

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ НЕКОТОРЫХ ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЯ НЕЙТРОНОВ У ВНЕШНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ КОРПУСА ВВЭР-1000

В. Л. Демехин, В. Н. Буканов, Е. Г. Васильева

Проанализированы результаты активационных измерений детекторов, облучавшихся в течение 9-й и 10-й топливных кампаний блока № 1 Хмельницкой АЭС на внешней поверхности корпуса реактора. Анализ выполнен с помощью специально разработанной методики, математический аппарат которой базируется на основных положениях математической статистики. Показано, что соотношения между скоростями реакций активации практически не зависят от местоположения активационных детекторов. Этот вывод может быть применен для оптимизации количества детекторов, используемых при расчетно-экспериментальном определении флюенсов быстрых нейтронов на корпусе ВВЭР-1000.

Одним из обязательных условий безопасной эксплуатации реактора ВВЭР-1000 является определение флюенсов быстрых нейтронов, накопленных критическими зонами корпуса реактора (КР) за время его работы [1]. Оптимальной для определения флюенсов является расчетно-экспериментальная методика, которая включает численные расчеты переноса нейтронов в околокорпусном пространстве реактора и дозиметрические измерения у внешней поверхности корпуса [2]. В рамках этой методики измерения выполняются нейтронно-активационным методом. С этой целью на внешней поверхности КР располагаются комплекты нейтронно-активационных детекторов (НАД) из ниобия, никеля, железа, титана и меди, которые облучаются в течение топливной кампании. По результатам активационных измерений облученных детекторов определяются скорости реакций активации  $^{93}\text{Nb}(n,n')^{93\text{m}}\text{Nb}$ ,  $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$ ,  $^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$ ,  $^{\text{nat}}\text{Ti}(n,x)^{46}\text{Sc}$  и  $^{63}\text{Cu}(n,\alpha)^{60}\text{Co}$ , значения которых затем используются при определении флюенсов нейтронов на КР.

Достоверность результатов определения флюенсов нейтронов на КР в значительной степени зависит от представительности результатов дозиметрических измерений у внешней поверхности корпуса. Обеспечение необходимого и достаточного объема экспериментальных данных требует решения задачи оптимизации как количества используемых для измерений НАД, так и схемы их размещения на внешней поверхности КР. Схема размещения комплектов НАД определяется прежде всего расположением критических зон корпуса, а их состав может зависеть от наличия закономерностей, которым подчиняются характеристики поля нейтронов у внешней поверхности корпуса. Для выявления таких закономерностей необходимо проанализировать имеющиеся экспериментальные данные.

С этой целью скорость  $j$ -й реакции ( $j = \overline{1, n}$ ,  $n$  – количество используемых реакций) в пространственной точке  $\mathbf{r}$  удобно представить в виде

$$R_j(\mathbf{r}) = \nu(\mathbf{r})\rho_j(1 + \xi_j(\mathbf{r})), \quad (1)$$

где  $\nu(\mathbf{r})$  – относительная усредненная интенсивность скоростей реакций или, что то же самое, относительная интенсивность интегральной плотности потока нейтронов (ППН) в пространственной точке  $\mathbf{r}$ ;  $\rho_j$  – относительная усредненная скорость  $j$ -й реакции;  $\xi_j(\mathbf{r})$  – относительное отклонение усредненной скорости реакции от истинной.

В общем случае определение относительных усредненных интенсивностей и скоростей реакций задается формулами

$$v(\mathbf{r}) = \sum_{j=1}^n \omega(\mathbf{r}, j) \frac{R_j(\mathbf{r})}{\rho_j} / \sum_{j=1}^n \omega(\mathbf{r}, j), \quad \forall \mathbf{r} \in S, \quad (2)$$

$$\rho_j = \int_S d\mathbf{r} \omega(\mathbf{r}, j) \frac{R_j(\mathbf{r})}{v(\mathbf{r})} / \int_S d\mathbf{r} \omega(\mathbf{r}, j), \quad j = \overline{1, n}, \quad (3)$$

где  $\omega(\mathbf{r}, j)$  – весовая непрерывно-дискретная функция, которая может зависеть от  $\mathbf{r}$  и  $j$  не непосредственно, а через  $v(\mathbf{r})$  и  $\rho_j$ , а интеграл берется по всей внешней поверхности КР. В любом случае относительные отклонения удовлетворяют условиям

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \omega(\mathbf{r}, j) \xi_j(\mathbf{r}) = 0, & \forall \mathbf{r} \in S \\ \int_S d\mathbf{r} \omega(\mathbf{r}, j) \xi_j(\mathbf{r}) = 0, & \forall j = \overline{1, n} \end{cases}, \quad (4)$$

а являющаяся аналогом среднеквадратичного отклонения величина

$$\zeta = \left( \sum_{j=1}^n \int_S d\mathbf{r} \omega(\mathbf{r}, j) \xi_j^2(\mathbf{r}) / \sum_{j=1}^n \int_S d\mathbf{r} \omega(\mathbf{r}, j) \right)^{1/2} \quad (5)$$

характеризует степень изменчивости соотношений используемых скоростей реакций. Для однозначности определения относительных усредненных интенсивностей и скоростей реакций необходимо считать какую-то из них постоянной. С целью удобства дальнейшего изложения положим  $\rho_n = 1$  и  $j = 1, n-1$  в формуле (3). Тогда остальные  $\rho_j$  являются по сути отношениями  $j$ -й скорости реакции к  $n$ -й.

Если соотношения скоростей реакций неизменны для данной топливной кампании, то  $\xi_j(\mathbf{r}) \equiv 0$  и все  $v(\mathbf{r})$  и  $\rho_j$  определяются однозначно вне зависимости от выбора вида функции  $\omega(\mathbf{r}, j)$ . Если же  $|\xi_j(\mathbf{r})| \neq 0$ , то выбор вида весовой функции определяется поставленной задачей, что приводит к различным значениям  $v(\mathbf{r})$  и  $\rho_j$ . В то же время можно показать, что при  $|\xi_j(\mathbf{r})| \ll 1$  различия между  $v(\mathbf{r})$  и  $\rho_j$ , которые определяются с различными весовыми функциями, незначительны.

В связи с тем, что получение экспериментальных данных производится только для фиксированных точек на внешней поверхности КР, то с практической точки зрения представляет интерес преобразование формулы (1) к виду

$$R_{ij} = v_i \rho_j (1 + \xi_{ij}), \quad (6)$$

где индекс  $i$  означает номер точки, в которой располагался комплект НАД. Преобразование формул (2) - (5) в этом случае достаточно очевидно.

Вторым существенным отличием практики от теории является наличие ошибок  $\varepsilon_{ij}$  в определении скоростей реакций, т.е. в реальности получаются только оценки

$$\tilde{R}_{ij} = R_{ij} + \varepsilon_{ij}. \quad (7)$$

Вводя замену

$$\eta_{ij} = \frac{\varepsilon_{ij}}{\nu_j \rho_j}, \quad (8)$$

из формул (6) и (7) получаем

$$\tilde{R}_{ij} = \nu_j \rho_j (1 + \xi_{ij} + \eta_{ij}). \quad (9)$$

Так как количество неизвестных больше количества уравнений (9), то их нахождение не представляется возможным без каких-то дополнительных предположений прежде всего о зависимости  $\xi_{ij}$  от координат точки. Элементарный анализ, основанный на соотношениях скоростей реакций [2], показывает отсутствие какой-либо явно выраженной зависимости. В то же время из него следует, что  $|\xi_{ij}| \ll 1$ . Поэтому в качестве нулевого приближения можно положить  $\xi_{ij} = 0$  и находить оценки относительных усредненных интенсивностей  $\tilde{\nu}_i$  и скоростей реакций  $\tilde{\rho}_j$  из условия минимизации функционала

$$F = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left( \frac{\tilde{\nu}_i \tilde{\rho}_j - \tilde{R}_{ij}}{\Delta \tilde{R}_{ij}} \right)^2, \quad (10)$$

где  $\Delta \tilde{R}_{ij}$  – случайная ошибка определения скорости  $i$ -й реакции в  $j$ -й точке. Несложно показать, что такие оценки соответствуют дискретному варианту равенств (2) - (3) с весами

$$\omega_{ij} = \left( \frac{\tilde{\nu}_i \tilde{\rho}_j}{\Delta \tilde{R}_{ij}} \right)^2. \quad (11)$$

Соответственно оценки относительных отклонений должны подчиняться дискретному варианту условий (4). Точно рассчитать эти оценки, как уже отмечалось, невозможно. Однако можно приблизительно определить их порядок. Для этого подставим формулу (9), заменив входящие в нее величины их оценками, в (10). После возведения в квадрат и элементарных преобразований получаем

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \omega_{ij} \tilde{\xi}_{ij}^2 = \max \{0, F - (mn - m - (n-1))\}. \quad (12)$$

Подставляя (12) в дискретный вариант выражения (5), можно получить оценку для  $\zeta$ . Следует, однако, отметить, что для практических целей вместо величины  $\zeta$  лучше использовать более наглядную величину

$$\zeta^* = \left( \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left( \frac{\tilde{\xi}_{ij}}{\Delta \tilde{R}_{ij} / \tilde{R}_{ij}} \right)^2 \right)^{1/2}, \quad (13)$$

характеризующую соотношения между относительными отклонениями и относительными погрешностями измерений. Она также легко получается из (12) с учетом того, что  $|\xi_{ij}| \ll 1$ .

Отметим, что в формулах (10) - (13) для упрощения изложения предполагается, что во всех комплектах НАД находится одинаковый набор детекторов. Если это не так, то правильные равенства могут быть получены из вышеприведенных формул (10) и (11), принимая в них  $\Delta\tilde{R}_{ij} = \infty$  в случае, когда в  $i$ -й точке отсутствует  $j$ -й детектор. А в равенствах (12) и (13) в дополнение к этому требуется заменить произведение  $mn$  на общее количество установленных и измеренных НАД  $k$ .

С помощью разработанной методики анализировались результаты активационных измерений НАД, облучавшихся в течение 9-й и 10-й топливных кампаний блока № 1 Хмельницкой АЭС на внешней поверхности КР. Для анализа были выбраны соответственно 21 и 18 комплектов НАД, располагавшихся в 60-градусном секторе симметрии топливной загрузки на уровнях сварных соединений и на уровне основного металла верхней обечайки корпуса. Расчет скоростей реакций производился по результатам активационных измерений по методике, описанной в работе [3]. В  $\Delta\tilde{R}_{ij}$  учитывались только статистические погрешности измерений, так как случайные погрешности взвешивания отдельных НАД и эффективности (геометрических параметров измерений), а также псевдослучайные ошибки при расчете поправок на распад продуктов активации за время облучения определить достаточно сложно. Поэтому полученные в этом случае для величины  $\zeta^*$  значения около 1,1 и 0,9 соответственно можно рассматривать как оценку ее возможного верхнего предела.

Проведенный анализ показывает, что в предельной ситуации изменимость соотношений скоростей реакций в различных точках у внешней поверхности КР лежит на уровне статистических погрешностей спектрометрических измерений, т.е. составляет несколько процентов. Следовательно, с практической точки зрения эти соотношения можно считать неизменными для каждой топливной кампании. Такой вывод дает возможность существенно снизить количество полных комплектов НАД. Установка 5 - 6 полных комплектов достаточна для определения соотношения между различными скоростями реакций. В остальных точках на внешней поверхности КР могут устанавливаться неполные комплекты, состоящие, например, только из ниобия и железа или никеля.

#### 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. *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.
3. *Буканов В.Н., Васильева Е.Г., Демехин В.Л.* Анализ результатов нейтронно-активационных измерений у внешней поверхности реактора типа ВВЭР-1000 // *Материалы ежегодной научной конференции НЦ "ИЯИ" (сборник докладов)*. – Киев, 1997. – С. 197 - 201.
4. *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*. – Т. 85, вып. 4. – 1998. – С. 334 - 335.

#### ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОСТОРОВИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ДЕЯКИХ ДОЗИМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЯ НЕЙТРОНІВ БІЛЯ ЗОВНІШНЬОЇ ПОВЕРХНІ КОРПУСУ ВВЕР-1000

**В. Л. Демьохін, В. Н. Буканов, О. Г. Васильєва**

Проаналізовано результати активаційних вимірів детекторів, що опромінювалися протягом 9-ї й 10-ї паливних кампаній блока № 1 Хмельницької АЕС на зовнішній поверхні корпусу реактора. Аналіз виконано за допомогою спеціально розробленої методики, математичний апарат якої ґрунтується на основних положеннях математичної статистика. Показано, що співвідношення між швидкостями реакцій активації практично не залежать від місця розташування активаційних

детекторів. Цей висновок може бути застосовано для оптимізації кількості детекторів, що використовуються при розрахунково-експериментальному визначенні флюєнсів швидких нейтронів на корпус ВВЕР-1000.

### **STUDY OF SPATIAL DEPENDENCIES OF SOME EX-VESSEL DOSIMETRY CHARACTERISTICS OF WWER-1000 TYPE REACTOR NEUTRON FIELD**

**V. L. Dyemokhin, V. N. Bukanov, E. G. Vasylyeva**

The results of activation measurements of the ex-vessel dosimetry detectors irradiated during 9-th and 10-th fuel cycles at Khmelnitskaya NPP, Unit 1 are analyzed with a specially designed procedure which mathematics tool bases on the main aspects of a mathematical statistics. It is shown that the relations between the reaction rates don't practically depend on dosimetry detector locations. This conclusion can be applied for optimization of the detectors amount used for the calculational-experimental determination of fast neutron fluences on WWER-1000 pressure vessel.