

МЕТОД МОНИТОРИРОВАНИЯ ПОЛЕЙ НЕЙТРОНОВ ВОКРУГ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСКОРИТЕЛЕЙ

Л. Г. Бескровная^{а,б,1}, С. В. Гусева^а, Г. Н. Тимошенко^{а,б}

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

Радиационный контроль нейтронного излучения на ускорителях высоких энергий не может быть организован только на основе стандартных (производимых в РФ) дозиметров и радиометров нейтронов, поскольку их рабочий диапазон ограничен максимальной энергией нейтронов ≈ 10 МэВ. При этом нейтроны более высоких энергий могут давать значительный вклад в дозу, получаемую персоналом как непосредственно за защитами ускорителей, так и в полях рассеянного излучения на удалении от них. В статье предлагается метод измерения амбиентной дозы нейтронов в интервале энергии нейтронов от 10^{-2} МэВ до 1 ГэВ прибором на основе двух полиэтиленовых шаров (диаметрами 3 и 10 дюймов со свинцовым конвертором ($10'' + \text{Pb}$)) с детекторами медленных нейтронов внутри. Данный метод может быть использован преимущественно в стационарных постах зонного радиационного контроля вокруг ускорителей.

Neutron monitoring around high-energy accelerators cannot be organized only on the basis of standard (produced in the Russian Federation) dosimeters and neutron radiometers, since their operating range is limited by the neutron energy of ≈ 10 MeV. At the same time, higher-energy neutrons can make a significant contribution to the personnel dose both directly behind the accelerator shield and in the fields of scattered radiation in the environment. In this paper, we propose a method for measuring the ambient dose of neutrons in the neutron energy range from 10^{-2} MeV to 1 GeV based on two polyethylene spheres (3 and 10 inches in diameter with a lead converter ($10'' + \text{Pb}$)) with slow neutron detectors inside. This method can be used mainly in fixed stations for area radiation monitoring around accelerators.

PACS: 29.90+r;87.53 Bn

Измерение дозы высокоэнергетичных нейтронов является одной из проблем дозиметрии на ускорителях высоких энергий. Нейтроны с энергией больше 0,1 МэВ дают основной вклад в эффективную дозу как непосредственно за защитами ускорителей, так и в полях рассеянного излучения на удалении от них. Данная работа посвящена методу измерения амбиентной дозы (амбиентного эквивалента дозы) нейтронов в интервале энергии нейтронов от 10^{-2} МэВ до 1 ГэВ на ускорителях тяжелых ионов комплекса НИСА Лаборатории физики высоких энергий (ЛФВЭ) ОИЯИ (Дубна) и на других подобных высокоэнергетических ускорителях заряженных частиц.

¹E-mail: besk@jinr.ru

Существенной особенностью строящегося комплекса NICA является его размещение на ограниченной территории площадки ЛФВЭ вблизи старого здания синхрофазотрона, в котором находятся два основных ускорителя комплекса — бустер и нуклотрон. Из-за ограниченной территории источники излучения расположены близко к границе территории площадки (минимальное расстояние от коллайдера до ограждения составляет 55 м, а от корпуса № 1 ЛФВЭ — 70 м). Такое размещение элементов комплекса обуславливает повышенные требования к достоверности радиационного контроля (РК) в окружающей среде, поскольку согласно нормативным документам [1, 2] и проекту коллайдера [3] за границей территории площадки ЛФВЭ должно быть обеспечено непревышение предела годовой дозы 1,0 мЗв. Следует отметить, что указанный предел дозы для населения не включает в себя дозу от природного фона (по многолетним наблюдениям естественный гамма-фон в Дубне от космического излучения и почвы составляет в среднем 0,8 мЗв/год) и является предельным уровнем техногенного облучения населения.

Поля излучения на высокоэнергетических ускорителях заряженных частиц непосредственно за биологической защитой имеют сложный компонентный состав, но основная дозовая нагрузка на персонал обусловлена нейтронами широкого диапазона энергии (нейтронами утечки из защиты). Поскольку энергия ускоренных ионов в нуклотроне и коллайдере составляет 4,5 ГэВ/нуклон, спектр нейтронов утечки из защиты в значительной мере обогащен нейтронами высокой энергии (более ~ 20 МэВ). Радиационная обстановка на прилегающей к ускорителям территории формируется нейтронами утечки из биологической защиты, многократно рассеянными в воздухе и грунте (эффект «skyshine»). Из-за «жесткости» спектра нейтронов утечки и из-за того, что длина свободного пробега нейтронов в воздухе резко растет с энергией, в спектрах нейтронов

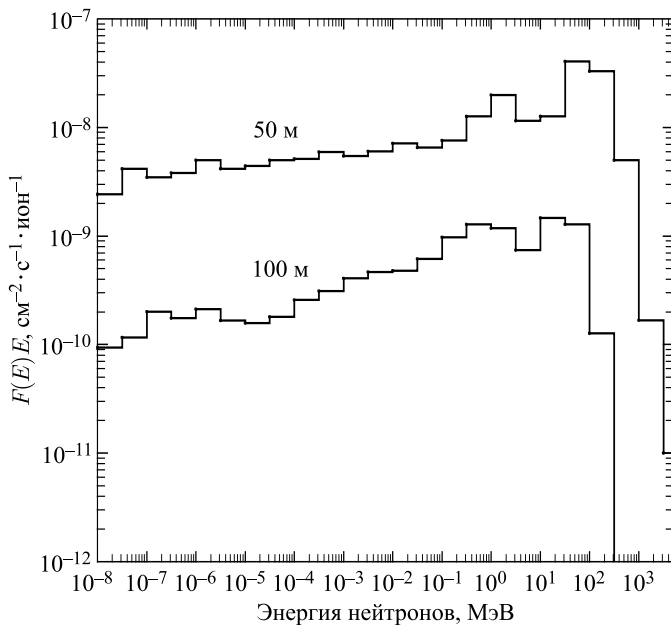


Рис. 1. Спектры нейтронов «skyshine», рассчитанные по программе GEANT4 для расстояний 50 и 100 м от центра нуклотрона

«skyshine» также присутствуют нейтроны высоких энергий. На рис. 1 показаны спектры нейтронов «skyshine», рассчитанные по программе GEANT4 для расстояний 50 и 100 м от центра корпуса № 1 ЛФВЭ для нуклотрона с 2-метровой верхней защитой туннеля из обычного бетона при ускорении ядер урана до энергии 4,5 ГэВ/нуклон¹.

Присутствие в спектрах нейтронов высоких энергий создает известную проблему РК на ускорителях, поскольку в промышленности, ориентированной на ядерную энергетику, производят дозиметры нейтронов с рабочим диапазоном только до 10–20 МэВ. Осуществление РК с помощью промышленных дозиметров приведет к существенной недооценке дозы от высокоэнергетичных нейтронов. Поэтому специалисты служб радиационного контроля ускорительных центров вынуждены разрабатывать и использовать специальные средства дозиметрии и мониторингования «жестких» полей нейтронов, не сертифицированные и не обеспеченные законодательной метрологией.

Наиболее достоверную информацию о дозе можно получить лишь на основе измеренных спектров нейтронов. При измерении спектров нейтронов широкого энергетического диапазона базовой методикой является многошаровой метод спектрометрии нейтронов, основанный на разнице длин замедления нейтронов разных энергетических групп в водородсодержащей среде (чаще всего в полиэтилене). В многошаровом спектрометре используется детектор медленных нейтронов, помещенный внутри замедлителей из полиэтилена различного диаметра. На основе комбинации показаний детектора тепловых нейтронов с разными замедлителями в данном поле восстанавливается исходный спектр нейтронов. Чаще всего наибольший диаметр замедлителя составляет 12 дюймов (редко 18 дюймов), при этом чувствительность детектора с этим замедлителем заметно падает уже при энергии нейтронов 10–15 МэВ. Измеренные спектры позволяют определить дозу нейтронов в измеряемой точке нейтронного поля. Для увеличения чувствительности спектрометра к нейтронам высоких энергий в его состав вводят гетерогенный замедлитель, в котором помимо полиэтилена содержится конвертор из тяжелого металла, производящий большое число вторичных каскадных и испарительных нейтронов при взаимодействии с ним нейтронов высокой энергии. В составе многошарового спектрометра ОИЯИ на основе сцинтиллятора LiI(Eu) также имеется полиэтиленовый замедлитель диаметром 10 дюймов со свинцовой вставкой внутри диаметром 8 см. Однако использование многошарового спектрометра в целях оперативной дозиметрии и зонного РК невозможно из-за длительного процесса измерений и сложной процедуры восстановления спектров нейтронов специальными математическими методами. По этой причине создаваемые в ускорительных центрах средства измерения дозы и флюенса нейтронов в «жестких» полях излучения зачастую базируются на использовании упрощенного многошарового метода. Примером могут служить приборы LINUS [4] (ФРГ) и WENDI-II [5] (США), представляющие собой цилиндрические полиэтиленовые замедлители большого диаметра со свинцовым или вольфрамовым конвертором внутри и детекторами тепловых нейтронов. Несмотря на большой вес, эти приборы могут быть использованы в дозиметрическом контроле на ускорителях, но их стоимость весьма высока.

В данной работе рассматривается иной упрощенный многошаровой метод для решения приборного обеспечения зонного РК на комплексе NICA, который может быть использован либо в автоматизированной системе РК (активные детекторы), позволяющей

¹Расчеты выполнены М. Паранпан.

следить за радиационной обстановкой в режиме реального времени, либо в системе интегрального контроля пассивными детекторами, при этом контролируется интегральная доза за определенный период, а не текущие значения мощности дозы в точках наблюдения.

Вид функции чувствительности идеального дозиметра нейтронов должен быть полностью подобен энергетической зависимости удельной амбиентной дозы нейтронов $h^*(10, E_n)$ [2]. В этом случае измеряемое дозиметром значение дозы при соответствующей градуировке прибора совершенно не зависело бы от вида спектра нейтронов. Безусловно, создать прибор с точно такой энергетической зависимостью чувствительности невозможно. Наиболее близкий вид к $h^*(10, E_n)$ имеет энергетическая зависимость чувствительности детектора медленных нейтронов внутри 10-дюймового полиэтиленового шара. На этой основе был создан ряд дозиметров нейтронов при энергии до ~ 10 МэВ.

Нами предлагается метод создания функции квазичувствительности $f_a(E_n)$ прибора, максимально подобной функции чувствительности идеального дозиметра, для оценки амбиентной дозы нейтронов широкого спектра энергий. Для этого выбрана линейная комбинация функций чувствительности детекторов медленных нейтронов в полиэтиленовом шаре диаметром 3 дюйма ($R_3(E_n)$) и полиэтиленовом шаре диаметром 10 дюймов со свинцовой вставкой диаметром 8 см ($R_{10+Pb}(E_n)$). Для дозиметра амбиентной дозы такая линейная комбинация определялась бы коэффициентами a_j , при которых

$$\sum_j a_j R_j(E_n) = f_a(E_n) \approx h^*(10, E_n),$$

где $R_j(E_n)$ — энергетическая зависимость функций чувствительности мног шарового спектрометра с j -замедлителем. Приближенное значение амбиентной дозы $H^*(10)$, создаваемой нейтронами со спектром $\Phi(E_n)$ и определяемой как

$$H^*(10) = \int \Phi(E_n) h^*(10, E_n) dE_n,$$

может быть найдено в этом случае непосредственно из показаний прибора:

$$H^*(10) \approx \int dE_n \Phi(E_n) \sum_j a_j R_j(E_n) = \sum_j a_j \int \Phi(E_n) R_j(E_n) dE_n = \sum_j a_j N_j,$$

где N_j — показание прибора с j -замедлителем, определяемое как $N_j = \int \Phi_j(E_n) \times R_j(E_n) dE_n$.

Значения коэффициентов a_j подбирались методом наименьших квадратов (программа DFUMIL [6]), с тем, чтобы обеспечить максимальное согласие функций $f_a(E_n)$ и $h^*(10, E_n)$. В качестве $R_j(E_n)$ использовались функции чувствительности $R_3(E_n)$ и $R_{10+Pb}(E_n)$ мног шарового спектрометра ОИЯИ со сцинтилляционным детектором медленных нейтронов LiI(Eu) диаметром 4 мм и высотой 4,3 мм, рассчитанные по программе MCNPX [7] (рис. 2). Для такой комбинации замедлителей был подобран следующий вид функции квазичувствительности в интервале энергии нейтронов от 10^{-2} МэВ до 1 ГэВ:

$$f_a(E_n) = -7,9 \cdot 10^{-10} R_3(E_n) + 2,09 \cdot 10^{-9} R_{10+Pb}(E_n). \quad (1)$$

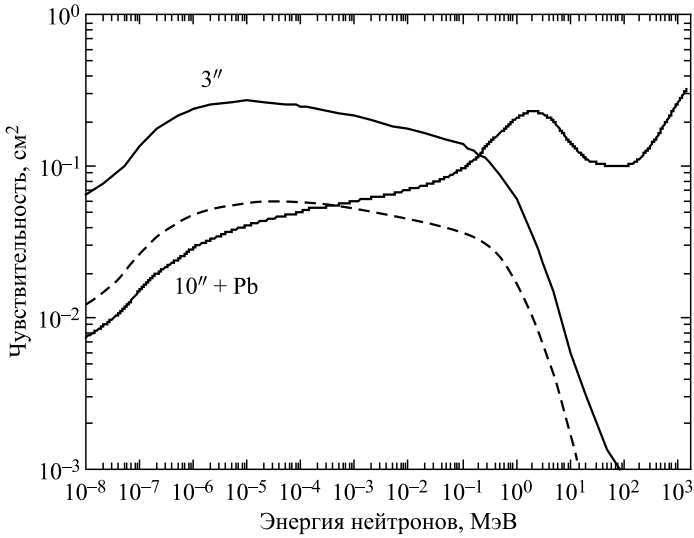


Рис. 2. Функции чувствительности детектора LiI(Eu) в полиэтиленовых шарах диаметром 3 и 10 дюймов со свинцовой вставкой внутри диаметром 8 см [7]. Штриховой кривой показана чувствительность термолюминесцентного детектора ТЛД-600 в 3-дюймовом шаре [10]

Таким образом, при использовании полученных коэффициентов a_j амбиентная доза нейтронов (Зв) по показаниям детектора LiI(Eu) в двух замедлителях определяется как

$$H^*(10) = \sum_j a_j N_j. \tag{2}$$

На рис. 3 представлены для сравнения функции $f_a(E_n)$ и $h^*(10, E_n)$ в диапазоне от 10 кэВ до 1 ГэВ. Значения амбиентной дозы до энергии нейтронов 158 МэВ взяты из ICRP74 [8], а при более высоких энергиях — из [9]. Ограничение функции $f_a(E_n)$ энергией 1 ГэВ вполне достаточно для практических целей, поскольку количество нейтронов утечки из защиты ускорителей с энергией более 1 ГэВ пренебрежимо мало. Наибольшее различие в поведении функций $f_a(E_n)$ и $h^*(10, E_n)$ (до коэффициента, равного 2) наблюдается в диапазоне энергии нейтронов от 10 до 100 МэВ. Однако в этом энергетическом интервале удельная амбиентная доза сама превышает значение удельной эффективной дозы при изотропном облучении человека примерно в 2 раза, при этом эффективная доза является нормируемой величиной, подлежащей контролю. Таким образом, занижение функции $f_a(E_n)$ в указанном энергетическом интервале нельзя трактовать как недостаток предложенной методики. Ниже энергии 10 кэВ значения квазичувствительности становятся отрицательными, что, в принципе, может привести к занижению значений амбиентной дозы, вычисленной по формуле (2). Но в силу того, что в защите и окружающей среде содержание водорода незначительно, в спектрах нейтронов утечки и спектрах нейтронов «skyshine» доля резонансных нейтронов сравнительно невелика, их удельная амбиентная доза много ниже, чем у нейтронов высокой энергии. К тому же, как уже говорилось выше, целью радиационного зонного мониторинга является в конечном счете подтверждение непревышения предела эффективной дозы для населения, а амбиентная

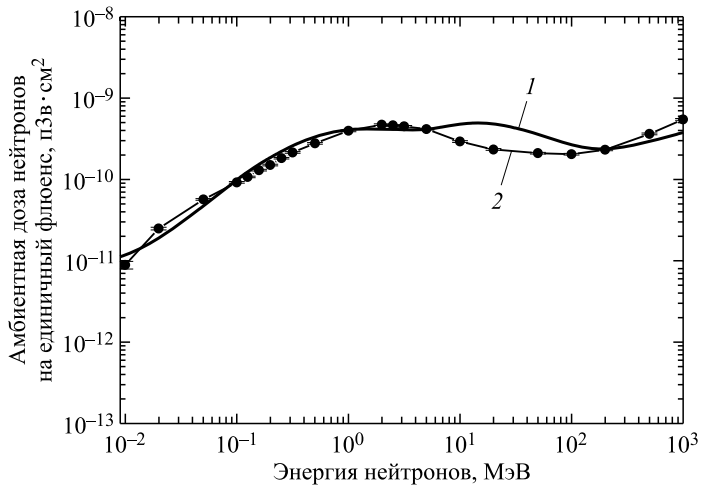


Рис. 3. Сравнение энергетической зависимости амбиентной дозы нейтронов [8, 9] с расчетами (1) по показаниям прибора с двумя замедлителями: 1 — амбиентная доза; 2 — наши данные

Сравнение значений амбиентной дозы нейтронов, рассчитанных по спектрам и определенных по предложенной методике для разных расстояний от центра нуклотрона (50 и 100 м)

Параметр	50 м	100 м
Флюенс нейтронов, $\text{см}^{-2} \cdot \text{ион}^{-1}$	$2,1 \cdot 10^{-7}$	$1,1 \cdot 10^{-8}$
Доля нейтронов с энергией менее 10 кэВ во флюенсе, %	29,4	20,9
Амбиентная доза по спектру, пЗв · ион ⁻¹	$4,9 \cdot 10^{-5}$	$2,4 \cdot 10^{-6}$
Доля нейтронов с энергией менее 10 кэВ в амбиентной дозе по спектру, %	1,3	1,4
Эффективная доза по спектру (ISO), пЗв · ион ⁻¹	$4,1 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$
Амбиентная доза по формуле (2), пЗв · ион ⁻¹	$6,4 \cdot 10^{-5}$	$3,7 \cdot 10^{-6}$

доза предназначена для заведомо завышенной оценки эффективной дозы (ISO). Тем не менее для проверки работы предложенной методики был выполнен расчетный эксперимент на основе спектров нейтронов «skyshine» на расстояниях 50 и 100 м от центра нуклотрона (рис. 1). За истинные физические величины принимались рассчитанные по спектрам амбиентные дозы нейтронов и вклад в эти величины нейтронов с энергией менее 10 кэВ. Далее были определены значения показаний датчика N_j с детектором LiI(Eu) в замедлителях диаметром 3 и 10 дюймов со свинцовой вставкой путем свертки спектров нейтронов «skyshine» с соответствующими функциями чувствительности (рис. 2), и по формуле (2) были рассчитаны амбиентные дозы при указанных расстояниях по линейной комбинации показаний двух замедлителей. Результаты расчетов сведены в таблицу.

В таблице приведены также значения флюенсов нейтронов по спектрам и доли в полном флюенсе нейтронов с энергией менее 10 кэВ. Значения эффективных доз нейтронов были рассчитаны для случая изотропного облучения человека, что соответствует характеру облучения нейтронами «skyshine» в окружающей среде. Значения удельной эффективной дозы нейтронов для геометрии изотропного облучения (ISO) с энергией до

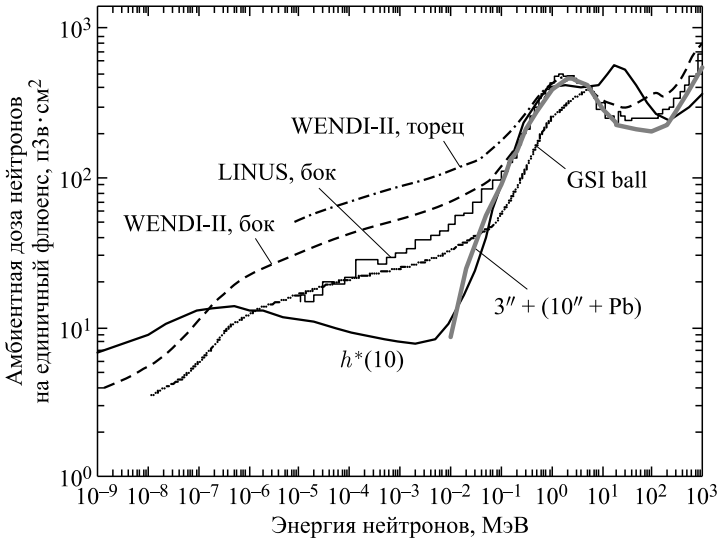


Рис. 4. Сравнение энергетической зависимости амбиентной дозы нейтронов $h^*(10)$ с откликами приборов: LINUS [4] при боковом облучении цилиндрического замедлителя (гистрограмма), WENDI-II [5] при боковом и торцевом облучении (штриховая и штрихпунктирная линии соответственно), GSI ball [12] с ТЛД-600/700 и прибора на основе двух шаров ($3'' + (10'' + \text{Pb})$)

30 МэВ брались из доклада ICRP74 [8], а при более высоких энергиях — из работы [11]. Из таблицы видно, что, несмотря на то, что доля резонансных нейтронов в спектрах «skyshine» составляет около 20 %, их вклад в дозу пренебрежимо мал.

Предложенная в качестве нейтронного монитора комбинация двух замедлителей имеет преимущества перед производимыми за рубежом приборами, такими как LINUS, WENDI-II и GSI ball, что демонстрирует рис. 4, где приведены отклики этих приборов в сравнении с энергетической зависимостью амбиентной дозы.

Сравнение рис. 3 и 4 показывает, что LINUS и WENDI-II, так же как и предложенная нами методика, занижают показания в диапазоне энергии нейтронов 10–100 МэВ, но в области 10^{-2} – 10^{-1} МэВ и выше 100 МэВ эти приборы сильно переоценивают амбиентную дозу. К тому же из-за цилиндрической формы замедлителей показания приборов LINUS и WENDI-II зависят от угла падения нейтронов, в то время как шаровые замедлители обладают изотропностью.

На практике предложенный двухшаровой метод может быть реализован в двух вариантах: активном и пассивном. Активный метод подразумевает использование двух близко расположенных замедлителей со сцинтилляционными датчиками, подключенными к автоматизированной системе радиационного контроля ускорителя для мониторинга радиационной обстановки в режиме реального времени. Пассивный метод заключается в размещении различных видов пассивных детекторов медленных нейтронов (активационных, термолюминесцентных) внутри замедлителей, накапливающих интегральный отклик в течение длительного времени.

В интегральном контроле целесообразно использовать пару термолюминесцентных детекторов (ТЛД) типа LiF(Mg, Ti), которые успешно применяются в индивидуальном

дозиметрическом контроле в ОИЯИ по нейтронам. Детекторы двух типов — ТЛД-600 и ТЛД-700 — обогащены изотопами ^6Li и ^7Li соответственно и производятся в виде таблеток размерами $3,2 \times 3,2 \times 0,5$ мм. Первый детектор предназначен для регистрации нейтронов, а также гамма-квантов и заряженных частиц, а второй регистрирует практически только гамма-кванты и заряженные частицы. При соответствующей градуировке разность показаний обоих детекторов пропорциональна накопленному отклику от нейтронов. Детекторы могут копить информацию фактически без потерь в течение длительного времени, малочувствительны к изменениям условий окружающей среды, процесс считывания их показаний автоматизирован и представляет собой рутинную процедуру. Полезным обстоятельством является также то, что интегральный контроль на основе ТЛД в двухшаровой методике позволяет без особых технических трудностей существенно расширить зону наблюдения, что важно для протяженной территории комплекса NICA.

Энергетическая зависимость чувствительности ТЛД-600 к нейтронам подобна чувствительности сцинтилляционного детектора $\text{LiI}(\text{Eu})$ [10], так как при регистрации нейтронов используется одна и та же реакция. На рис. 2 показана штриховой линией, для сравнения, чувствительность к нейтронам детектора ТЛД-600 в полиэтиленовом шаре диаметром 3 дюйма. По абсолютной величине чувствительность ТЛД-600 примерно в 5 раз ниже, чем у $\text{LiI}(\text{Eu})$, но, если учитывать длительный период набора информации, это не скажется на качестве контроля. Согласно паспортным данным, минимально измеряемая ТЛД-доза составляет 0,05 мЗв, что вполне достаточно для контроля не превышения предела дозы для населения.

ВЫВОДЫ

В работе предложен метод оперативной оценки амбиентной дозы нейтронов с энергией от 10^{-2} МэВ до 1 ГэВ с использованием детекторов медленных нейтронов в полиэтиленовом шаре диаметром 3 дюйма и полиэтиленовом шаре диаметром 10 дюймов со свинцовой вставкой диаметром 8 см на ускорителях высоких энергий, в том числе на ускорительном комплексе NICA ОИЯИ, который может быть реализован в двух вариантах: активном и пассивном.

Сравнение функций чувствительности детектора $\text{LiI}(\text{Eu})$ в полиэтиленовых шарах диаметром 3 и 10 дюймов со свинцовой вставкой внутри диаметром 8 см с энергетической зависимостью удельной амбиентной дозы нейтронов показывает более высокое согласие с этой дозой по сравнению с приборами LINUS и WENDI-II.

Предлагаемый метод для определения амбиентной дозы высокоэнергетичных нейтронов в полях рассеянного излучения на ускорителях высоких энергий позволяет с приемлемой точностью обеспечивать зонный контроль с целью соблюдения нормативных величин предела дозы для населения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009.

2. СП 2.6.1.2612-10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010). Минздрав России, 2010.
3. Размещение тяжелоионного коллайдера NICA на площадке ЛФВЭ ОИЯИ в г. Дубне с частичной реконструкцией здания № 1. Здание 17. Проектная документация. Разд. 5 «Сведения об инженерном оборудовании, о сетях инженерно-технического обеспечения, перечень инженерно-технических мероприятий, содержание технологических решений», подразд. 6 «Технологические решения». Кн. 2, часть «Расчеты по радиационной безопасности» 318Б-063-ИОС6.2. Т. 5.6.2. Дубна, 2011.
4. *Birattari C., Esposito A., Pelliccioni M., Rancati T., Silari M.* The Extended Range Neutron REM Counter “Linus” — Overview and Latest Developments // *Rad. Prot. Dos.* 1998. V. 76. P. 133–148.
5. *Olsher R. H., Hsu H. H., Berverding A., Kleck J. H., Casson W. H., Vasilik D. G., Devine R. T.* WENDI: An Improved Neutron REM Meter // *Health Phys.* 2000. V. 79. P. 170–181.
6. DFUMIL. Объединенный институт ядерных исследований. Лаборатория информационных технологий. Библиотеки программ. Пакеты прикладных программ сотрудников ОИЯИ. http://wwwinfo.jinr.ru/programs/jinrlib/catalog_jinr.php.
7. *Тимошенко Г. Н., Мартинкович Й.* Расчет функции чувствительности многошарового спектрометра нейтронов в области энергий до 20 МэВ. Препринт ОИЯИ Р16-2005-105. Дубна, 2005. 15 с.
8. Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External Radiation // *Ann. ICRP.* 1996. V. 26, No. 3/4.
9. *Pelliccioni M.* Overview of Fluence-to-Effective Dose and Fluence-to-Ambient Dose Equivalent Conversion Coefficients for High Energy Radiation Calculated Using the FLUKA Code // *Rad. Prot. Dos.* 2000. V. 88, No. 4. P. 279–297.
10. *Vega Carrillo H. R., Wehring B. W., Veinot K. G., Hertel N. E.* Response Matrix for a Multisphere Spectrometer Using a ^6LiF Thermoluminescence Dosimeter // *Rad. Prot. Dos.* 1999. V. 81, No. 2. P. 133–140.
11. *Pelliccioni M.* The Impact of ICRP Publication 92 on the Conversion Coefficients in Use for Cosmic Ray Dosimetry // *Rad. Prot. Dos.* 2004. V. 109, No. 4. P. 303–309.
12. *Fehrenbacher G., Gutermuth F., Kozlova E., Radon T., Schuetz R.* Neutron Dose Measurements with the GSI Ball at High-Energy Accelerators // *Rad. Prot. Dos.* 2007. V. 125, No. 1/4. P. 209–212.

Получено 20 декабря 2017 г.