

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЗАВИСИМОСТИ ФОРМЫ СПЕКТРА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ У ВНЕШНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ КОРПУСА ВВЭР-1000**В. Л. Демехин, В. Н. Буканов, А. М. Пугач, Е. Г. Васильева***Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев*

С помощью специально разработанного математического аппарата проанализированы массивы величин соотношений удельных активностей нейтронно-активационных детекторов, облучавшихся на внешней поверхности корпусов ВВЭР-1000 в течение ряда топливных кампаний энергоблоков АЭС Украины. Показано, что форма спектра нейтронов у внешней поверхности корпуса реактора на уровне его верхней обечайки зависит от азимутальной координаты и не зависит от высотной.

Согласно правилам и нормам, действующим в атомной энергетике, на каждом энергоблоке с реактором ВВЭР должен вестись учет флюенса быстрых нейтронов на корпус реактора (КР) с момента пуска-наладочных работ [1]. Конструкция реактора ВВЭР-1000 практически исключает возможность прямого экспериментального определения условий облучения КР, в частности флюенса нейтронов. Для решения этой задачи применяются специальные методики [2, 3], которые включают расчеты функционалов нейтронного потока (ФНП) в околокорпусном пространстве (ОКП) реактора и дозиметрические измерения у внешней поверхности КР. Экспериментальные данные, получаемые нейтронно-активационным методом в ходе дозиметрических измерений, используются для обоснования достоверности результатов определения условий облучения КР. Суть обоснования заключается в сравнении расчетных и экспериментальных значений ФНП у внешней поверхности КР.

Очевидно, что чем больше нейтронно-активационных детекторов (НАД) облучается у внешней поверхности КР, тем больше экспериментальных данных может быть получено и, следовательно, сравнение может быть проведено в большем количестве пространственных точек. С другой стороны, увеличение количества облучаемых детекторов приводит к росту объемов активационных измерений и, следовательно, к удлинению периода получения данных об условиях облучения КР. Поэтому представляется важным оптимизировать как количество НАД, так и схему их размещения у внешней поверхности корпуса.

Для решения этой задачи необходимо наличие представительной информации о поле нейтронов в ОКП реактора, прежде всего – у внешней поверхности корпуса. Такая информация может быть получена в результате рассмотрения и всестороннего анализа результатов дозиметрических измерений, выполненных на всех энергоблоках с реакторами ВВЭР-1000.

Следует, прежде всего, отметить, что, ряд общих закономерностей поведения нейтронного поля у внешней поверхности корпуса ВВЭР-1000 достаточно хорошо изучен как в рамках работ, выполненных специалистами ИЯИ НАН Украины [3 - 5], так и зарубежными исследователями (см., например, [6 - 8]). Это, в частности, общий вид азимутального распределения в толще металла КР и за его внешней поверхностью линейных ФНП, к которым, в частности, относятся флюенсы, числа смещения на атом, удельные активности и т.п. Такое распределение в каждом 60-градусном секторе симметрии реакторной установки имеет глобальный и локальный минимумы с координатами ~ 30 и $\sim 0^\circ$ (60°) соответственно и два максимума с координатами $5 - 9^\circ$ и $51 - 55^\circ$. Положения экстремумов зависят, прежде всего, от параметров топливной загрузки, а также от типа ФНП и рассматриваемого высотного уровня активной зоны (АКЗ).

Важным параметром нейтронного поля у внешней поверхности корпуса ВВЭР-1000 является форма спектра нейтронов. Следовательно, исследования азимутальной зависимости

этого параметра у внешней поверхности КР как для отдельной топливной кампании, так и для ряда кампаний могут дать важную информацию, необходимую при решении задачи оптимизации схемы установки активационных детекторов.

Форма спектра нейтронов до некоторой степени может быть охарактеризована спектральными индексами, т.е. величинами отношений интегральных плотностей потока нейтронов (ППН) выше определенных энергий. Учитывая взаимосвязь между интегральными ППН и скоростями реакций активации НАД [9], отношения последних пропорциональны спектральным индексам и, следовательно, являются характеристиками формы спектра.

В работах [10, 11] с использованием специально разработанной методики анализа результатов дозиметрических измерений у внешней поверхности КР энергоблока № 1 ХАЭС было показано, что для отдельной кампании изменчивость соотношений скоростей реакций активации НАД в различных точках у внешней поверхности КР лежит на уровне статистических погрешностей спектрометрических измерений, т.е. составляет единицы процентов. Того же порядка и отличия средних значений соотношений для разных кампаний. Анализ схем установки, условий облучения и измерения НАД показал, что указанные отличия могут возникать в случае, если форма спектра быстрых нейтронов у внешней поверхности корпуса ВВЭР-1000 незначительно зависит от координат мест, где располагались активационные детекторы. Это предположение потребовало проведения дополнительного анализа имеющегося массива экспериментальных данных. На этом этапе использовались результаты активационных измерений НАД из ниобия, железа и меди. Такой выбор был обусловлен следующими основными причинами:

активности продуктов реакций $^{93}\text{Nb}(n,n')^{93}\text{mNb}$, $^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$, и $^{63}\text{Cu}(n,\alpha)^{60}\text{Co}$ слабо зависят от изменения ППН у внешней поверхности КР, которое связано с перераспределением на протяжении топливной кампании поля энерговыделения в АКЗ реактора [12]; следовательно, удельные активности указанных НАД практически пропорциональны усредненным за кампанию скоростям реакций активации;

использование трех реакций делает возможным нахождение статистических выбросов в значениях удельных активностей.

Для отдельной топливной кампании на определенной высоте у внешней поверхности КР отношения удельных активностей двух НАД разных типов r_1 и r_2 есть функция только азимутального угла ϑ_i точки, где они располагались:

$$\beta_{r_1 r_2}(\vartheta_i) = \frac{A_{r_1}^{\text{exp}}(\vartheta_i)}{A_{r_2}^{\text{exp}}(\vartheta_i)}, \quad i = \overline{1, N^d}, \quad (1)$$

где N^d – количество комплектов НАД на рассматриваемой высоте.

Случайная составляющая относительной погрешности отношений удельных активностей двух НАД задается формулой

$$\frac{\Delta \beta_{r_1 r_2}(\vartheta_i)}{\beta_{r_1 r_2}(\vartheta_i)} = \sqrt{\left(\frac{\Delta A_{r_1}^{\text{exp}}(\vartheta_i)}{A_{r_1}^{\text{exp}}(\vartheta_i)} \right)^2 + \left(\frac{\Delta A_{r_2}^{\text{exp}}(\vartheta_i)}{A_{r_2}^{\text{exp}}(\vartheta_i)} \right)^2}, \quad (2)$$

где $\Delta A_{r_1}^{\text{exp}}(\vartheta_i)$ – случайная составляющая погрешности определения удельной активности НАД типа r_1 , располагавшегося в точке с азимутальной координатой ϑ_i .

Как известно из теории вероятности [13], для проверки соответствия функции $F(\vartheta)$ набору экспериментальных точек $\{\beta_{r_1 r_2}(\vartheta_i)\}$ используют критерий χ^2 . Его значение рассчитывается по формуле

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{N^d} \left(\frac{\beta_{r_1 r_2}(\vartheta_i) - F(\vartheta_i)}{\Delta \beta_{r_1 r_2}(\vartheta_i)} \right)^2. \quad (3)$$

Постоянство формы спектра быстрых нейтронов у внешней поверхности КР означает независимость отношений (1) от азимутальной координаты. В этом случае минимизация выражения (3) приводит к решению

$$F \equiv \text{const} = \bar{\beta}_{r_1 r_2} = \frac{\sum_{i=1}^{N^d} \beta_{r_1 r_2}(\vartheta_i)}{\sum_{i=1}^{N^d} \Delta \beta_{r_1 r_2}^2(\vartheta_i)} \Big/ \frac{1}{\sum_{i=1}^{N^d} \Delta \beta_{r_1 r_2}^2(\vartheta_i)}. \quad (4)$$

Для ряда топливных кампаний энергоблоков АЭС Украины, в течение которых проводились дозиметрические измерения у внешней поверхности КР, были рассчитаны средневзвешенные величины наборов отношений удельных активностей различных типов НАД, облучавшихся на разной высоте, $\bar{\beta}_{r_1 r_2}$ и соответствующие значение χ^2 . Некоторые результаты приведены в таблице. Как можно видеть, в половине случаев расчетное значение χ^2 больше табличного для 95 %-ного уровня доверительной вероятности. Более детальный анализ показывает, что хотя в наборах этих отношений иногда и встречаются статистические выбросы, но их исключение принципиально не меняет полученную картину. Это дает возможность однозначно утверждать, что форма спектра быстрых нейтронов у внешней поверхности корпуса ВВЭР-1000 не является постоянной.

Вид функциональной зависимости $F(\vartheta)$ можно определить из следующих соображений. Примерно в половине случаев топливные загрузки реакторов ВВЭР-1000 АЭС Украины имели 30-градусную зеркальную симметрию. Те кампании, которые не имели такой симметрии, можно условно поделить на две категории. В первой асимметрия проявлялась за счет тех тепловыделяющих сборок (ТВС), которые были расположены не на периферии АКЗ. Очевидно, что такая асимметрия не оказывает влияния на формирование поля нейтронов в ОКП реактора. Ко второй категории относятся те кампании, в которых асимметрия имеет место в периферийных рядах ТВС. Но анализ этих кампаний, проведенный с использованием численных расчетов переноса нейтронов в ОКП реактора, показывает, что распределение линейных ФНП у внешней поверхности КР в области расположения комплектов НАД в большинстве случаев имеет ту же самую 30-градусную зеркальную симметрию. Отклонения от нее находятся на уровне случайных погрешностей дозиметрических измерений. Естественно, что отношения удельных активностей НАД должны еще меньше зависеть от азимутального угла.

Поэтому азимутальная зависимость отношений удельных активностей двух типов НАД может быть описана ограниченным косинус-рядом Фурье:

$$F(\vartheta) = \sum_{j=0}^{N^F} b_j \cdot \cos\left(j \frac{\pi}{30} \vartheta\right), \quad (5)$$

где N^F – максимальное количество членов ряда.

Ограничение количества членов ряда является следствием конечного количества комплектов НАД, т.е. точек для аппроксимации.

Для нахождения коэффициентов b_j в разложении (5) необходимо минимизировать выражение (3). В связи с тем, что функция F линейно зависит от b_j , решение этой задачи сводится к решению системы $N^F + 1$ линейных уравнений с $N^F + 1$ неизвестными. Величина N^F определяется как такая, при которой значение нормированного χ^2 минимально. Несколько забегаая вперед, отметим, что во всех представляющих интерес случаях $N^F = 3$.

Сравнение значений χ^2 , рассчитанных для наборов отношений удельных активностей НАД из железа и меди, с табличными значениями для 95 %-ного доверительного интервала

АЭС – № энергоблока	№ кампании	Высотный уровень, на котором облучались НАД	Количество отношений в наборе	χ^2	
				расчетное	табличное
ЗАЭС-3	15	шов № 3	6	28,6	11,1
		max РН*	6	44,0	11,1
		шов № 4	8	45,0	14,1
ЮУАЭС-1	18	шов № 3	4	9,8	7,8
		max РН	4	21,6	7,8
		шов № 4	4	7,7	7,8
ЮУАЭС-2	14	шов № 3	7	10,1	12,6
		max РН	7	13,4	12,6
		шов № 4	8	22,5	14,1
	15	max РН	5	11,9	9,5
		шов № 4	4	5,3	7,8
ЮУАЭС-3	6	max РН	16	18,9	25,0
	12	шов № 3	6	3,6	11,1
		max РН	6	6,5	11,1
		шов № 4	8	11,0	14,1
	13	шов № 3	4	0,6	7,8
		max РН	4	10,9	7,8
шов № 4		4	1,1	7,8	
ХАЭС-1	7	max РН	11	7,6	18,3
	8	max РН	12	42,8	19,7
	9	шов № 3	7	27,8	12,6
		max РН	6	40,1	11,1
		шов № 4	7	14,1	12,6
	10	шов № 3	4	7,2	7,8
		max РН	10	12,5	16,9
		шов № 4	4	8,0	7,8
	11	шов № 3	8	7,2	14,1
		max РН	8	6,5	14,1
		шов № 4	8	2,7	14,1
	12	шов № 3	7	39,4	12,6
		max РН	16	49,6	25,0
		шов № 4	7	13,2	12,6
	13	шов № 3	6	7,5	11,1
		max РН	6	5,3	11,1
		шов № 4	6	20,6	11,1
	14	шов № 3	4	6,9	7,8
max РН		4	13,6	7,8	
шов № 4		4	3,7	7,8	

* Максимальная радиационная нагрузка.

Полученный нулевой коэффициент ряда Фурье есть истинно среднее значение отношений удельных активностей рассматриваемых типов НАД на определенной высоте у внешней поверхности КР и для определенной топливной кампании. Поэтому для удобства сравнения между собою величин $\beta_{r_1 r_2}(\vartheta_i)$, которые были получены для различных высот и для различных топливных кампаний, его можно использовать как нормирующий множитель.

Кроме того, более наглядным есть отклонение такого отношения от среднего значения, т.е. от 1. Поэтому в качестве величины, характеризующей зависимость соотношения между удельными активностями двух типов НАД от азимутального угла, выбрана

$$\beta_{r_1 r_2}^*(\vartheta_i) = \left(\frac{\beta_{r_1 r_2}(\vartheta_i)}{b_0} - 1 \right) \cdot 100\% \quad (6)$$

Учитывая связь между удельными активностями и флюенсами выше эффективных порогов реакций активации НАД [9] величина $\beta_{r_1 r_2}^*(\vartheta_i)$ есть относительное расхождение спектрального индекса, т.е. отклонение спектрального индекса в данной точке от его среднего значения на определенной высоте.

Погрешность определения величины $\beta_{r_1 r_2}^*(\vartheta_i)$ с достаточной степенью точности может быть рассчитана по приблизительной формуле

$$\Delta\beta_{r_1 r_2}^*(\vartheta_i) \approx \frac{\Delta\beta_{r_1 r_2}(\vartheta_i)}{\beta_{r_1 r_2}(\vartheta_i)} \cdot \frac{\beta_{r_1 r_2}(\vartheta_i)}{b_0} \quad (7)$$

Полученные экспериментальные значения $\beta_{r_1 r_2}^*(\vartheta_i)$ могут быть аппроксимированы с помощью аналитической функции

$$\beta_{r_1 r_2}^{*a}(\vartheta) = \sum_{j=1}^{N^F} \frac{b_j}{b_0} \cdot \cos\left(j \frac{\pi}{30} \vartheta\right) \quad (8)$$

С использованием разработанного математического аппарата были проанализированы отношения удельных активностей НАД для ряда топливных кампаний энергоблоков АЭС Украины. Некоторые из полученных результатов приведены на рис. 1 - 3.

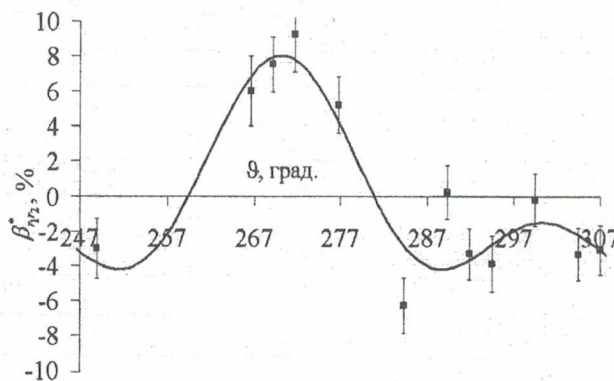


Рис. 1. Зависимости $\beta_{r_1 r_2}^*(\vartheta_i)$ и $\beta_{r_1 r_2}^{*a}(\vartheta)$ для НАД из ниобия и железа, которые облучались в течение 11-й топливной кампании энергоблока № 1 ХАЭС на уровне шва № 4.

комплектов НАД, которые должны быть достаточно равномерно распределены в 60-градусном азимутальном секторе. В случае нарушения этого требования корректное исследование азимутальной зависимости спектра быстрых нейтронов в ОКП реактора невозможно (см., например, рис. 3).

3. Общий вид азимутальной зависимости формы спектра быстрых нейтронов для отдельной топливной кампании не зависит от высотной координаты на уровне верхней

Подводя итоги проведенным исследованиям, представляется необходимым сделать следующие **выводы**:

1. Форма спектра быстрых нейтронов у внешней поверхности корпуса ВВЭР-1000 не постоянна, а имеет определенную азимутальную зависимость. При этом значения относительных расхождений спектральных индексов в большинстве случаев имеют отклонение от нуля на уровне случайной составляющей погрешности дозиметрических измерений.

2. Для выявления возможной азимутальной зависимости спектра быстрых нейтронов в ОКП реактора ВВЭР-1000 нужно устанавливать на одной высоте у внешней поверхности КР не менее 10

обечайки КР (см., например, рис. 1 - 2.). Решение этого вопроса для других диапазонов высот требует дополнительных исследований в связи, прежде всего, с недостаточным объемом необходимых данных.

4. Общий вид азимутальной зависимости спектра быстрых нейтронов, скорее всего, не зависит от характеристик топливной загрузки. В то же время, учитывая, что во многих случаях при выполнении дозиметрических измерений у внешней поверхности корпуса ВВЭР-1000 было нарушено условие $N_d \geq 10$ (см. вывод 2), окончательное решение этого вопроса требует дополнительных исследований.

5. В общем случае найденная азимутальная зависимость спектра быстрых нейтронов у внешней поверхности корпуса ВВЭР-1000 имеет следующие характерные особенности в 60-градусном секторе симметрии АКЗ:

экстремумы на азимутах 300 (максимумы для отношений удельных активностей НАД из ниобия и меди к НАД из железа), ~ 9 и $\sim 51^\circ$ (минимумы для тех же отношений) и 60° (локальный максимум);

усредненный по азимуту спектр нейтронов соответствует спектру на азимутах ~ 18 и $\sim 42^\circ$.

Фактически, это означает, что соотношения между удельными активностями НАД имеют азимутальную зависимость достаточно близкую к азимутальной зависимости линейных ФНП в ОКП реактора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПН АЭ Г-7-008-89).* - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 168 с.
2. *Ilieva K., Apostolov T., Belousov S. et al. Verification of Neutron Fluence on VVER-440/230 Vessel of Unit 1 at Kozloduy NPP // Proc. 9th Intern. Symp. on Reactor Dosimetry, Prague, 2 - 6 Sept. 1996.* - Singapore: World Scientific, 1998. - P. 19 - 26.
3. *Буканов В. Н., Васильева Е. Г., Демехин В. Л. и др. Методика определения радиационной нагрузки корпуса реактора ВВЭР-1000 // Ядерная и радиационная безопасность. - 2000. - № 3. - С. 33 - 42.*
4. *Буканов В. Н., Васильева Е. Г., Демехин В. Л. Анализ результатов нейтронно-активационных измерений у внешней поверхности корпуса реактора типа ВВЭР-1000 // Материалы ежегодной научной конференции НЦ "ИЯИ" (сб. докл.). - К., 1997. - С. 197 - 201.*
5. *Bukanov V. N., Dyemokhin V. L., Gavriljuk V. I. et al. Overview of the Surveillance Dosimetry Activities in Ukraine // Reactor Dosimetry: Radiation Metrology and Assessment, ASTM STP 1398 (Proc. 10th Intern. Symp. on Reactor Dosimetry, Osaka, Japan, 12 - 17 Sept. 1999.) - ASTM, West Conshohocken, PA, 2001. - P. 61 - 68.*
6. *Бородкин Г. И., Еремин А. Н., Ломакин С. С., Морозов А. Г. Измерение плотности потока нейтронов в околорпусном пространстве серийного реактора ВВЭР-1000 // Радиационная безопасность и защита АЭС. - 1987. - Вып. 12. - С. 10 - 12.*

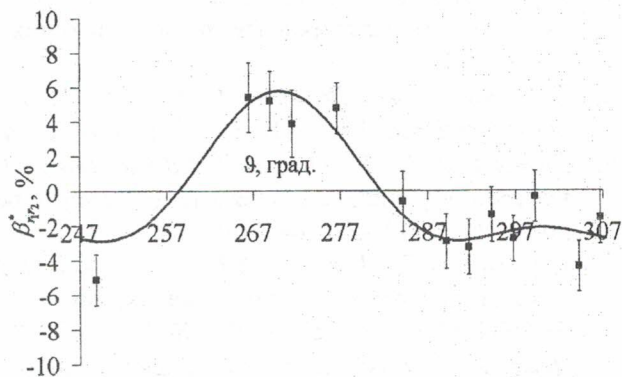


Рис. 2. Зависимости $\beta_{r_1 r_2}^*(\varphi_i)$ и $\beta_{r_1 r_2}^{*a}(\varphi)$ для НАД из ниобия и железа, которые облучались в течение 11-й топливной кампании энергоблока № 1 ХАЭС на уровне максимальной текущей радиационной нагрузки.

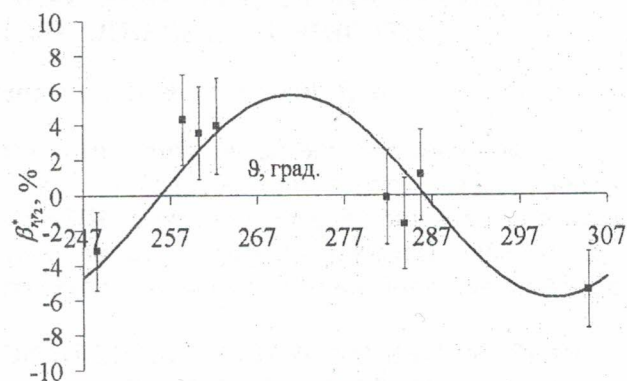


Рис. 3. Зависимости $\beta_{r_1 r_2}^*(\varphi_i)$ и $\beta_{r_1 r_2}^{*a}(\varphi)$ для НАД из ниобия и железа, которые облучались в течение 15-й топливной кампании энергоблока № 3 ЗАЭС на уровне шва № 4.

7. *Бородкин Г. И., Березовец А. М., Залетных Б. А. и др.* Определение плотности потока нейтронов за корпусом реакторов ВВЭР действующих АЭС // Атомная энергия. - 1988. - Т. 64, вып. 2. - С. 155 - 156.
8. *Бородкин Г. И., Ломакин С. С., Утенькин А. А.* Исследование поля нейтронов за корпусом реакторов ВВЭР-1000 // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. - 1992. - Вып. 4. - С. 57 - 58.
9. *Демехин В. Л., Буканов В. Н., Васильева Е. Г.* Эффективные сечения, рассчитанные по спектру нейтронов у внешней поверхности корпуса реактора ВВЭР-1000 // 36. наук. праць Ін-ту ядерних досл. - К., 1999. - С. 164 - 166.
10. *Демехин В.Л., Буканов В.Н., Васильева Е.Г.* Исследование пространственных зависимостей некоторых дозиметрических характеристик поля нейтронов у внешней поверхности корпуса ВВЭР-1000 // Там же. - 2001. - № 2 (4). - С. 90 - 94.
11. *Демехин В.Л.* Определение радиационной нагрузки корпуса ядерного реактора на основе Байесовского подхода: Дис. ... канд. техн. наук: 01.04.16. - К., 2003. - 147 с.
12. *Демехин В. Л., Буканов В. Н., Гаврилюк В. И., Алхадж-Али С.* Расчет поправки на распад при облучении активационных детекторов на корпусе реактора ВВЭР-1000 // Атомная энергия. - 1998. - Т. 85, вып. 4. - С. 334 - 335.
13. *Справочник по прикладной статистике.* В 2 т. Т.1: Пер. с англ./ Под ред. Э. Ллойда, У. Ледермана, Ю. Н. Тюрина. - М.: Финансы и статистика, 1989. - 510 с.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОСТОРОВОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ ФОРМИ СПЕКТРА ШВИДКИХ НЕЙТРОНІВ БІЛЯ ЗОВНІШНЬОЇ ПОВЕРХНІ КОРПУСУ ВВЕР-1000

В. Л. Демьохін, В. Н. Буканов, О. М. Пугач, О. Г. Васильєва

За допомогою спеціально розробленого математичного апарату було проаналізовано масиви величин співвідношень питомих активностей нейтронно-активаційних детекторів, що опромінювалися на зовнішній поверхні корпусів ВВЕР-1000 протягом ряду паливних кампаній енергоблоків АЕС України. Показано, що форма спектра нейтронів біля зовнішньої поверхні корпусу реактора на рівні його верхньої обичайки залежить від азимутальної координати й не залежить від висотної.

RESEARCHES OF SPACIAL DEPENDENCE OF FAST NEUTRON SPECTRUM FORM AT THE OUTER SURFACE OF WWER-1000 PRESSURE VESSEL

V. L. Dyemokhin, V. N. Bukanov, A. M. Pugach, E. G. Vasylyeva

The arrays of data of relations of specific activities of the neutron-activation detectors irradiated at outer surface of WWER-1000 pressure vessel during a number of fuel cycles of Ukrainian NPP units are analyzed by means of specially developed mathematical device. It is shown that neutron spectrum form at the outer surface at the level of reactor pressure vessel upper shell depends on azimuth coordinate and does not depend on height one.

Поступила в редакцію 16.02.05,
после доработки – 29.04.05.