

P16-2017-73

Ю. В. Мокров^{1,2}, С. В. Морозова¹,
Г. Н. Тимошенко^{1,2}, В. А. Крылов¹, О. Б. Бадунов¹

**ИССЛЕДОВАНИЕ АДЕКВАТНОСТИ ПОКАЗАНИЙ
ДОЗИМЕТРА НЕЙТРОНОВ НА ОСНОВЕ БОРНОГО
СЧЕТЧИКА В КОМБИНИРОВАННОМ ЗАМЕДЛИТЕЛЕ
АМБИЕНТНОЙ ДОЗЕ ЗА ЗАЩИТОЙ ИБР-2М**

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

² Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

Мокров Ю. В. и др.

P16-2017-73

Исследование адекватности показаний дозиметра нейтронов на основе борного счетчика в комбинированном замедлителе амбиентной дозы за защитой ИБР-2М

Представлены результаты исследований адекватности показаний дозиметра нейтронов на основе борного счетчика в комбинированном полиэтиленовом замедлителе амбиентному эквиваленту дозы за защитой ИБР-2М ЛНФ. Показано, что прибор может использоваться в качестве дозиметра амбиентной дозы с погрешностью, не превышающей 25 %, при проведении радиационного контроля на реакторе ИБР-2М. Среднее значение поправочного коэффициента к показаниям дозиметра за защитой таких реакторов равно 0,93.

Работа выполнена в Лаборатории радиационной биологии ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2017

Mokrov Yu. V. et al.

P16-2017-73

Research of the Correspondence of Indication of the Neutron Dosimeter Based on ^{10}B -Counter with a Moderator to the Ambient Dose in the Fields of IBR-2M

The calculated results of the correspondence of indication of the dosimeter based on the ^{10}B -counter with polyethylene moderator to the ambient dose equivalent behind the IBR-2M are presented. It was shown that the instrument can be used to measure the ambient dose with the uncertainty 25% in radiation monitoring at the reactor IBR-2M. The average value of the correction coefficient for this dosimeter behind the shield is 0.93.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2017

ВВЕДЕНИЕ

При работе различных ядерно-физических установок, например ядерных реакторов, возникает ионизирующее излучение за их защитой, которое состоит из нейтронов, фотонов, протонов и других частиц. Работающий на таких установках персонал подвергается воздействию этих частиц. Значительный, до 50 %, вклад в дозу облучения работников вносят нейтроны. Чаще всего это промежуточные, быстрые или тепловые нейтроны, энергия которых не превышает 20 МэВ.

Одним из самых эффективных и информативных видов радиационного контроля является дозиметрический контроль рабочих мест (ДКРМ). В связи с выходом новых международных и отечественных нормативных материалов, которые посвящены разнообразным аспектам радиационной безопасности, особое внимание уделяется решению этой задачи. Из них можно выделить «Рекомендации международной комиссии по радиационным единицам» (публикация 57 МКРЕ, 1998 и публикация 66 МКРЕ, 2001), «Рекомендации международной комиссии по радиобиологической защите» (публикации 60 МКРЗ, 1990 и 103 МКРЗ, 2009), которые явились основой отечественных «Норм радиационной безопасности — НРБ-99/2009» и «Основных санитарных правил обеспечения радиационной безопасности — ОСПОРБ-99/2010» [1, 2]. Методические указания 2.6.5.026-2016 «Дозиметрический контроль внешнего профессионального облучения. Общие требования» принадлежат к нормативным документам второго уровня. В этом документе наиболее развернуто изложены вопросы проведения дозиметрического контроля, в том числе ДКРМ.

В дозиметрии нейтронов большое распространение получили приборы, основанные на использовании детекторов тепловых нейтронов, помещенных в замедляющие среды различных размеров и конфигураций, чаще всего в полиэтилен.

Благодаря своим достоинствам такие приборы являются одними из основных при проведении ДКРМ.

1. ДОЗИМЕТР НА ОСНОВЕ БОРНОГО СЧЕТЧИКА В КОМБИНИРОВАННОМ ЗАМЕДЛИТЕЛЕ

По своим характеристикам наиболее близкими к дозиметрам являются приборы, имеющие толщину замедляющего слоя около 12 см. Эти приборы состоят из водородосодержащих замедлителей с детекторами тепловых нейтронов, находящимися внутри. Однако такой вид приборов имеет неудовлетворительную энергетическую зависимость чувствительности (ЭЗЧ) в области промежуточных нейтронов с энергией примерно до 100 кэВ — она выше требуемой зависимости, представленной на рис. 1.

На рис. 1 показана зависимость амбиентного $h^*(10)$ и индивидуального $h_p(10,0^\circ)$ эквивалентов дозы нейтронов на единичный флюенс на глубине 10 мм от энергии для фантома в виде плоской тканеэквивалентной пластины. ЭЗЧ дозиметра нейтронов должна быть подобна этой зависимости. По этой причине для улучшения ЭЗЧ внутри дозиметров располагают слои вещества, которое поглощает тепловые нейтроны. Это может быть кадмий в виде металлической прокладки или бор (борированная пластмасса). Если данные вещества присутствуют внутри замедлителя, то происходит поглощение тепловых нейтронов, которые образовались во внешних слоях замедлителя. Вследствие чего уменьшается чувствительность прибора к промежуточным нейтронам и ЭЗЧ становится более подходящей для дозиметра.

В ОИЯИ был создан дозиметр [3], который состоит из полиэтиленового замедлителя, внутри которого находится поглотитель тепловых нейтронов, содержащий слой кадмия толщиной 1 мм и расположенный на глубине 57 мм от поверхности. Такое расположение замедлителя обусловлено тем, что без внешнего замедлителя, который может сниматься, ЭЗЧ прибора примерно постоянна в области энергий нейтронов от тепловых до нескольких сотен кэВ. При этом без внешнего замедлителя прибор может использоваться как ра-

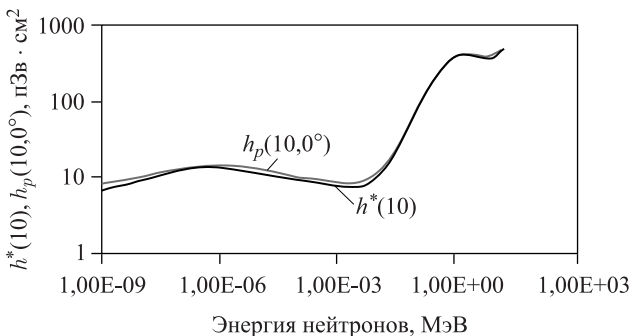


Рис. 1. Зависимость амбиентного и индивидуального эквивалентов дозы на единичный флюенс нейтронов

диометр нейтронов в этом диапазоне энергии. Цилиндрическая форма замедлителя обусловлена доступностью и простотой использования в качестве детекторов тепловых нейтронов счетчиков СНМ, имеющих цилиндрическую форму. Конструкция замедлителя представлена на рис. 2. На рис. 3 показана ЭЗЧ такого дозиметра [4].

Как видно из рис. 3, чувствительность дозиметра с комбинированным замедлителем все же отличается от требуемой энергетической зависимости. В связи с этим возникает задача определения адекватности показаний такого дозиметра действительному значению амбиентного эквивалента дозы при его использовании за защитой импульсного реактора ИБР-2М.

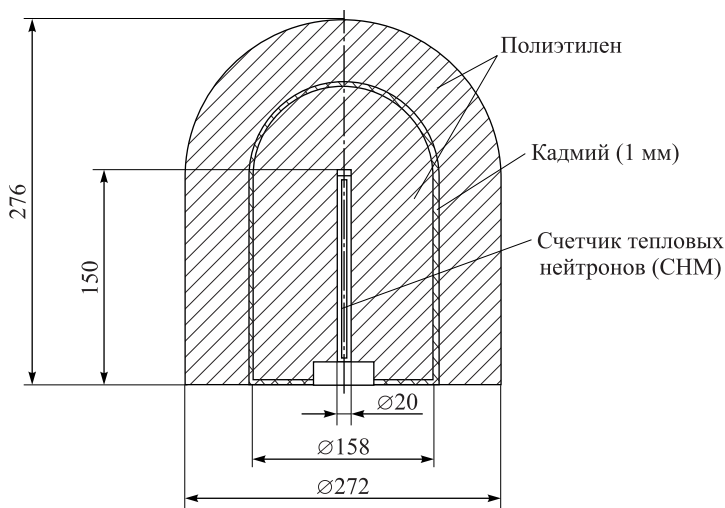


Рис. 2. Комбинированный замедлитель дозиметра нейтронов

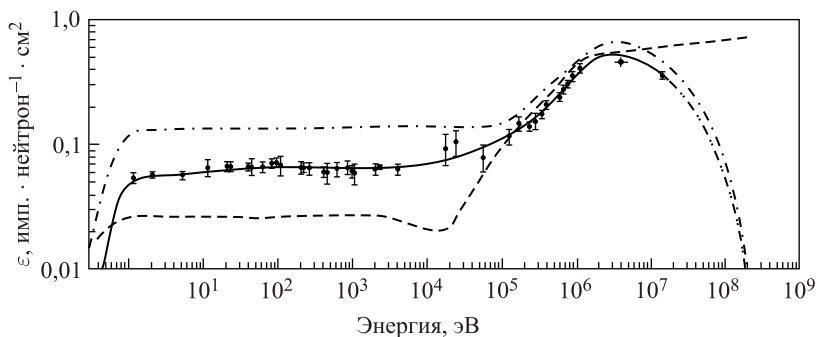


Рис. 3. ЭЗЧ дозиметра с комбинированным замедлителем

2. ИССЛЕДОВАНИЕ АДЕКВАТНОСТИ ПОКАЗАНИЙ ДОЗИМЕТРА И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ СПЕКТРЫ НЕЙТРОНОВ НА ИБР-2М

Отличие показаний исследуемого прибора в полях с различными спектрами нейтронов от значения AMBIENTНОГО эквивалента дозы $H^*(10)$ будет зависеть от спектра нейтронов в месте измерений. Чтобы получить численные значения этого отличия, для различных спектров нейтронов расчетным путем были определены и сравнивались между собой две величины:

— AMBIENTНЫЙ эквивалент дозы, который зарегистрировал рассматриваемый дозиметр нейтронов с чувствительностью $\varepsilon(E)$ в поле со спектром нейтронов $\Phi(E)$ — $H_m^*(10)$;

— действительное значение AMBIENTНОГО эквивалента дозы для этого спектра — $H_r^*(10)$.

Значение $H_m^*(10)$ рассчитывалось по формуле

$$H_m^*(10) = \frac{h_{\text{Pu-Be}}^*}{\varepsilon_{\text{Pu-Be}}} \int_{E_1}^{E_2} \varepsilon(E) \Phi(E) dE,$$

где E_1 и E_2 — границы энергетического диапазона спектра нейтронов; $\Phi(E)$ — энергетический спектр нейтронов (нейтрон/(МэВ · см²)); $\varepsilon_{\text{Pu-Be}}$ — чувствительность СНМ-14 в комбинированном замедлителе для источника Pu-Be (имп. · нейтрон⁻¹ · см²), равная по результатам градуировки 0,47 имп./ (нейтрон · см²); $h_{\text{Pu-Be}}^*$ — удельный AMBIENTНЫЙ эквивалент дозы нейтронов для источника Pu-Be, равный $3,8 \cdot 10^{-10}$ Зв · см².

Действительное значение AMBIENTНОГО эквивалента дозы рассчитывались по формуле

$$H_r^*(10) = \int_{E_1}^{E_2} h^*(10, E) \Phi(E) dE,$$

где $h^*(10, E)$ — зависимость удельного AMBIENTНОГО эквивалента дозы от энергии (Зв · см²).

Для сравнения $H_m^*(10)$ и $H_r^*(10)$ использовались значения коэффициента $K1$, равного отношению этих величин:

$$K1 = \frac{H_r^*(10)}{H_m^*(10)} = \frac{\int_{0,4 \text{ эВ}}^{20 \text{ МэВ}} h^*(10, E) \Phi(E) dE}{\frac{h_{\text{Pu-Be}}^*}{\varepsilon_{\text{Pu-Be}}} \cdot \int_{0,4 \text{ эВ}}^{20 \text{ МэВ}} \varepsilon(E) \Phi(E) dE}.$$

Коэффициент K_1 фактически является поправочным коэффициентом, на который нужно умножить показания прибора, чтобы получить действительное значение амбиентного эквивалента дозы в диапазоне от 0,4 эВ до 20 МэВ при измерениях в поле нейтронов с данным спектром $\Phi(E)$. Фактически значения этого коэффициента характеризуют методическую погрешность, с которой данный прибор измеряет амбиентный эквивалент дозы в указанном диапазоне энергии.

В данной работе измерены спектры нейтронов в двух точках экспериментального зала реактора ИБР-2М. С использованием ЭЗЧ прибора и полученных спектров рассчитаны значения коэффициента K_1 для этих точек.

Для измерения спектров нейтронов был использован портативный шаровой спектрометр. Сцинтилятор $\text{LiI}(\text{Eu})$, имеющий размер $\varnothing 4,3 \times 4$ мм и обогащенный ^6Li до 90 %, представляет собой детектор тепловых нейтронов спектрометра. В качестве замедлителей применялся набор полиэтиленовых сфер диаметрами 2, 3, 5, 8, 10, 12 дюймов, а также были проведены измерения с детектором без замедлителя и с детектором в кадмиевом чехле. Мониторинг поля нейтронов происходило с помощью пропорционального ^3He -счетчика в полиэтиленовом замедлителе. Для восстановления спектра нейтронов по показаниям спектрометра применялся набор функций чув-

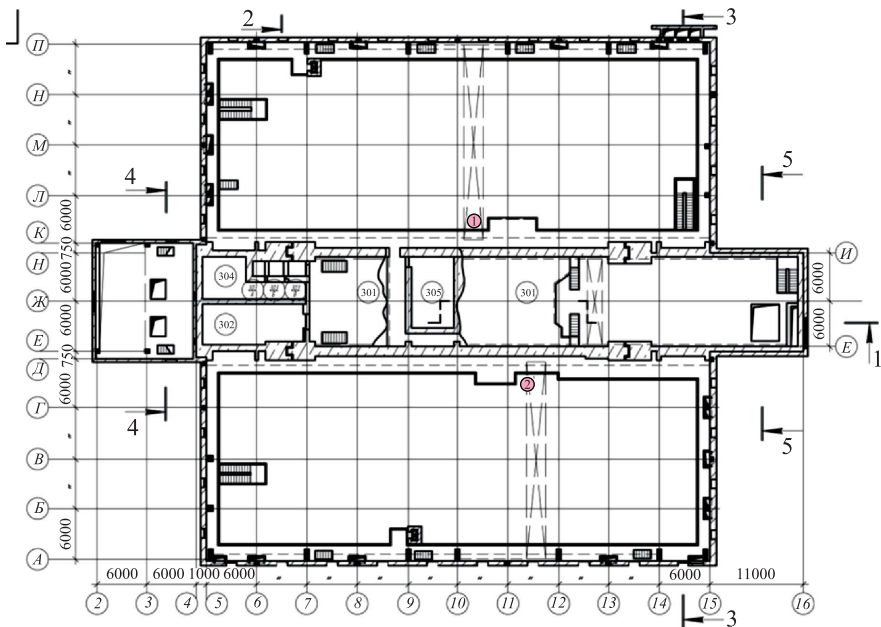


Рис. 4. Схема экспериментальных залов и точки измерений

ствительности. Восстановление спектра, т. е. решение обратной задачи, основано на методе статистической регуляризации. Программа реализует алгоритм численного решения системы алгебраизированных уравнений:

$$N_i = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \Phi(E) R_i(E) dE, \quad i = 1, \dots, m.$$

Здесь E_{\max} , E_{\min} — границы энергетического спектра $\Phi(E)$; $R_i(E)$ — функция чувствительности спектрометра с замедлителем i -го диаметра (имп. \times нейтрон $^{-1} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{МэВ}$); N_i — показания спектрометра (скорость счета, имп. $\cdot \text{с}^{-1}$). При восстановлении спектров использовались априорная информация для гладкости искомого спектра $\Phi(E)$ и ограничение спектра сверху энергией 20 МэВ.



Рис. 5. Точка измерений 1 в экспериментальном зале



Рис. 6. Точка измерений 2 в экспериментальном зале

Измерения спектров нейтронов проводились в двух точках экспериментальных залов реактора ИБР-2М. Реактор работал в штатном режиме, пучки нейтронов выводились в экспериментальные залы на исследовательские установки. На рис. 4 показана схема экспериментального зала реактора и расположение точек 1 и 2, в которых проводились измерения.

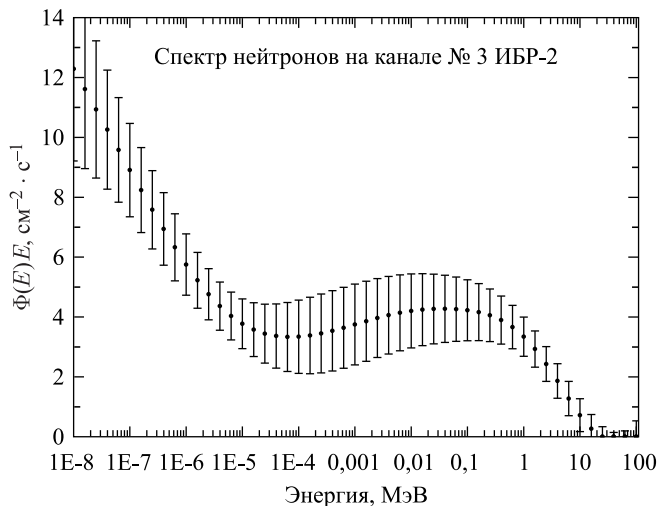


Рис. 7. Спектр нейтронов в точке 1

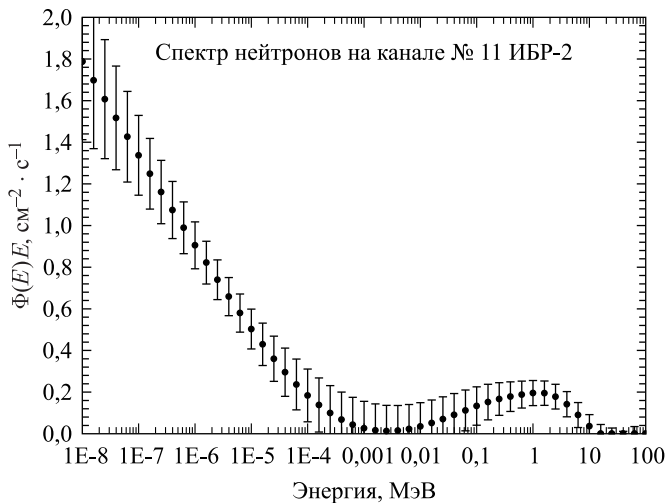


Рис. 8. Спектр нейтронов в точке 2

На рис. 5 представлено изображение места измерений в точке 1. Точка измерений находилась недалеко от разобранного канала вывода пучка нейтронов на экспериментальную установку в районе монитора нейтронов. При проведении измерений данный канал не работал.

На рис. 6 показано место измерений в точке 2. Точка измерений находилась на защите каналов вывода нейтронов на экспериментальные установки.

На рис. 7 и 8 показаны измеренные спектры нейтронов. Средняя энергия спектра в точке 1 равна 218 кэВ, в точке 2 она составляет 129 кэВ.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ВЫВОДЫ

В таблице показаны результаты расчетов коэффициента $K1$ в точках 1 и 2 в экспериментальных залах за защитой ИБР-2М. Также здесь приведены полученные ранее данные по расчету коэффициента $K1$ на реакторах ИБР-30 и ИБР-2, полученные как за защитой реакторов, так и в пучках нейтронов [5].

Результаты расчетов коэффициента $K1$ на реакторах ОИЯИ

Реакторы ОИЯИ	$K1$	Средняя энергия, МэВ
ИБР-2М, зал 2, канал 3, точка 1	0,88	0,22
ИБР-2М, зал 1, канал 11, точка 2	0,95	0,13
ИБР-30, спектр № 1, у защитной двери реактора	0,70	0,09
ИБР-30, спектр № 3, экспериментальный зал	0,93	0,21
ИБР-30, спектр № 5, экспериментальный зал	0,89	0,24
ИБР-2, спектр № 2, пучок № 2, 8 м от замедлителя	1,08	0,57
ИБР-2, спектр № 1, пучок № 2, на замедлителе	1,05	0,71
ИБР-30, спектр № 4, экспериментальный зал	1,08	0,79
ИБР-30, спектр № 2, за шибером канала № 6	0,84	1,18
Среднее значение коэффициентов на импульсных реакторах	0,93	

На основании представленных в таблице результатов можно сделать следующие выводы.

1. Все исследованные спектры имеют среднюю энергию не более 1 МэВ. Это свидетельствует о том, что поля за защитой импульсных реакторов ОИЯИ являются низкоэнергетическими и использование в качестве дозиметров нейтронов приборов с замедлителями и детекторами тепловых нейтронов является правомерным.

2. Несмотря на различие условий измерений и средних энергий спектров нейтронов на импульсных реакторах, значения $K1$ находятся в узком диапазоне — от 0,70 до 1,08. Это свидетельствует о том, что степень адекватности показаний исследуемого дозиметра амбиентному эквиваленту дозы за защитой

импульсных реакторов достаточно слабо зависит от условий формирования спектров нейтронов.

3. При этом среднее значение K_1 составляет 0,93. Максимальное отличие от среднего составляет +0,15 и -0,23. Таким образом, при введении поправки 0,93 в показания дозиметра дополнительная методическая погрешность измерения для большинства точек в среднем не превысит 17 %.

4. Если не вводить поправку в показания дозиметров, то методическая погрешность не превышает 25 %. Общая неопределенность дозы включает методическую погрешность, основную погрешность, которая определяется в результате поверки и не превышает 10 %, а также статистическую погрешность измерений. При этом следует иметь в виду, что согласно нормативным документам [6] относительный отклик прибора для нахождения амбиентного эквивалента дозы нейтронов составляет 0,5–2.

5. Следует учесть, что представленные результаты получены при калибровке дозиметра по плутоний-бериллиевому (Pu-Be) источнику. Если для калибровки будет использоваться другой источник нейтронов с другой средней энергией спектра, результаты могут получиться отличными от представленных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). СанПиН 2.6.1.2523-09. М., 2009.
2. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010). СП 2.6.1.2612-10. М., 2010.
3. Бучнев В. Н. и др. Сообщение ОИЯИ РЗ-85-428. Дубна, 1985. 4 с.
4. Бучнев В. Н., Комочков М. М., Мокров Ю. В. Сообщение ОИЯИ Р16-86-491. Дубна, 1986. 8 с.
5. Алейников В. Е., Бескровная Л. Г., Мокров Ю. В. // Письма в ЭЧАЯ. 2009. Т. 6, № 1(150). С. 124–133.
6. Методические указания 2.6.5.026-2016 «Дозиметрический контроль внешнего профессионального облучения. Общие требования».

Получено 27 октября 2017 г.

Редактор *А. И. Петровская*

Подписано в печать 19.12.2017.

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

Усл. печ. л. 0,75. Уч.-изд. л. 0,93. Тираж 170 экз. Заказ № 59299.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

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

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/