

УДК 621.039.5

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

Институт ядерных исследований
Национальной академии наук Украины, г. Киев

Методика определения сроков выгрузки контейнерных сборок дополнительной программы образцов-свидетелей металла корпуса ВВЭР-1000

Разработана методика, которая позволяет определять оптимальные сроки выгрузки штатных одноярусных контейнерныхборок для модернизации и модернизированных — для испытаний облученных образцов-свидетелей. Выполнение указанных работ в расчетные сроки обеспечивает опережающее облучение образцов дополнительной программы по сравнению с корпусом ВВЭР-1000 и выравнивание флюенсов на образцы одной сборки, что дает возможность материаловедческого сопровождения эксплуатации корпуса реактора в сверхпроектный период.

Ключевые слова: ВВЭР-1000, образцы-свидетели, дополнительная программа, флюенс нейтронов, срок выгрузки.

В. Л. Демьохін, В. В. Ількович, В. М. Буканов

Методика визначення термінів вивантаження контейнерних збірок додаткової програми зразків-свідків металу корпусу ВВЕР-1000

Розроблено методику, яка дає змогу визначити оптимальні терміни вивантаження штатних одноярусних контейнерних збірок для модернізації і модернізованих — для випробувань опромінених зразків-свідків. Виконання вказаних робіт у розрахункові терміни забезпечує випереджаюче опромінення зразків додаткової програми відносно корпусу ВВЕР-1000 і вирівнювання флюенсів на зразки однієї збірки, що уможливорює матеріалознавчий супровід експлуатації корпусу реактора в надпроектний період.

Ключові слова: ВВЕР-1000, зразки-свідки, додаткова програма, флюенс нейтронів, термін вивантаження.

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

В соответствии с требованиями «Типовой программы контроля свойств металла корпусов реакторов ВВЭР-1000 по образцам-свидетелям» № ПМ-Т.0.03.120–08 [1], для материаловедческого сопровождения эксплуатации корпуса реактора (КР) в сверхпроектный период необходимы разработка и реализация дополнительной программы образцов-свидетелей (ОС). Как показано в [2], в основу разработки дополнительной программы может быть положена модернизация одноярусных контейнерныхборок (КС), которая заключается в переносе контейнеров с ОС с верхнего яруса на нижний с поворотом всей сборки на 180° вокруг собственной оси. Это должно позволить выравнивать флюенсы, накопленные ОС одной сборки [3], что необходимо для подбора представительной группы образцов для проведения испытаний.

В то же время выравнивание флюенсов, как и коэффициент опережения облучения ОС дополнительной программы по сравнению с КР, во многом зависит от сроков выгрузки штатных одноярусных КС для модернизации и модернизированных — для испытаний облученных образцов.

Определение граничных сроков выгрузки контейнерныхборок для испытаний облученных образцов-свидетелей. Значения флюенсов на основной металл и металл швов, до которых обосновано облучение КР с точки зрения выполнения критерия сопротивления хрупкому разрушению, определяются по результатам испытаний ОС, а значения флюенсов, накопленные его характерными зонами за время эксплуатации, — по результатам мониторинга радиационной нагрузки корпуса.

Из анализа этой информации для каждого конкретного энергоблока определяется та зона КР, где флюенс, до которого обосновано облучение КР, будет накоплен раньше других. Для упрощения дальнейшего изложения назовем такую зону критической. Отметим, что, как показывает наш предварительный анализ имеющихся данных по результатам испытаний ОС и мониторинга радиационной нагрузки КР, такой наиболее вероятной зоной для большинства ВВЭР-1000 является шов № 3.

Пусть Φ_0 — флюенс, до которого обосновано облучение критической зоны, а Φ_N — флюенс, накопленный ею за N кампаний эксплуатации реактора. Очевидно, в таком случае критическая зона еще могла бы накопить флюенс $\Phi_0 - \Phi_N$. Для того чтобы точно выяснить, за какой срок это произойдет, следовало бы рассчитать радиационную нагрузку за все последующие кампании. Очевидно, что это невозможно в силу целого ряда объективных причин. Поэтому предположим, что все последующие кампании реактора идентичны и соответствуют некоей усредненной кампании, за которую корпус накапливает флюенс Φ_1 . Его значение может быть получено на основании анализа уже прошедших кампаний. А для увеличения степени достоверности полученных результатов анализировать следует кампании не только конкретного рассматриваемого реактора, но и всех других.

Часть такого общего анализа описана в [4]. В результате анализа было выяснено, что загрузки, реализуемые на АЭС Украины, могут быть разделены на две большие группы — обычные и с пониженной утечкой нейтронов. Последние характеризуются установкой ТВС третьего или четвертого года эксплуатации в выступающие ячейки, что приводит к существенному уменьшению радиационной нагрузки на КР и тем самым позволяет увеличить срок его службы.

В связи с тем, что в последнее время на всех энергоблоках с реакторами ВВЭР-1000 АЭС Украины начали

использовать топливные загрузки с пониженной утечкой нейтронов на постоянной основе, для дальнейшего предварительного анализа были взяты именно они. Выяснилось, что в 90 % случаев текущая радиационная нагрузка на основной металл и шов № 3 не превышает $1,0 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$. Поэтому именно данное значение предлагается использовать в качестве предварительной прогнозной оценки флюенса, который будет в среднем накапливаться критической зоной КР за каждую следующую кампанию. Это практически однозначно (при условии, что все дальнейшие загрузки будут с пониженной утечкой) гарантирует, что прогнозное время достижения флюенса, до которого обосновано облучение корпуса, не превысит реальное.

Использование указанного или любого другого значения флюенса в качестве прогнозной оценки для каждого конкретного энергоблока требует дополнительного обоснования, базирующегося на комплексном анализе реализованных загрузок и результатов мониторинга радиационной нагрузки корпуса. Кроме того, после определения, обоснования и утверждения сроков выгрузки ОС дополнительной программы, мониторинг радиационной нагрузки КР в каждую кампанию является обязательным, чтобы иметь возможность своевременно и адекватно реагировать на вероятные отклонения реальных условий облучения корпуса от оценочных.

Если будут выполнены все условия, о которых сказано выше, последняя кампания, к концу которой флюенс, до которого обосновано облучение критической зоны КР, уверенно накоплен не будет,

$$N_0 = \left[\frac{\Phi_0 - \Phi_N}{\Phi_1} \right] + N, \quad (1)$$

где квадратные скобки означают целую часть числа.

Следовательно, ОС первого комплекта дополнительной программы должны быть выгружены для испытаний, срок которых обычно составляет до двух лет, не позже, чем после окончания $(N_0 - 2)$ -й кампании.

Указанные выше значения флюенсов определяются с некоторыми ошибками, а безусловным требованием к КР является сохранение целостности при штатных условиях эксплуатации и при любых проектных авариях. Поэтому при решении поставленной задачи следует использовать консервативный подход [5]. В данном случае он заключается в возможном уменьшении номера кампании, после которой ОС дополнительной программы должны быть выгружены, введением в формулу (1) соответствующего коэффициента. В итоге она примет вид

$$N_0 = \left[\frac{(1-k)(\Phi_0 - \Phi_N)}{\Phi_1} \right] + N, \quad (2)$$

где k — некий коэффициент запаса. Значение этого коэффициента для каждого конкретного случая должно выбираться исходя из комплексного анализа методов получения флюенсов, достоверности и реалистичности исходной информации и полученных результатов (как по значениям флюенсов, так и по испытаниям ОС), сравнения расчетных и экспериментальных данных и т. д. Особо тщательно следует рассматривать ситуацию, когда определение флюенсов на ОС и КР велось с использованием разных методов, которые включали разные программные комплексы, а при расчетах переноса нейтронов использовались разные входные параметры, такие, например, как геометрические

и материальные параметры расчетной модели или библиотека микроконстант.

Определение сроков выгрузки штатных контейнерных сборок для модернизации и модернизированных — для испытаний образцов-свидетелей. В работе [3] было показано, что для максимального выравнивания флюенсов нейтронов, накопленных ОС одной модернизированной сборки, необходимо выполнение условия

$$\bar{\Phi}_1 c_{11} = \bar{\Phi}_2 c_{12}, \quad (3)$$

где $\bar{\Phi}_1, \bar{\Phi}_2$ — средние флюенсы, накопленные ОС до и после модернизации КС, соответственно; c_{11}, c_{12} — коэффициенты при первых членах разложения в ряд Фурье азимутального распределения нормированных флюенсов, накопленных ОС до и после модернизации КС, соответственно. Заметим, что в большинстве практических задач используется единое значение $c_1 = 0,30 \pm 0,02$ (при этом значительная часть указанной погрешности обусловлена статистическими погрешностями результатов расчетов переноса нейтронов).

Принимая, что на модернизацию требуется одна кампания, равенство (3) может быть переписано в виде

$$c_{11} (\bar{\Phi}_N^* + (v_1 - N) \bar{\Phi}_1^*) = c_{12} (N_0 - 2 - v_1 - 1) \bar{\Phi}_2^*, \quad (4)$$

где $\bar{\Phi}_N^*$ — средний накопленный за N прошедших кампаний флюенс на ОС верхнего этажа одноярусной сборки, в которой находится металл критической зоны; $\bar{\Phi}_1^*$ — предполагаемый средний за кампанию флюенс на ОС металла критической зоны, располагающиеся на верхнем этаже одноярусной сборки, которую предполагается модернизировать; $\bar{\Phi}_2^*$ — предполагаемый средний за кампанию флюенс на ОС металла критической зоны, располагающиеся на нижнем этаже модернизированной сборки; v_1 — «номер» (объяснение кавычек будет дано чуть ниже) кампании, после которой следует осуществить выгрузку КС для модернизации.

Как показали наши исследования, поле нейтронов в районе расположения ОС достаточно консервативно [6]. Например, плотность потока нейтронов на ОС сборок *Л2, где располагаются образцы металла шва, от кампании к кампании отличается менее чем на 25 %, а в подавляющем большинстве случаев — менее чем на 10 %. Поэтому отличие флюенсов нейтронов на ОС обусловлено, прежде всего, длительностью кампаний и в большинстве случаев лежит в пределах 25 %. Кроме того, отношение средней плотности потока нейтронов (флюенса) на нижний этаж двухъярусной сборки *Л2 к средней плотности потока нейтронов на верхний этаж одноярусной сборки *Л2 составляет приблизительно 2,55 с максимальным отклонением от кампании к кампании около 1 %.

Отметим, что для сборки *Л1, где расположены образцы основного металла, разбросы плотности потока нейтронов и флюенсов примерно такие же, а указанное отношение примерно равно 2,62.

Решение уравнения (4) дает

$$v_1 = \frac{(\xi(N_0 - 3) + N) \bar{\Phi}_1^* - \bar{\Phi}_N^*}{(\xi + 1) \bar{\Phi}_1^*} = \frac{\xi}{\xi + 1} \cdot (N_0 - 3) + \frac{1}{\xi + 1} \cdot \left(N - \frac{\bar{\Phi}_N^*}{\bar{\Phi}_1^*} \right), \quad (5)$$

где $\xi = c_{12} \bar{\Phi}_2^* / (c_{11} \bar{\Phi}_1^*)$.

Так как номер любой кампании должен быть целым числом, то $n_1 = [v_1] + \delta_1$ ($\delta_1 = 0 \vee 1$, квадратные скобки означают целую часть числа) — номер кампании, после которой следует выгрузить КС для модернизации. Метод определения конкретного значения δ_1 будет изложен ниже.

В таком случае выгрузка модернизированной КС дополнительной программы должна будет произойти не обязательно после ($N_0 - 2$)-й кампании, а после кампании с «номером» v_2 , который удовлетворяет равенству (3), переписанному в виде

$$\bar{\Phi}_N^* + (n_1 - N)\bar{\Phi}_1^* = \xi(v_2 - n_1 - 1)\bar{\Phi}_1^*. \quad (6)$$

С учетом того, что номер любой кампании должен быть целым числом, выгрузка ОС для испытаний должна быть выполнена после кампании с номером

$$n_2 = [v_2] + \delta_2 = \left[\frac{1}{\xi} \cdot \left(\frac{\bar{\Phi}_N^*}{\bar{\Phi}_1^*} - N + n_1 \right) \right] + n_1 + 1 + \delta_2, \quad (7)$$

где $\delta_2 = 0 \vee 1$.

Конкретные значения δ_1 и δ_2 следует выбирать исходя из требования минимизации разброса флюенсов на ОС модернизированной сборки при условии $n_2 \leq N_0 - 2$. Легко показать, что это условие не выполняется при варианте $\delta_1 = 1, \delta_2 = 1$.

Учитывая наличие некоторого разброса флюенсов от кампании к кампании, окончательное решение о сроке выгрузки модернизированной КС может быть принято только при непрерывном отслеживании флюенсов, накапливаемых ОС. Основанием для такого решения является минимизация разброса флюенсов на ОС модернизированной сборки, т. е. максимальная близость левой и правой частей равенства (3). Поэтому следует с особой осторожностью использовать вариант $\delta_1 = 1, \delta_2 = 0$, при котором из-за указанного выше разброса существует повышенная вероятность, что для минимизации указанного расхождения облучение необходимо будет продолжить сверх установленного срока. Поскольку такое переоблучение недопустимо, результатом использования указанного варианта будет досрочная выгрузка образцов для испытаний.

В то же время, при четком выполнении всех требований, изложенных в этой и предыдущих статьях [2, 3], реалистичная ошибка во времени облучения (в основном, связанная с физической невозможностью выгрузки ОС

в середине кампании) увеличивает максимальное отклонение значения флюенса на ОС от его среднего значения всего лишь примерно на 1 %.

Таким образом, разработанная методика на основании анализа реализованных и планируемых топливных загрузок позволяет определять оптимальные сроки выгрузки штатных одноярусных КС для модернизации и модернизированных — для испытаний облученных образцов. Выполнение указанных работ в эти сроки обеспечивает опережающее облучение ОС дополнительной программы по сравнению с КР и выравнивание флюенсов на ОС одной сборки. Это, в свою очередь, дает возможность материаловедческого сопровождения эксплуатации КР в сверхпроектный период в соответствии с требованиями Типовой программы [1].

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. Грищенко, В. Л. Демехин, В. В. Илькович, В. Н. Буканов, Е. Г. Васильева // Ядерна та радіаційна безпека. — 2011. — Вип. 2(50). — С. 29–34.
3. Оценка разброса флюенсов нейтронов на образцы-свидетели металла корпуса ВВЭР-1000 дополнительной программы / В. Л. Демехин, В. В. Илькович, В. Н. Буканов // Ядерна та радіаційна безпека. — 2012. — Вип. 2(54). — С. 21, 22.
4. Буканов В. Н. Использование топливных загрузок с пониженной утечкой нейтронов для ослабления радиационной нагрузки на корпус ВВЭР-1000 / В. Н. Буканов, В. Л. Демехин, А. А. Коренной // Атомная энергия. — Т. 101. — Вып. 2. — 2006. — С. 93–97.
5. Загальні положення безпеки атомних станцій: НП 306.2.141-2008. — К.: Державний комітет ядерного регулювання України, 2007. — <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0056-08>.
6. Comparison of Irradiation Conditions of VVER-1000 Reactor Pressure Vessel and Surveillance Specimens for Various Core Loadings / Bukanov V. N., Diemokhin V. L., Grytsenko O. V., Vasylijeva O. G., Pugach S. M. // Reactor Dosimetry: State of the Art 2008 (Proc. 13th Intern. Symp. on Reactor Dosimetry, Hotel Akersloot, the Netherlands, 25–30 May 2008). — World Scientific, 2009. — P. 318–324.

Получено 20.03.2012.