

# Поправочные коэффициенты при измерении мощности амбиентного эквивалента дозы нейтронов

Выполнены расчеты энергетической зависимости отклика наиболее широко используемых на атомных электростанциях (АЭС) России дозиметров нейтронов. Показано, что в отдельных случаях необходимо вводить поправочные коэффициенты при измерении величины мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД). Приводятся экспериментально апробированные величины поправочных коэффициентов для измерения МАЭД в помещениях АЭС с ВВЭР-1200.

## **Ключевые слова:**

*нейтроны, спектр, дозиметр, реактор, АЭС.*

**А.Г.Алексеев, В.А.Пикалов**

(«НИИ Курчатовский институт» – ИФВЭ, г. Протвино Московской обл.)

**П.А.Алексеев**

(АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», г. Обнинск Калужской обл.)

Для контроля радиационной обстановки используются результаты измерения мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) [1]. Для каждого вида излучения (гамма, нейтроны, бета) и вида контролируемой величины (МАЭД, мощность направленной эквивалентной дозы и др.) рекомендованы пределы относительной погрешности измерений.

Стандарт МЭК [2] указывает на то, что «для целей радиационной защиты желательно было бы, чтобы изменение отклика нейтронного дозиметра (при изменении энергии нейтронов) не превышало фактора 1,5», но при этом подчеркивает, что «на момент публикации

такое требование практически не достижимо». В частности, для измерения МАЭД нейтронного излучения требуется [2], чтобы изменение относительного отклика дозиметра в диапазоне энергий от тепловой до 50 кэВ не выходило из интервала 0,2–8, в диапазоне от 50 кэВ до 10 МэВ находилось в интервале 0,5–2, а в диапазоне от 10 до 20 МэВ в интервале 0,2–2,0. Требование для диапазона энергии нейтронов от 50 кэВ до 10 МэВ является обязательным для каждого прибора. Тем не менее, чтобы обеспечить выполнение вышеуказанных требований, можно использовать поправочные коэффициенты, учитывающие отличие спектральных характеристик в реальном поле излучения от спектра нейтронов излучения рабочего эталона, который используется для калибровки нейтронных дозиметров.

В данной работе определены поправочные коэффициенты для наиболее широко используемых дозиметров нейтронов для измерения МАЭД при проведении ра-



**Рис.1.** Блок детектирования БДКН-96.

диационного мониторинга на АЭС. Необходимость таких данных возникает, когда сравниваются результаты измерений МАЭД нейтронного излучения, полученных в одних условиях, но разными средствами измерения (СИ).

Цель данной работы – определение поправочных коэффициентов для средств измерения МАЭД нейтронного излучения в условиях гермообъема АЭС с ВВЭР. Эти коэффициенты авторы используют при выполнении проверки эффективности биологической защиты реакторной установки при пуске новых энергоблоков.

### Метод измерения

Наиболее широко на российских АЭС используются два типа радиометра-дозиметра для измерения МАЭД нейтронов: ДКС-96Н (НПП «Доза», <http://www.doza.ru>) и МКС-1117 (НПУП «Атомтех», г. Минск, Респ. Беларусь, <https://atomtex.com>).



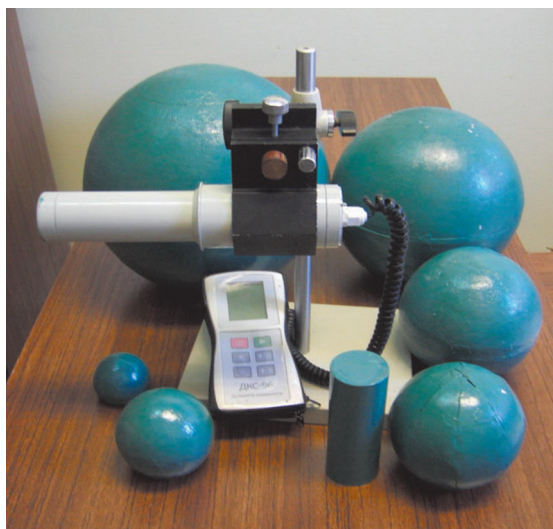
**Рис.2.** Блок детектирования БДМН-96.

Как правило, дозиметры комплектуются двумя или более блоками детектирования для измерения МАЭД нейтронов. На рис. 1–5 приведены блоки детектирования. ДКС-96Н комплектуется блоками детектирования БДКН-96 и БДМН-96, МКС-1117 блоками БДКН-01, БДКН-03 и БДКН-6. Для исследовательских целей, в том числе для определения спектра нейтронов, используют блоки детектирования с набором полиэтиленовых замедлителей, например: БДКН-6 [3] и ДСН-02 [4].

Стандартными блоками детектирования для измерения МАЭД нейтронов являются БДМН-96 и БДКН-03. Но часто, особенно для трудных условий измерения (с точки зрения доступности), предпочтительным является использование блоков детектирования более легких



**Рис.3.** Блоки детектирования БДКН-01 и БДКН-03.



**Рис.4.** Дозиметр-спектрометр нейтронов ДСН-02.



**Рис.5.** Блок детектирования БДКН-05д.

и меньшего размера. Так, при проведении проверки эффективности биологической защиты при пуске новых энергоблоков типа ВВЭР-1200 (Нововоронежская АЭС-2, Белорусская АЭС) авторами использовался блок детектирования БДКН-05д с замедлителем диаметром 127 мм (5 дюймов) из комплекта ДСН-02 (рис.5).

### Объект исследования

Были выполнены расчеты энергетической зависимости отклика дозиметра МКС-1117 с блоками детектирования БДКН-01 и БДКН-03 и дозиметра ДКС-96Н с блоками детектирования БДМН-96, БДКН-05д к нейтронам. Для расчета использовалась Монте-Карловская программа *MCNPX* [5]. Во всех указанных блоках детектирования метод измерения основан на

регистрации замедленных (тепловых) нейтронов с использованием реакций захвата на ядрах  ${}^6\text{Li}$  (БДМН-96, БДКН-05д) или на ядрах  ${}^3\text{He}$  (БДКН-01 и БДКН-03). При расчете использовалась свертка сечения реакции (в зависимости от энергии нейтронов) с распределением по энергии средней плотности потока нейтронов в чувствительной области (функция  $F_4$  в *MCNP*). Чувствительная область для БДКН-01 и БДКН-03 – газовый объем счетчика, для БДМН, БДКН-05д – детектор, представляющий из себя компаунд из смеси сцинтиллятора  $\text{ZnS}$  и  ${}^6\text{LiF}$ .

Расчитанная энергетическая зависимость отклика дозиметра с блоком детектирования в диапазоне энергий от  $10^{-8}$  до 15 МэВ нормировалась в единицах МАЭД,

так же, как это делается для реального средства измерения (СИ). Для дозиметров нейтронов, как правило, выполняется калибровка (поверка) с использованием рабочего эталона ( $\text{Pu-Be}$  источник в коллиматоре установки УКПН). На рис. 6–11 приведены конструкции и расчетные модели по программе *MCNP* блоков детектирования БДКН-01, БДКН-03, БДМН.

### Результаты

На рис. 12–15 приведены результаты расчетов энергетической зависимости отклика дозиметра с различными блоками детектирования. Для сравнения приведена зависимость  $H^*(10)/f(H^*(10)) - \text{МАЭД}$ ,  $f$  – плотность потока нейтронов. Для дозиметра МКС-1117 с БДКН-01 и БДКН-03 приведены данные

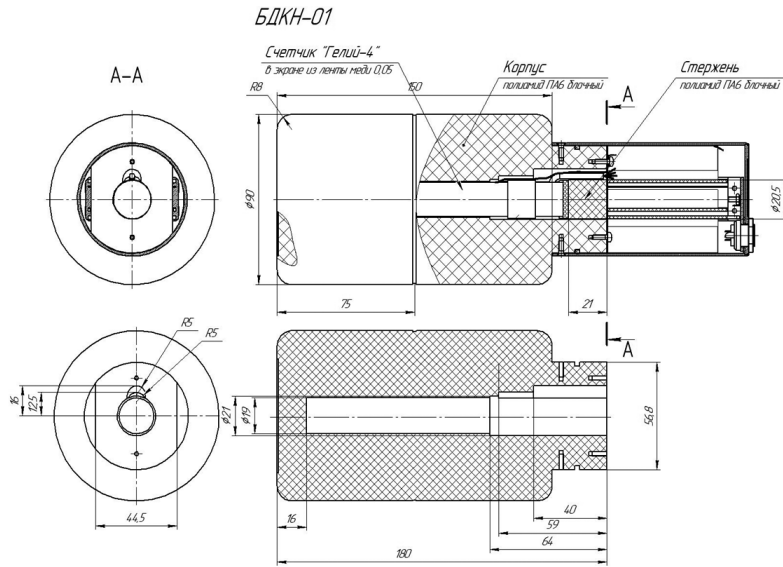


Рис.6. БДКН-01 – сборочный чертеж.

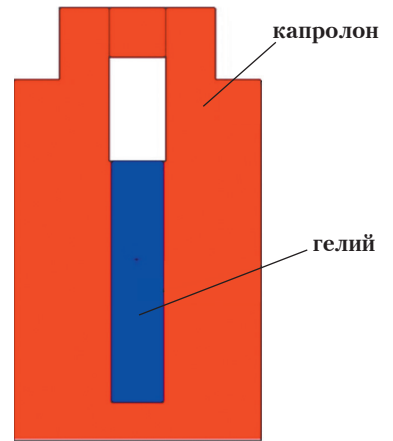


Рис.7. БДКН-01 – модель для расчета.

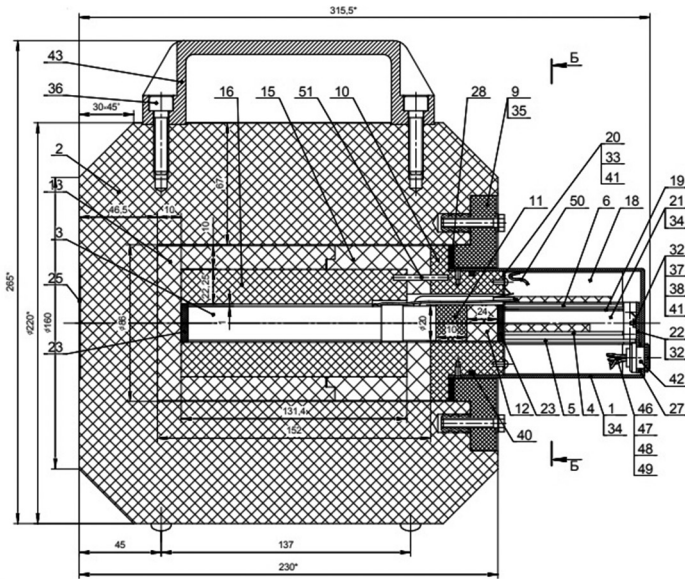


Рис.8. БДКН-03 – сборочный чертеж.

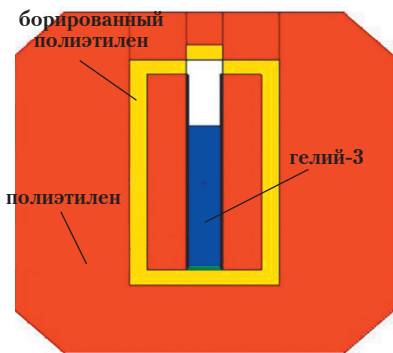


Рис.9. БДКН-03 – модель для расчета.

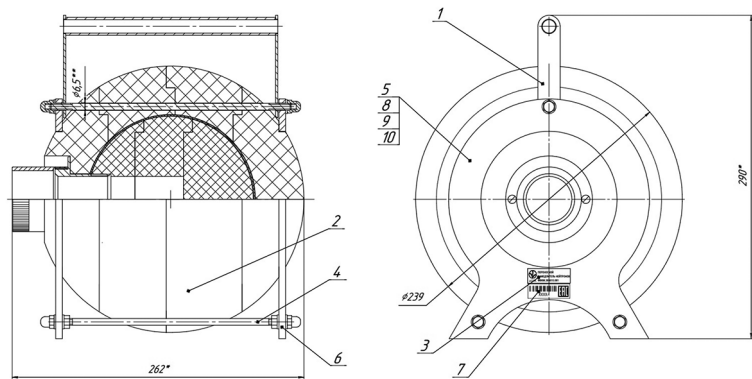
по поправочным коэффициентам для измерения МАЭД нейтронов из методики радиационного контроля [6].

Блок детектирования БДКН-01 имеет несимметричную форму, и детектор (гелиевый счетчик) имеет не точный размер, поэтому, как и следовало ожидать, расчеты показали, что эффект ани-

зотропии отклика для разных направлений падения нейтронов может быть выше 50%.

В реальном спектре тепловые нейтроны дают относительно более низкий вклад в МАЭД, чем их относительный вклад в отклик дозиметра МКС-1117 с блоком детектирования БДКН-01. Поэтому при сильном изменении вклада тепловых нейтронов в суммарную плотность потока нейтронов МАЭД может практически не измениться, а отклик дозиметра МКС-1117 с блоком детектирования БДКН-01 изменится значительно заметнее.

В БДКН-05д, при практически одинаковых массогабаритных характеристиках с БДКН-01, исключено влияние тепловых нейтронов на отклик дозиметра за счет поглощения тепловых нейтронов кадмиевой оболочкой. Кроме того, БДКН-05д изготовлен из полиэтилена,



**Рис.10.** БДМН-96 – сборочный чертеж.

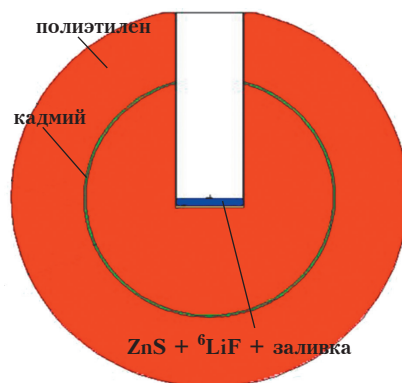
когда БДКН-01 – из капролона (весовое содержание водорода в два раза ниже) – это сказывается на виде зависимости энергетического отклика дозиметра с этими блоками детектирования.

Дозиметр МКС-1117 с блоком детектирования БДКН-03 обладает большей анизотропией к нейтронам с энергией ниже 0,01 МэВ, чем дозиметр ДКС-96Н с блоком детектирования БДМН-96. Расчеты показывают, что при энергиях нейтронов ниже 0,01 МэВ разница в отклике дозиметра при углах падения нейтронов 0° и 90° может составлять до 100%. В стандарте [2] данная величина не должна превышать 25%, хотя не уточняется, для какого энергетического диапазона. Указывается только, что в «рабочем» диапазоне энергий. «Рабочий» диапазон энергий – заявленный производителем диапазон энергий.

Как было указано в [7], в условиях гермообъема АЭС с ВВЭР отклик дозиметра

ДКС-96 с блоком детектирования БДМН-96 может быть выше, чем отклик дозиметра МКС-1117 с блоком детектирования БДКН-03, на 100–200% (рис.15). При этом в данных условиях дозиметр ДКС-96 с блоком детектирования БДМН-96 может завышать результат измерения МАЭД примерно на 10–30%.

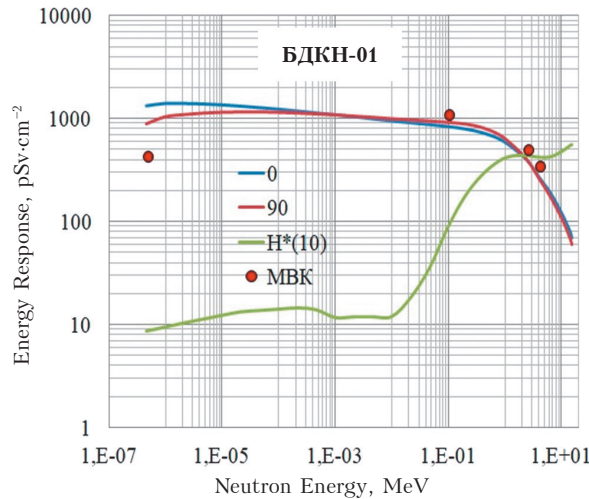
Для ДКС-96 с блоком детектирования БДКН-96 для спектров нейтронов на АЭС выполнена оценка поправочного коэффициента для измерения МАЭД. Использовались полученные расчетным путем энергетические зависимости отклика к нейтронам, измеренные спектры нейтронов для помещений гермообъема на Балаковской АЭС [7] и спектр нейтронов утечки из контейнера для пускового источника нейтронов (ПИН), который используется на плавучей атомной станции (ПАЭС). В качестве источника в ПИН используется Sb-Be источник. На рис.15



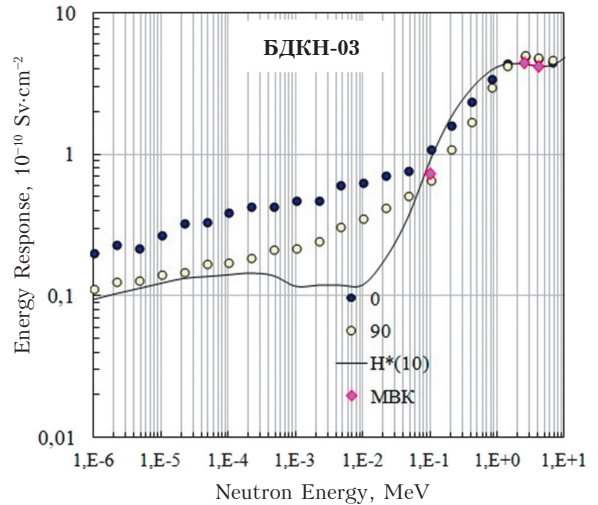
**Рис.11.** БДМН-96 – модель для расчета.

приведена конструкция контейнера, внутренние полости которого заполнены парафином с борной кислотой. На рис.16 приведен расчетный спектр утечки нейтронов из этого контейнера в сравнении со спектром Pu-Be источника в установке УКПН (обычно используется как рабочий эталон для калибровки (поверки)). Значение поправочного коэффициента для измерения МАЭД нейтронов для помещений ГО составило 0,84, для спектра утечки нейтронов из контейнера – 0,88.

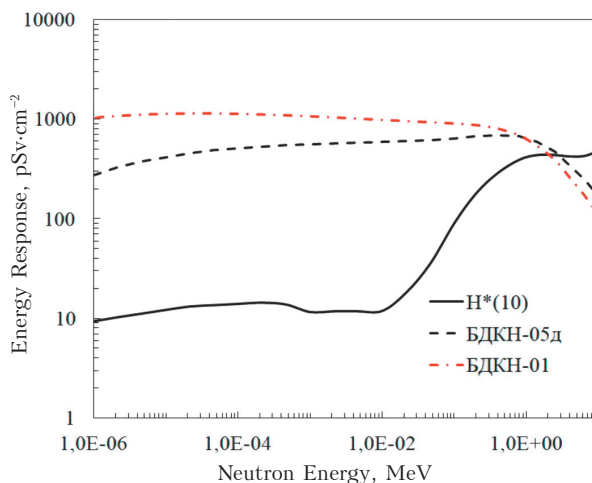
Опыт выполнения исследований (работы выполнялись ООО «АПИ» с 2009 г. по настоящее время) по проверке эффективности биологической защиты при пусках новых энергоблоков АЭС показал, что использование БДКН-05Д значительно удобнее в сложных условиях измерений в помещениях ГО. Поэтому был проведен анализ результатов измерений для



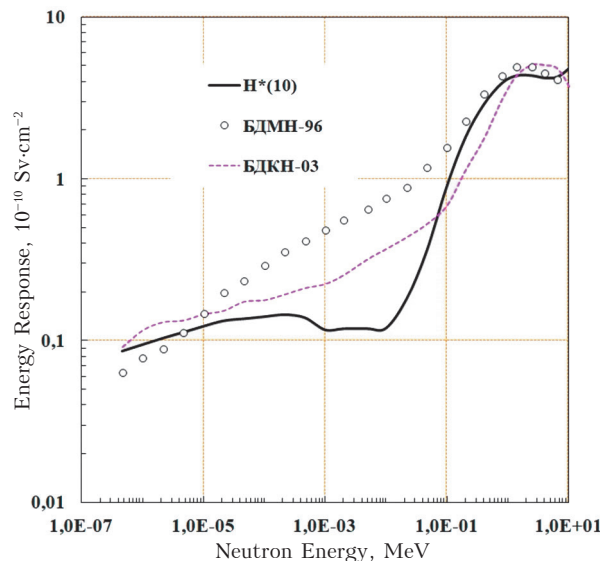
**Рис.12.** Энергетическая зависимость отклика дозиметра с блоком детектирования БДКН-01 к нейтронам, «0» – пучок нейтронов вдоль оси БД, «90» – поперек оси; MBK – данные из [6].



**Рис.13.** Энергетическая зависимость отклика дозиметра с блоком детектирования БДКН-03 к нейтронам, «0» – пучок нейтронов вдоль оси БД, «90» – поперек оси; MBK – данные из [6].



**Рис.14.** Энергетическая зависимость отклика дозиметра с блоками детектирования БДКН-05д и БДКН-01 к нейтронам. Для сравнения приведен АЭД.



**Рис.15.** Энергетическая зависимость отклика дозиметра с блоками детектирования БДМН-96 и БДКН-03 к нейтронам. Для сравнения приведен АЭД.

обоснования использования в таких испытаниях дозиметра ДКС-96 с БДКН-05д вместо БДМН-96. В анализе учитывались измерения, выполненные на Первичном государственном эталоне (эталонных нейтронных полях) во ВНИИФТРИ, на уста-

новках НИЦ «Курчатовский институт», при пуске 1-го и 2-го энергоблоков Нововоронежской АЭС-2.

В табл.1 представлены по отношению показаний дозиметра ДКС-96 с блоками детектирования БДКН-05д и

БДМН-96 для разных условий и спектров нейтронов.

Окончательно данные по поправочному коэффициенту для измерения МАЭД дозиметром ДКС-96 с блоком детектирования БДМН-96 и блоком детектирования БДКН-05д с полиэтиленовым

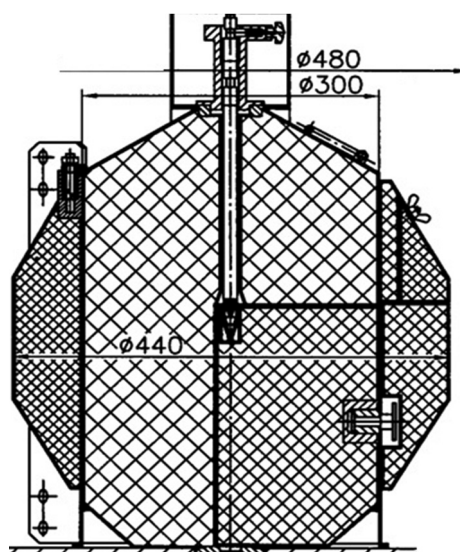


Рис.16. Контейнер для перемещения ПИН.

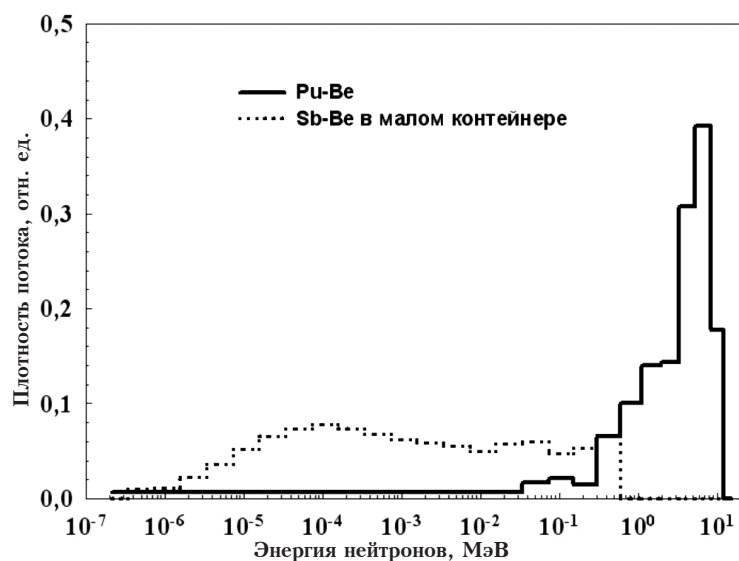


Рис.17. Спектр нейтронов рядом с контейнером для ПИН. Для сравнения приведен спектр нейтронов Pu-Be источника в установке УКПН.

Табл.1. Экспериментальные результаты.

N	Описание условий измерений	Отношение показаний, БДКН-05д/БДМН-96	Примечание
1	Установка УКПН, источник $^{238}\text{Pu-Be}$ в коллиматоре	0,74*	Условия Первичного государственного эталона, ВНИИФТРИ [4]
2	Установка УКПН, источник $^{238}\text{Pu-Be}$ в коллиматоре Дополнительный замедлитель – тяжелая вода Конус длиной 15 см	0,95	
3	Установка УКПН, источник $^{238}\text{Pu-Be}$ в коллиматоре. Дополнительный замедлитель – тяжелая вода. Конус длиной 10 см.	0,90	
4	В пучке реактора ОР НИЦ КИ	0,80	[8]
5	За защитой реактора ОР НИЦ КИ (3 точки)	от 3,8 до 4,6	
6	За защитой реактора ИР-8 НИЦ КИ (10 точек)	от 3,8 до 6,4	
7	За защитой циклотрона У-150 НИЦ КИ (3 точки)	от 4,0 до 8,7	
8	В помещениях ГО 3-го энергоблока Балаковской АЭС	от 7 до 7,8	[7]
В помещениях ГО Нововоронежская АЭС-2			
9	В помещениях парогенераторов, в помещениях рядом с улиткой ГЦНА (главного циркуляционного агрегата)	4,5	Измерения выполнены во время пуска энергоблока 1, 2 НВАЭС-2.
10	Рядом с патрубками ГЦТ (главного циркуляционного трубопровода)	4	
11	На площадках обслуживания верхнего блока (ВБ) реактора	5	
12	На площадках обслуживания ГЦНА	6,5	

\*Примечание: калибровка (поверка) дозиметра ДКС-96 проводилась с блоком детектирования БДМН-96. Таким образом, приведены результаты измерения отклика ДКС-96 с блоком детектирования БДКН-05д, но с калибровкой с блоком детектирования БДМН-96.

**Табл.2.** Рекомендации по поправочному коэффициенту для измерений с ДКС-96 с блоком детектирования БДКН-05д (полиэтиленовый сферический замедлитель диаметром 127 мм с кадмиевой оболочкой) при проведении проверки эффективности биологической защиты новых блоков АЭС с ВВЭР-1200.

Точка измерения в помещениях ГО	Отношение	Поправочный коэффициент
У патрубков ГЦТ	4	0,25
У улитки ГЦНА и у парогенераторов	4,5	0,22
Верхний блок реактора	5	0,2
У площадки обслуживания ГЦНА	7,2	0,14
На переходной лестнице от отметки +0.000 до +26.4 и на краю шахты реактора на отметке +26.4	7	0,14

сферическим замедлителем диаметром 127 мм с кадмиевой оболочкой были апробированы при пуске 1-го энергоблока Белорусской АЭС при выполнении работ по проверке эффективности биологической защиты. В табл.2 приведены рекомендации по поправочному коэффициенту для измерений МАЭД.

### Заключение

Выполнены расчеты зависимости отклика от энергии нейтронов наиболее широко используемых блоков детектирования для измерения МАЭД при проведении радиационного мониторинга на АЭС. Для условий измерения в помещениях ГО АЭС с ВВЭР можно рекомендовать следующие величины поправочных коэффициентов для измерения

МАЭД нейтронного излучения: для дозиметра ДКС-96 с БДМН-96 – 0,75...0,9; для дозиметра МКС-1117 с БДКН-03 – 1,3...1,5; для дозиметра ДКС-96 с БДКН-05д – 0,14...0,25. Величины поправочных коэффициентов для дозиметра ДКС-96 с блоком детектирования БДКН-05д определены как расчетным, так и экспериментальным способом.

Для дозиметра МКС-1117 с блоком детектирования БДКН-01 расчетным способом определить поправочный коэффициент для конкретного места измерения сложно, так как невозможно прогнозировать вклад тепловых нейтронов в величину плотности потока нейтронов, к которым данный блок детектирования особенно чувствителен, в от-

личие от ДКС-96Н с блоком детектирования БДКН-05д, который имеет кадмиевый экран.

Таким образом, поправочный коэффициент для измерений МАЭД нейтронов с помощью дозиметра МКС-1117 с блоком детектирования БДКН-01 может быть определен только экспериментальным способом для конкретной точки измерения.

Работа выполнена в рамках контрактов ООО «Атом-ПромИнжиниринг» и при непосредственном участии А.Ю.Соколова (ген. директора ООО «АПИ»). Отдельная благодарность Н.Н.Бараненкову за проведение измерений, К.Нурлыбаеву за ценные замечания при подготовке статьи.



## Литература

1. Контроль радиационной обстановки. Общие требования. Методические указания МУ 2.6.5.008-2016. М., 2018.
2. Стандарт МЭК. IEC 61005:2014. Radiation protection instrumentation – Neutron ambient dose equivalent (rate) meters.
3. М. Pyshkinaa, A. Vasilyev, A. Ekidin, E. Nazarov, V. Nikitenko, A. Pudovkin. Study of neutron energy and directional distribution at the Beloyarsk NPP selected workplaces/Nuclear Engineering and Technology. URL: <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.10.015> (дата обращения 31.08.2021).
4. Алексеев А.Г., Пикалов В.А., Суманеев О.В., Косьяненко Е.В., Бритвич Г.И., Спилов Е.Г., Кирякова Н.В., Глазунов С.А., Александров В.В., Пономарев С.Ф., Куликов А.П., Масляев П.Ф. Измерение спектров нейтронного излучения на рабочих местах разделительного производства завода по обогащению урана // АНРИ. 2005. N 4(43). С. 49-60.
5. В. Denise Pelowitz. MCNPX User's Manual. Version 2.6.0, April 2008 LA-CP-07-1473. URL: [https://mcnp.lanl.gov/pdf\\_files/la-ur-11-02295.pdf](https://mcnp.lanl.gov/pdf_files/la-ur-11-02295.pdf) (дата обращения: 21.0.2021).
6. Методика контроля индивидуального эквивалента дозы персонала Белорусской АЭС. МВК-12.10.9-19. М.: ВНИИАЭС, 2019.
7. Алексеев А.Г., Алексеев П.А., Пикалов В.А. Методические рекомендации по измерению индивидуальных эквивалентных доз облучения нейтронным излучением персонала Балаковской АЭС // Евразийский Союз Ученых (ЕСУ). 2020. N 4(73). С. 9-14.
8. Алексеев А.Г., Алексеев П.А., Янович А.А. Измерение спектров нейтронов за биологической защитой реакторов и ускорителя НИЦ «Курчатовский институт» // Евразийский Союз Ученых (ЕСУ). 2019. N 10(67). С. 10-16.

## Correction Coefficients for Measuring the Ambient Dose Equivalent Rate of Neutrons

Alexeev Alexander, Pikalov Vladimir (NRC «Kurchatov Institute» – ИИЯЭ, Протвино, Московская область, Россия)

Alexeev Pavel (State Scientific Centre of the Russian Federation – Leypunsky Institute for Physics and Power Engineering, Joint-Stock Company, Obninsk, Kaluga region, Russia)

**Abstract.** Calculations of the response for the most widely used neutron dosimeters at the Russian nuclear power plant (NPP) have been performed. It is shown that in some cases it is necessary to introduce a correction for the measured value of the ambient dose equivalent rate (AEDR). The experimentally tested values of the correction for measuring AEDR in the containment rooms of NPP with VVER-1200 are given.

**Key words:** neutrons, spectrum, dosimeter, reactor, NPP.

А.Г.Алексеев (с.н.с.), В.А.Пикалов (вед.инж.) – «НИЦ Курчатовский институт» - ИФВЭ, г. Протвино Московской обл.

П.А.Алексеев (к.т.н., с.н.с.) – АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», г. Обнинск Калужской обл.

Контакты: тел. +7 4967 713827; e-mail: ALEXEEV@ihep.ru.