

В. Л. Демехин, В. В. Илькович,
В. Н. Буканов

Институт ядерных исследований
Национальной академии наук Украины, г. Киев

Оценка разброса флюенсов нейтронов на образцы-свидетели металла корпуса ВВЭР-1000 дополнительной программы

Оценен разброс флюенсов нейтронов на образцы-свидетели металла корпуса ВВЭР-1000 после модернизации одноярусных контейнерных сборок. Показано, что предлагаемая схема модернизации позволит обеспечить выравнивание флюенсов, накопленных образцами одной сборки. Это даст возможность получить представительные прогнозные оценки состояния металла корпуса ВВЭР-1000 в течение длительной эксплуатации, включая возможное продление срока службы до 60 лет и более.

Ключевые слова: ВВЭР-1000, образцы-свидетели, дополнительная программа, флюенс нейтронов, разброс флюенсов.

В. Л. Демехин, В. В. Илькович, В. М. Буканов

Оцінка розкиду флюєнсів нейтронів на зразки-свідки металу корпусу ВВЕР-1000 додаткової програми

Виконано оцінку розкиду флюєнсів нейтронів на зразки-свідки металу корпусу ВВЕР-1000 після модернізації одноярусних контейнерних збірок. Показано, що запропонована схема модернізації дасть змогу забезпечити вирівнювання флюєнсів, накопчених зразками однієї збірки, та отримати представницькі прогнозні оцінки стану металу корпусу ВВЕР-1000 протягом тривалої експлуатації, зокрема з можливим продовженням терміну служби до 60 років і більше.

Ключові слова: ВВЕР-1000, зразки-свідки, додаткова програма, флюєнс нейтронів, розкид флюєнсів.

© В. Л. Демехин, В. В. Илькович, В. Н. Буканов, 2012

Обязательным условием безопасной эксплуатации ядерной энергетической установки с реактором корпусного типа является сохранение целостности корпуса реактора (КР) при нормальных условиях эксплуатации, нарушении нормальных условий эксплуатации и при любых проектных авариях. Обеспечение этого условия требует контроля состояния металла корпуса в течение всего срока его службы.

Двухъярусные контейнерные сборки (КС) штатной программы образцов-свидетелей (ОС) обеспечивают материальное сопровождение эксплуатации корпуса примерно до окончания проектного срока. Для решения этой же задачи в сверхпроектный период в соответствии с требованиями «Типовой программы контроля свойств металла корпусов реакторов ВВЭР-1000 по образцам-свидетелям» № ПМ-Т.0.03.120–08 [1] необходимы разработка и реализация дополнительной программы ОС. Как показано в [2], в основу разработки дополнительной программы может быть положена модернизация одноярусных КС, которая заключается в переносе контейнеров с ОС с верхнего яруса на нижний с поворотом всей сборки на 180° вокруг собственной оси. В таком случае следует ожидать не только необходимого ускорения облучения ОС, но и выравнивания накопленных ими флюенсов. Выполнение последнего условия необходимо для подбора представительной группы ОС в проведении испытаний, которая в соответствии с [3] должна состоять, как минимум, из 12 образцов при условии, что значения накопленного ими флюенса нейтронов с $E_n > 0,5$ МэВ отличаются от среднегруппового не более чем на 10 %. Заметим, что в одноярусной КС штатной программы ОС обычно находится именно 12 образцов.

В то же время предлагаемая схема модернизации требует строгого математического обоснования того, что в результате ее выполнения указанные задачи будут решены.

Для оценки разброса флюенсов на ОС разделим проблему на несколько частей. Вначале оценим разброс, обусловленный самой схемой модернизации, в предположении, что ОС в одном контейнере облучаются совершенно одинаково.

Азимутальное распределение любого функционала нейтронного потока по окружности, лежащей в горизонтальной плоскости с центром на оси КС, может быть представлено в виде ряда Фурье, который в нашем случае удобней записать в виде

$$\Phi(\alpha) = \bar{\Phi} \cdot \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \cos(n\alpha + \gamma_n) \right). \quad (1)$$

Значения коэффициентов быстро спадают с ростом n . Например, для флюенса нейтронов с $E_n > 0,5$ МэВ $c_1 = 0,30 \pm 0,02$ (при этом значительная часть указанной погрешности обусловлена статистическими погрешностями результатов расчетов переноса нейтронов), а c_2 на порядок меньше. Заметим, что имеющиеся результаты позволяют, по сути, лишь выяснить, что данный коэффициент положителен, и оценить верхнюю границу его возможного значения, для точного вычисления которого требуется существенное снижение статистической погрешности результатов расчета переноса нейтронов, т. е. значительное увеличение времени его проведения. Поэтому при решении подавляющего большинства практических задач, связанных со штатной программой ОС, достаточно ограничиться первым членом ряда, а для простоты математических преобразований и вычислений угол α отсчитывать от точки максимального значения аппроксимирующей функции, т. е. принять $\gamma_1 = 0$.

Заметим, что указанные точки имеют различную ориентацию относительно горизонтального направления на

центральную ось активной зоны (АКЗ) не только для разных КС, но и на разных высотах одной и той же сборки. Наибольшее различие между серединами контейнеров с ОС верхнего и нижнего рядов — около 3° — наблюдается для сборок *Л1 и *Л5. Этот факт необходимо учитывать, т. е. при модернизации поворот КС вокруг собственной оси следует осуществлять не на 180°, а на чуть меньший (или чуть больший) угол относительно АКЗ. Математически для середин контейнеров это означает поворот на 180° относительно точки максимального значения аппроксимирующей функции. Для других высот значение этого угла поворота будет отличаться в силу вышеуказанной причины, однако, как показали наши исследования, — максимум на 1°, что существенно меньше возможной ошибки в определении угла ориентации КС относительно АКЗ.

Таким образом, в первом приближении суммарный флюенс, накопленный ОС с первоначальной угловой координатой α до его извлечения для испытаний,

$$\Phi(\alpha) = \Phi_1(\alpha_1) + \Phi_2(\alpha_2) = (\bar{\Phi}_1 + \bar{\Phi}_2) + (\bar{\Phi}_1 c_{11} \cos \alpha_1 - \bar{\Phi}_2 c_{12} \cos(\alpha_1 + \Delta\alpha)), \quad (2)$$

где индекс «1» относит параметр к ситуации до модернизации КС, а индекс «2» — после; $\Delta\alpha$ — ошибка в угле разворота КС относительно максимального значения аппроксимирующей функции, вызванная различными причинами.

Очевидно, что в первых скобках стоит средний флюенс, накопленный ОС модернизируемой сборки за все время облучения ($\bar{\Phi}$), а во вторых — отклонение флюенса, накопленного ОС с первоначальной угловой координатой α , от среднего, — $\Delta\Phi(\alpha)$. Путем несложных математических преобразований легко получить формулу для максимального относительного отклонения:

$$\left(\frac{|\Delta\Phi|}{\bar{\Phi}}\right)_{\max} \approx c_1 \cdot \left((\delta_\Phi)^2 + k_1 k_2 \left(\frac{\pi \Delta\alpha [\text{deg}]}{180} \right)^2 \right)^{1/2}, \quad (3)$$

$$\text{где } c_1 = \frac{c_{11} + c_{12}}{2}, \quad \delta_\Phi = \frac{\bar{\Phi}_1 c_{11} - \bar{\Phi}_2 c_{12}}{\bar{\Phi}_1} = k_1 - k_2, \quad k_i = \frac{\bar{\Phi}_i c_{1i}}{\bar{\Phi}_1}.$$

Как и следовало ожидать, абсолютный минимум функции (3) достигается при $\Delta\alpha = 0$ и $\delta_\Phi = 0$ (или, что то же самое, $\bar{\Phi}_1 c_{11} = \bar{\Phi}_2 c_{12}$). Очевидно, что первое из этих условий неконтролируемо, т. е. некоторая, по сути, неизвестная ошибка в угле разворота КС относительно максимального значения аппроксимирующей функции будет присутствовать. Вопрос выполнения второго условия будет рассмотрен в отдельной публикации, посвященной срокам выгрузки ОС для модернизации и для испытаний. Пока лишь отметим, что исходя из вида функции (3) влияние этого параметра на конечный результат при правильной реализации программы модернизации не должно быть значительным.

Таким образом, теоретически в первом приближении при неких идеальных условиях облучения можно добиться отсутствия разброса по флюенсам хотя бы на одной высоте ОС, например на их рабочие части. Это приближение не учитывает несимметричность и нелинейность поля нейтронов в местах расположения ОС, описываемых последующими членами ряда (1). Однако для корректного решения поставленной задачи оценить влияние этого фактора на конечный результат необходимо. Оно определяется выражением

$$\Delta\Phi^{(2)} = \bar{\Phi}_1 c_{21} \cos(2\alpha + \gamma_{21}) + \bar{\Phi}_2 c_{22} \cos(2(\alpha + \Delta\alpha) + \gamma_{22}), \quad (4)$$

из которого следует

$$|\Delta\Phi^{(2)}| < \bar{\Phi} \cdot \max\{c_2\}. \quad (5)$$

Следовательно, несимметричность и нелинейность поля нейтронов в местах расположения ОС приводит к разбросу флюенсов, скомпенсировать который невозможно. Величина этого разброса, по нашим оценкам, не превышает 2–3 %.

Последний фактор, влияющий на величину разброса флюенсов на ОС дополнительной программы, является следствием одного из недостатков штатной программы — неодинаковости облучения двух ОС, располагающихся в одном контейнере, и невозможности это различие учесть из-за неизвестной ориентации пары ОС.

Однако в случае, если контейнер не проворачивался до извлечения КС для модернизации и зафиксирован после, то, применяя вышеизложенный подход, легко получить, что отличие во флюенсах между содержащимися в нем двумя ОС не превысит 1 %.

Если же контейнер проворачивался до модернизации и зафиксирован после, то максимальное отличие флюенса на любой ОС от среднего для данного контейнера составит около 2,5–3 %. При этом следует иметь в виду, что вклад этого отличия в конечный разброс флюенсов возможен, по сути, только тогда, когда ОС установлены по градиенту нейтронного потока в контейнере, который до или после модернизации располагался ближе остальных к точке максимального значения аппроксимирующей функции.

Выводы

Как уже отмечалось, в соответствии с [3] группа ОС, подобранных для проведения испытаний, должна состоять, как минимум, из 12 образцов при условии, что значения накопленного ими флюенса нейтронов с $E_n > 0,5$ МэВ отличаются от среднегруппового не более чем на 10 %. Оценка флюенсов нейтронов на ОС дополнительной программы показывает:

1. При тщательной реализации предлагаемой схемы модернизации одноярусных КС добиться полного совпадения флюенсов на образцы в принципе невозможно, но значение максимального разброса не превышает 3 %.

2. Реалистичная ошибка в угле ориентации модернизированной КС относительно АКЗ реактора в 10° увеличивает максимальное отклонение приблизительно на 3 %.

3. Отсутствие информации о расположении ОС в контейнерах может при неблагоприятном стечении обстоятельств приводить к увеличению разброса флюенсов еще почти на 3 %.

Список использованной литературы

1. Типовая программа контроля свойств металла корпусов реакторов ВВЭР-1000 по образцам-свидетелям. № ПМ-Т.0.03.120–08 / ГП НАЭК «Энергоатом». — 2008. — 36 с.
2. Некоторые этапы разработки дополнительной программы образцов-свидетелей для реактора ВВЭР-1000 / А. В. Гриценко, В. Л. Демехин, В. В. Илькович, В. Н. Буканов, Е. Г. Васильева // Ядерная радиационная безопасность. — 2011. — Вып. 2(50). — С. 29–34.
3. Принципиальные положения по контролю свойств металла корпуса реактора типа ВВЭР в процессе эксплуатации по образцам-свидетелям: Руководящий документ, инв. № 62–1872. — М., 2002. — 18 с.

Получено 01.12.2011.