (АД и КИД) и ДВГН-01 в разнообразных полях нейтронов, то в случае постоянства отношений чувствительности АД и КИД к чувствительности ДВГН-01 можно существенно увеличить количество полей на ЯФУ ОИЯИ, для которых могут быть приняты поправочные коэффициенты для ДВГН-01. При этом следует иметь в виду, что чувствительности АД и КИД были экспериментально определены для довольно большого числа точек измерений на основных ЯФУ ОИЯИ.

3. ПОЛЯ НЕЙТРОНОВ И МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ АЛЬБЕДНЫХ ДОЗИМЕТРОВ

Поля на основе радионуклидных источников являются наиболее доступными и широко применяемыми источниками нейтронов для градуировки дозиметров. Номенклатура таких полей довольно обширна, хотя наиболее часто применяются два источника нейтронов — Pu–Be и ^{252}Cf . Использование этих источников на различных установках и в случае помещения их в разные среды (например, в полиэтилен) позволяет сформировать на их основе несколько типов полей излучения с различными характеристиками. Такие поля называются опорными, и они часто используются для градуировки и изучения характеристик различных дозиметров нейтронов. В настоящей работе использовались следующие поля на основе радионуклидных источников.

3.1. Поле на основе источника Pu–Be на поверочной установке ОИЯИ в условиях открытой геометрии с использованием экранирующего конуса. В этом поле источник нейтронов используется в открытой геометрии, при этом вклад рассеянного в помещении излучения определяется по результатам измерений с экранирующим конусом. Геометрия измерений и расположение дозиметров на водном фантоме показано на рис. 4. Дозиметры располагались на водном фантоме с размерами $30 \times 30 \times 15$ см со стенками из органического стекла.



Рис. 4. Облучение дозиметров в открытой геометрии

3.2. Поля на основе радионуклидных источников Pu–Be и ^{252}Cf в установке УКПН-1М ИФВЭ. Поверочная установка УКПН-1М ИФВЭ с источниками Pu–Be и ^{252}Cf широко используется при проверке дозиметров нейтронов. Индивидуальные дозиметры нейтронов облучаются на ней при расположении их на тканеэквивалентном фантоме на расстоянии 75 см от центра источника. В настоящей работе в качестве фантома на установке УКПН-1М использовался параллелепипед из органического стекла с размерами $30 \times 30 \times 15$ см. Общий вид установки УКПН-1М и геометрия облучения дозиметров на ней представлены на рис. 5.

Пучок коллимированных нейтронов создается в ней радионуклидными источниками нейтронов, размещенными в коллимирующем устройстве УКПН-1М. Установка состоит из защитного контейнера, в котором имеется полость для размещения источника и конусное отверстие, которое может перекрываться заслонкой. Коллиматор служит для получения пучка быстрых и промежуточных нейтронов. Кроме того, в установке имеется тепловая насадка для получения тепловых нейтронов.

Средняя энергия нейтронов радионуклидных источников по флюенсу в открытой геометрии для Pu–Be равна 4,2 МэВ и для ^{252}Cf 2,1 МэВ. При использовании коллиматора УКПН-1М средняя энергия спектра нейтронов уменьшается и составляет 3,6 МэВ для Pu–Be и 1,9 МэВ для ^{252}Cf .



Рис. 5. Общий вид установки УКПН-1М и геометрия облучения дозиметров

3.3. Источник ^{252}Cf в полиэтиленовом шаре диаметром 30 см. В качестве опорного поля часто используется источник ^{252}Cf в полиэтиленовых шарах разного диаметра для получения более мягких, чем у источника без замедлителей, полей (с меньшей средней энергией спектра). В данной работе использовалось опорное поле на основе полиэтиленового шарового замедлителя диаметром 30 см. Средняя энергия спектра такого поля нейтронов составляет 1,2 МэВ [8]. Шаровой замедлитель располагался на несущем основании установки УКПН-1М, дозиметры — на передней поверхности фантома из органического стекла.

3.4. Поле излучения на верхней защите ускорителя ИФВЭ. Кроме нейтронных полей на основе радионуклидных источников, дозиметры облучались на верхней защите ускорителя У-70 ИФВЭ, где в полный поток дают большой вклад нейтроны с энергией выше 20 МэВ (50%). При этом средняя энергия спектра нейтронов составляла 49 МэВ. Геометрия измерений представлена на рис. 6 [9]. Точка измерения А была на верхней бетонной защите ускорителя толщиной 2,2 м над пучком протонов с энергией 70 ГэВ. Дозиметры располагались на груди фантома — на стороне, направленной к бетонной защите. Фантом находился на высоте 30 см над бетонной защитой.

3.5. Условия облучения дозиметров и методы определения чувствительности. На всех источниках облучение проводилось в переднезадней геометрии, т. е. дозиметры размещались на стороне фантома, направленной в сторону источника, излучение которого нормально падало на фантом. Одновременно на фантоме облучалось не более четырех-пяти дозиметров. Расположение дозиметров на фантомах показано на рис. 5 и 6. Несмотря на то, что при облучении использовались фантомы из разного материала (вода и полиэтилен), исследования показали, что различие этих двух фантомов является несущественным. Показания дозиметров, облученных на таких фантомах одной и той же дозой, различаются не более чем на 10%. Все дозиметры на каждом источнике облучались одной и той же дозой.

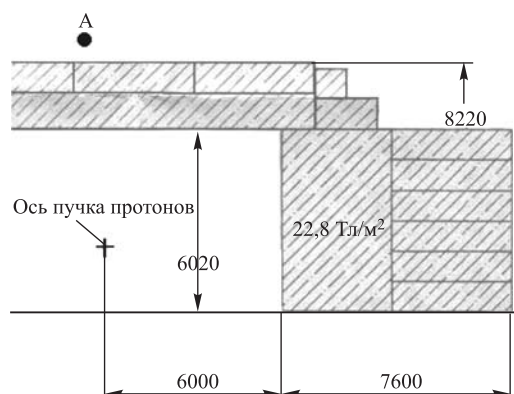


Рис. 6. Схема расположения точки облучения дозиметров на верхней бетонной защите ускорителя (точка А — над осью пучка протонов)

Показания альбедных дозиметров после их облучения на различных источниках определялись в соответствии с методиками обработки этих дозиметров.

Дозы облучения (амбиентный и индивидуальный эквиваленты дозы) в местах расположения альбедных дозиметров при проведении измерений определялись различными способами.

Для полей на основе радионуклидных источников в открытой геометрии и на УКПН-1М они определялись по результатам поверки поверочных установок, на которых реализуются эти поля. Поверка поверочных установок проводилась с помощью рабочего эталона — дозиметра амбиентного эквивалента дозы ДКС-96 с нейтронным датчиком. Погрешность определения амбиентного эквивалента дозы с помощью ДКС-96 составляет 10%. Вклад рассеянного излучения в амбиентную дозу при этом не превышает 5%. Дозиметры облучались на фантоме в поле с известной мощностью амбиентной дозы. По времени облучения находилось значение амбиентной дозы, которое принималось равным индивидуальному эквиваленту дозы. Это обусловлено тем, что в диапазоне энергий нейтронов до нескольких МэВ различие между амбиентным и индивидуальным эквивалентами дозы незначительно.

Доза нейтронов ^{252}Cf в шаре диаметром 30 см определялась по результатам исследования характеристик опорных полей ИФВЭ [8].

Доза нейтронов с энергией до 20 МэВ в точке А на верхней защите У-70 определялась по показаниям ДКС-96. Полная доза нейтронов (доза всего энергетического диапазона, включая нейтроны с энергией выше 20 МэВ) определялась по известному вкладу в нее нейтронов с энергией выше 20 МэВ, который принят равным 50%. Это значение вклада сверхбыстрых нейтронов получено как среднее арифметическое по результатам двух работ: 44% [10] и 55,9% [11]. По результатам исследований погрешность ДКС-96 в импульсном поле на верхней защите из-за мертвого времени не превышает 10–15%. Оценка вклада в показания ДКС-96 вторичных заряженных частиц от ядерных реакций в детекторе была сделана на основе сравнения с результатами измерений со слайдом ДВГН-01 в шаровом полиэтиленовом замедлителе диаметром 25 см. При этом разница показаний во всех точках за защитой ускорителя, где проводились измерения, не превысила 15–20%.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДОЗИМЕТРОВ И ПОПРАВочНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ДЛЯ ДВГН-01

4.1. Значения чувствительности альбедных дозиметров в полях излучения с различными спектрами нейтронов и их отношения. Результаты определения чувствительности дозиметров всех типов в различных полях нейтронов и отношения чувствительности АД и КИД к ДВГН-01 приведены в табл. 1. В первой колонке таблицы представлены источники нейтронов, в полях которых проводились измерения. Во второй и третьей колонках приведены значения индивидуального эквивалента дозы $H_p(10)$ в мЗв и средняя по флюенсу энергия спектра нейтронов $E_{ср}$. В остальных колонках таблицы представлены значения чувствительности в тех единицах, в которых они определяются в соответствии с методикой обработки дозиметров, и отношения показаний АД и КИД к показаниям ДВГН-01. Значения чувствительности АД и КИД даны в традиционно применявшихся ранее единицах рентген на бэр (Р/бэр). Это обусловлено тем, что показания дозиметров определялись в соответствии с методикой обработки в рентгенах (как разность показаний ТЛД-600 и ТЛД-700, проградированных по гамма-излучению ^{60}Co), а максимальная эквивалентная доза нейтронов в биологических эквивалентах рада (бэр). При этом доза нейтронов определялась делением показаний дозиметра на чувствительность.

В табл. 1 для значений чувствительности и их отношений не приведены погрешности этих величин. Они определены в данной работе в виде их предельных значений, которые не будут превышены для исследуемых дозиметров. Составляющими этих погрешностей являются:

- основная погрешность альбедных дозиметров δ_0 (не превышает 15 %);
- максимальная погрешность определения доз облучения δ_{max} (для полей нейтронов с радионуклидными источниками она не выше 10 %).

Предельная погрешность $\delta_{\text{пред}}$ чувствительности определяется по формуле

$$\delta_{\text{пред}} = \sqrt{\delta_0^2 + \delta_{\text{max}}^2}, \quad (7)$$

и для всех полей на основе радионуклидных источников она не превышает 20 %.

Таблица 1. Результаты определения чувствительности и их отношений

Источник	Условия облучения		Чувствительность				
			В абсолютных единицах			Относительно ДВГН-01, 10^{-4}	
	$H_p(10)$, мЗв	$E_{ср}$, МэВ	АД, 10^{-2} Р/мЗв	КИД, 10^{-2} Р/мЗв	ДВГН-01, 10^3 имп./мЗв	АД/ДВГН	КИД/ДВГН
Ру–Ве в открытой геометрии	1,19	4,2	3,2	3,5	1,4	0,23	0,25
Ру–Ве в УКПН	2,00	3,4	3,8	5,4	1,6	0,24	0,34
^{252}Cf в УКПН	2,00	1,9	4,3	5,2	1,8	0,24	0,29
^{252}Cf в шаре 30 см	0,96	0,7	11,3	18,4	5,3	0,21	0,35
Верхняя защита У-70	1,34	49	4,4	3,6	1,3	0,34	0,28

Для поля на верхней защите ускорителя погрешность измерения амбиентной дозы с помощью ДКС-96 не превышает 30 %. Погрешность полной дозы нейтронов при этом может составлять большую величину. Несмотря на то, что ДКС-96 измеряет амбиентную дозу, в настоящей работе предполагается, что в поле на верхней защите эту величину можно использовать в качестве индивидуального эквивалента дозы.

Предельная погрешность определения отношений чувствительностей АД и КИД к чувствительности ДВГН-01 не будет превышать 20 %, так как в этом случае исключается погрешность определения доз облучения (отношение чувствительностей дозиметров фактически равно отношению их показаний, так как все дозиметры облучались одновременно или одинаковое время в одних и тех же условиях).

В данной работе величиной, характеризующей значение отношений чувствительностей для всех полей, принято среднее арифметическое их максимального и минимального значений. Характеристикой рассеяния при этом является половина размаха, т. е. одна вторая разницы между максимальным и минимальным значениями отношений. Для АД эти значения равны $0,28 \pm 0,07$, для КИД $0,30 \pm 0,05$. Таким образом, можно считать, что с разбросом, не превышающим 25 %, отношение чувствительностей является постоянным для полей нейтронов широкого энергетического диапазона со средними значениями энергии спектра от 0,7 до 49 МэВ.

4.2. Нахождение и анализ поправочных коэффициентов для ДВГН-01 на ЯФУ ОИЯИ на основе литературных данных. Поправочные коэффициенты для ДВГН-01, найденные по литературным данным в соответствии с принятым в настоящей работе способом их определения, представлены в табл. 2.

В первых двух колонках показаны условия облучения — ЯФУ ОИЯИ и места облучения дозиметров на них. Более подробно условия облучения приведены в работах [4, 6].

В третьей колонке приведены поправочные коэффициенты, рассчитанные по результатам определения чувствительности АД [4] и КИД [6] в полях ЯФУ ОИЯИ и при градуировке на поверочной установке по Pu–Be-источнику нейтронов. Они определялись как отношение чувствительности для Pu–Be к чувствительности в местах измерений. При этом чувствительность определялась для максимального эквивалента дозы (МЭД) — величины, которая ранее использовалась в дозиметрии. Предполагается, что значения поправочных коэффициентов для МЭД и $H_p(10)$ существенно не отличаются. Это объясняется тем, что величина $H^*(10)$ систематически (в среднем на 20 %) выше МЭД для нейтронов до 20 МэВ и ниже для сверхбыстрых нейтронов (на 23 % для 100 МэВ). А так как поправочный коэффициент — это относительная величина, то можно принять, что для $H_p(10)$ и МЭД они в этих пределах совпадают в предположении равенства отношений амбиентного и индивидуального эквивалентов доз. При этом предполагается, что для спектров нейтронов с энергией выше 20 МэВ значения МЭД и $H_p(10)$ близки, так как МЭД локализуется на глубине 10–20 мм. Для шести точек на разных установках были проведены расчеты поправочного коэффициента для МЭД, который оказался от 9 до 20 % меньше, чем для $H_p(10)$.

В четвертой колонке представлены рекомендованные к использованию значения поправочных коэффициентов для полей нейтронов, аналогичных по своим характеристикам полям в условиях облучения, указанных в первых двух колонках. При этом использовались результаты расчета поправочных коэффициентов в работе [2] для полей, близких по своим характеристикам и условиям формирования к этим полям. Подробно условия облучения и характеристики полей, для которых рассчитывались поправочные коэффи-

циенты в [2], приведены в работе [12]. Необходимо отметить некоторую условность такой коррекции экспериментально полученных поправочных коэффициентов с помощью расчетных коэффициентов. Это связано с различием полей излучения и условий измерения, которые использовались для нахождения расчетных и экспериментальных поправочных коэффициентов.

При определении чувствительности в работах [4, 6] дозиметры располагались на четырех сторонах фантома (грудь, спина и боковые поверхности), и их чувствительность определялась как отношение максимального показания дозиметра на фантоме к дозе его облучения. Доза облучения определялась по результатам измерений многошаровым спектрометром с учетом степени изотропности поля: значение дозы, полученной по спектру нейтронов, делилось на оценку коэффициента изотропности для каждого поля. Коэффициент изотропности оценивался как отношение суммы показаний дозиметра на груди фантома (максимальное значение) и противоположной стороне (спине) фантома к показанию на груди. Для жестких спектров (см. ниже) чувствительность определялась как отношение суммы показаний дозиметров на спине и на груди к дозе, найденной по спектру нейтронов.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

Подтверждаются приведенные в работах [1, 2] выводы о зависимости поправочных коэффициентов от вида спектра. При этом спектр характеризуется его мягкостью или жесткостью, что связано либо с его средней энергией по флюенсу, либо со средним удельным амбиентным эквивалентом дозы (АЭД) для данного спектра. Как правило, мягкие спектры имеют среднюю энергию не выше нескольких МэВ, а их удельный АЭД не превышает $100 \text{ пЗв} \cdot \text{см}^2$. В полях с такими спектрами чаще всего отсутствуют сверхбыстрые нейтроны (с энергией выше 20 МэВ). В жестких спектрах средняя энергия может достигать десятков МэВ, а удельный АЭД в них выше $200 \text{ пЗв} \cdot \text{см}^2$. Вклад сверхбыстрых нейтронов в дозу в полях с такими спектрами может превышать 50%. Остальные спектры в местах облучений, представленных в табл. 2, можно отнести к промежуточным по жесткости спектрам.

Поправочные коэффициенты для точек с мягкими спектрами, представленными в настоящей работе, на всех ЯФУ не превышают, как правило, значения 0,10, что хорошо согласуется с данными работы [2]. К ним можно отнести спектры за защитой импульсного реактора и синхрофазотрона [4], а также спектры в лабиринтах циклотрона и в домике экспериментаторов на установке ДИСК синхрофазотрона [6]. Наиболее мягким из рассмотренных является расчетный спектр узконаправленного пучка нейтронов со средней энергией 30 кэВ на электростатическом генераторе ЭГ-5, возникающий при падении на мишень из ${}^7\text{Li}$ пучка протонов с энергией 1891 кэВ. Значение поправочного коэффициента 0,02 в третьей колонке табл. 2 получено для АД из результатов работы [4] как отношение чувствительности для Pu–Be к чувствительности в пучке нейтронов. Расчетное значение поправочного коэффициента равно 0,04 и получено в настоящей работе с использованием указанного спектра нейтронов по формулам (2), (3) работы [2].

Жесткие спектры реализуются на ускорителях. Наиболее характерными полями со спектром такого вида являются поля на обваловке фазотрона (точка 1) за сплошной бетонной защитой, где поправочный коэффициент достигает значения 0,60, и поле на верхней защите синхрофазотрона при выводе пучка протонов в корпус 205, где поправочный коэффициент равен 1,0, что также хорошо согласуется с данными работы [2], где поправочный коэффициент равен 0,77. Для сравнения, в жестком спектре на верхней за-

щите У-70 поправочный коэффициент, определенный по результатам настоящей работы, равен 1,03. К жестким можно отнести и спектры в местах размещения датчиков номер 16 и 18 системы дозиметрического контроля фазотрона (точки 16 и 18) при выводе пучка мюонов на углеродную мишень. Примером жесткого спектра является и спектр в зале ускорителя У-400 в направлении выведенного пучка на расстоянии 1 м от углеродной мишени, на которую падает пучок ядер Ti с энергией около 200 МэВ. Однако такие места с жесткими спектрами, как правило, не являются зонами возможного пребывания персонала.

Спектры нейтронов в прочих местах облучения, представленных в табл. 2, можно отнести к промежуточным по жесткости. Анализ поправочных коэффициентов в таких спектрах проводить сложнее из-за большего разнообразия условий формирования спектров и, соответственно, большего разброса значений поправочных коэффициентов. Как правило, поправочные коэффициенты в таких спектрах находятся в диапазоне от 0,10 до 0,30. К ним можно отнести спектры за защитой циклотрона, на пучках нейтронов ИБР-30, на синхрофазотроне в экспериментальном зале корпуса 205 за боковой защитой и за бетонной защитой домика экспериментаторов на установке ДИСК.

Следует отметить, что хотя некоторые установки, представленные в табл. 2, не существуют или модернизированы, полученные для них значения поправочных коэффициентов могут использоваться и на аналогичных новых или модернизированных прежних установках. Это обосновывается тем, что на новых или модернизированных установках характеристики полей излучения, влияющих на значения поправочных коэффициентов, меняются незначительно.

Таблица 2. Значения поправочных коэффициентов

Условия облучения		Поправочные коэффициенты по чувствительности АД и КИД [4, 6]	Рекомендованные поправочные коэффициенты	
Установка	Место облучения			
У-300 (циклотрон)	В лабиринте	0,13	0,12	
	За защитой	0,18	0,18	
У-400 (циклотрон)	В зале ускорителя на 1 м от углеродной мишени	0,70	0,70	
ИБР-30	Пучки нейтронов	0,18	0,17	
	За защитой	0,10	0,10	
Синхро- фазотрон	За защитой	0,10	0,10	
	До защиты	0,28	0,23	
	Установка ДИСК	В домике экспериментаторов	0,31	0,28
		За защитой	0,22	0,20
		В лабиринте	0,10	0,12
	Корпус 205	Эксперимент. зал	0,30	0,28
Верхняя защита ускорителя		1,0	1,0	
Фазотрон	Точка 1 (на обваловке)	0,59	0,60	
	Точка 16	0,43	0,45	
	Точка 18	0,41		
ЭГ-5	За мишенью из 7Li	0,02	0,03	

Необходимо отметить, что в настоящей работе рассмотрены значения поправочных коэффициентов, полученные в переднезадней геометрии облучения, т. е. когда дозиметры расположены на груди фантома, а излучение подает нормально на грудь фантома. В реальных условиях такая геометрия наблюдается довольно редко, чаще реализуются изотропная или ротационная геометрия в горизонтальной плоскости или суперпозиции различных геометрий. Если известна геометрия облучения, то для использования в ИДК можно брать значения поправочных коэффициентов, полученных для данной геометрии. Так, в работе [2] рассчитаны отношения поправочных коэффициентов для индивидуального эквивалента дозы в изотропной и переднезадней геометрии для спектров, приведенных в этой работе. Для мягких и промежуточных спектров эти отношения не превышают коэффициента 1,8, в то время как для жестких спектров они могут быть и выше. Кроме того, показана возможность использования средних значений поправочных коэффициентов для различных геометрий, если известно, что реализуется суперпозиция этих геометрий [13].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая работа посвящена решению ряда важных и актуальных вопросов применения индивидуальных альбедных дозиметров нейтронов в индивидуальном дозиметрическом контроле в ОИЯИ. Необходимость выполнения работы обусловлена существенной зависимостью чувствительности таких дозиметров от энергии нейтронов, что требует проведения коррекции показаний дозиметров при их использовании в ИДК в полях нейтронов широкого энергетического диапазона. Такая коррекция проводится с использованием поправочных коэффициентов, которые определяются либо расчетным способом, либо экспериментально — путем определения чувствительности альбедных дозиметров в реальных полях излучения на ЯФУ.

В работе были экспериментально определены значения чувствительности альбедных дозиметров трех типов — изготовленных и изученных ранее в ОИЯИ (АД и КИД) и используемого в настоящее время в ИДК в ОИЯИ дозиметра ДВГН-01 — в полях нейтронов широкого диапазона энергий со средней энергией спектра от 0,7 до 49 МэВ. Показано постоянство отношения чувствительности АД и КИД к чувствительности ДВГН-01 в пределах 25 %. Это позволило определить поправочные коэффициенты для ДВГН-01 по результатам проведенных ранее измерений чувствительности АД и КИД в полях ЯФУ ОИЯИ и на Pu–Be-источнике нейтронов.

Таким образом, в работе экспериментально обоснована возможность использования для определения поправочных коэффициентов альбедного дозиметра ДВГН-01 в полях ЯФУ ОИЯИ полученных ранее результатов изучения чувствительности альбедных дозиметров других типов в этих полях. На основании этого получены и рекомендованы значения поправочных коэффициентов для переднезадней геометрии облучения при проведении ИДК на различных ЯФУ ОИЯИ.

Показана возможность нахождения значений поправочных коэффициентов для изотропной геометрии облучения с использованием полученных в настоящей работе коэффициентов и расчетных литературных данных для поправочных коэффициентов в переднезадней и изотропной геометриях.

Авторы выражают благодарность А. В. Санникову за полезные замечания и конструктивную критику и Е. В. Косьяненко за помощь при проведении измерений на поверочной установке ИФВЭ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Санников А. В. и др. Индивидуальный дозиметр смешанного излучения ДВГН-01: Разработка и исследование характеристик. Препринт ИФВЭ-6 ОРИ. Протвино, 2005. 13 с.
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. Комплекс автоматизированный индивидуального дозиметрического контроля АКЖДК-301. Руководство по эксплуатации. Ангарск, 2007.
4. 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.
5. Piesch E., Burghardt B. // Proc. of the Fourth Intern. Conf. on Luminescence Dosimetry, Krakov, Poland, 1974. V. III. P. 1123.
6. Мокров Ю. В. Разработка методов и средств метрологического обеспечения радиационного контроля нейтронного излучения на ускорителях и импульсных реакторах. Дис. ... канд. техн. наук. М., 1999. 18 с.
7. МУ 2.6.2.25-2000. Методические указания. Дозиметрический контроль внешнего профессионального облучения. Общие требования // Методическое обеспечение радиационного контроля на предприятиях / М-во РФ по атом. энергии. М-во здравоохранения РФ, Федер. управ. медико-биол. и экстрем. проблем. М., 2001. Т. 1. С. 81.
8. Abrosimov A. I. et al. Dose Characteristics of IAEA Reference Neutron Fields. IAEA Preprint 93-43. Protvino, 1993. 12 с.
9. Алексеев А. Г., Масляев П. Ф. Сравнительные испытания индивидуальных электронных прямопоказывающих нейтронных дозиметров // АНРИ. 2008. № 1. С. 54–59.
10. Alekseev A. G., Kharlampiev S. A. Dosimetric Characteristics of the IAEA Neutron Reference Fields // Rad. Protection Dosimetry. 1997. V. 70, No. 1–4. P. 341–344.
11. Крупный Г. И. и др. К вопросу создания высокоэнергетического опорного поля нейтронного излучения. Препринт ИФВЭ 2009-5. Протвино, 2009. 10 с.
12. Алейников В. Е., Бескровная Л. Г., Мокров Ю. В. Исследование возможности измерения ^{10}B -счетчиком нейтронов в комбинированном замедлителе амбиентной дозы нейтронов в полях ядерно-физических установок ОИЯИ. Сообщ. ОИЯИ Р16-2008-46. Дубна, 2008. 20 с.
13. 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. 11 с.

Получено 14 мая 2011 г.