

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТЕЙ РЕАКЦИЙ ДЕЛЕНИЯ НА МАКЕТЕ КОРПУСА РЕАКТОРА ВВЭР-1000 И НА ОПОРНОЙ КОНСТРУКЦИИ ВВЭР-440

С.Н. Богдан, Н.И. Карпунин, С.С. Ломакин (НТЦ ЯРБ)

Введение

Обеспечение безопасности реакторов ВВЭР при продлении их срока службы требует повышенной точности оценки величин плотности потока и флюенса нейтронов для определения степени деградации материалов опорных конструкций и корпусов реакторов ВВЭР из-за радиационной нагрузки.

Сравнительно невысокие проектные значения плотности потока и флюенса нейтронов в случае продления срока службы сверх проектного достигают значимых величин при оценке радиационного охрупчивания корпусов и опорных конструкций ВВЭР.

В связи с тем, что расчетные оценки плотности потока и флюенса нейтронов не имеют достаточного экспериментального подтверждения, а расчетные программы не прошли аттестации, экспериментальные исследования весьма актуальны.

Для определения плотности потока и флюенса нейтронов измерены скорости реакций деления на опорной конструкции ВВЭР-440 (Нововоронежская АЭС, блок №4) [1] и на макете корпуса реактора ВВЭР-1000 исследовательского реактора LR-0 (Чехия) [2]. При измерениях использовались трековые нейтронные детекторы деления (далее – трековые детекторы) с U-238 или U-236 и методика измерений, разработанная в НТЦ ЯРБ применительно к реакторам типа ВВЭР.

Методика и техника измерений

Скорость реакции деления при использовании метода трековых детекторов определяется формулой [3]:

$$R = N_{\text{тр}} / N_{\text{ядр}} \cdot \varepsilon \cdot t_{\text{обл}} ,$$

где $N_{\text{тр}}$ – число зафиксированных треков в регистраторе;

$N_{\text{ядр}}$ – число ядер U-238 или U-236 в детекторе;

ε – эффективность регистрации осколков деления трековым регистратором;

$t_{\text{обл}}$ – время облучения.

В соответствии с принятой техникой измерений применялись трековые детекторы, которые состояли из алюминиевых дисков (диаметром 10 мм, толщиной 0,3 мм), содержащих слой U-238 или U-236, и трековых регистраторов (слюда мусковит диаметром 10 мм, толщиной 0,3 мм). Погрешность в количестве ядер U-238 или U-236 в каждом детекторе не превышала 3% (по паспортным данным).

Детекторы в кадмиевых контейнерах (капсулах толщиной 0,5 мм) размещались при облучении в исследуемой точке.

Время облучения трековых детекторов определялось исходя из допустимой в эксперименте мощности реактора и планируемого числа измеряемых треков.

После облучения детекторов производилось травление трековых регистраторов с применением фтористо-водородной (плавиковой) кислоты 36%-ной концентрации в термостате при температуре 75°C.

При помощи инвертируемого фотомикроскопа отраженного света и персонального компьютера треки осколков деления сканировались цифровой камерой и распечатывались на лазерном принтере для получения репликаций.

Результаты измерений на макете корпуса реактора ВВЭР-1000

Скорости реакций деления измерялись на макете корпуса, установленном на исследовательском реакторе LR-0, в котором собран сектор активной зоны реактора ВВЭР-1000. Макет корпуса реактора, полномасштабный по толщине корпусу ВВЭР-1000 и составленный из четырех частей, примыкает к баку реактора.

Трековые детекторы с U-238 и U-236 устанавливались перед макетом корпуса (точка 1) и на расстоянии 1/4 толщины корпуса (точка 2).

Время облучения детекторов на мощности реактора LR-0, равной 1 кВт, было одинаково для всех детекторов.

Измеренные значения скоростей реакций деления в точке 1 и точке 2 приведены в таблице.

Номер детектора, i	Место измерения	Трековый детектор	R_i , скорость реакции деления, дел./ядро·с
1	Точка 1	U-238	$1,21 \cdot 10^{-20}$
2	Точка 1	U-238	$1,28 \cdot 10^{-20}$

3	Точка 1	U-238	$1,19 \cdot 10^{-20}$
4	Точка 1	U-236	$2,46 \cdot 10^{-20}$
5	Точка 2	U-238	$0,64 \cdot 10^{-20}$
6	Точка 2	U-236	$1,50 \cdot 10^{-20}$

Средняя скорость деления детекторов с U-238 в точке 1 составила $1,23 \pm 0,05 \cdot 10^{-20}$ дел./ядро·с. Погрешность измеренных скоростей реакции не превышала 5% для точки 1 и 9% для точки 2. Отношение измеренных скоростей реакции в точке 1 и точке 2 для U-238 (пороговая энергия $E > 1,5$ МэВ) составило 1,89, для U-236 (пороговая энергия $E > 0,8$ МэВ) – 1,64.

Сравнение отношений скоростей реакций деления с разными порогами в точке 1 и точке 2 указывает на характер спада реакций по толщине корпуса реактора (спад больше для нейтронов с большой энергией). Этот индекс, называемый пространственным спектральным, используется в оценках программных средств при их аттестации для расчета спектрального распределения нейтронов.

Значение плотности потока нейтронов ϕ в точке 1, полученное из измерений скорости реакции деления U-238, составило $6,21 \cdot 10^4$ нейтр./см²·с для нейтронов с $E > 0,5$ МэВ. Использовалось соответствующее сечение деления из библиотеки BUGLE и спектр нейтронов, полученный на спектрометре со стильбеновым детектором [2].

Результаты измерений на опорной конструкции ВВЭР-440

Измерения скоростей реакций деления были проведены на опорной конструкции реактора блока № 4 Нововоронежской АЭС, в канале ионизационной камеры (ИК) около внутренней поверхности кольцевого бака.

В месте максимума распределения плотности потока нейтронов по высоте канала ИК измерена R – скорость реакции деления U-238, равная $(2,77 \pm 0,14) \cdot 10^{-16}$ дел./ядро·с.

Соответствующая этому значению R плотность потока нейтронов ϕ ($E > 0,5$ МэВ), приведенная к номинальной мощности реактора, равна:

$$\phi (E > 0,5 \text{ МэВ}) = 6,05 \cdot 10^9 \text{ нейтр./см}^2 \cdot \text{с.}$$

При определении ϕ использовалось эффективное сечение деления U-238, полученное для спектра нейтронов в канале ИК реактора ВВЭР-440 [1].

При таком значении ϕ за 30 лет эксплуатации реактора по регламенту флюенс нейтронов составляет $\sim 5 \cdot 10^{18}$ н/см².

Измерена также скорость реакции деления для детектора с U-236, и получено отношение скоростей реакции деления детектора с U-236 и детектора с U-238, равное 2,0.

Заключение

Оценка флюенса нейтронов, проведенная на основе измеренных скоростей реакций деления, показала, что значение флюенса нейтронов на опорной конструкции ВВЭР-440 (Нововоронежская АЭС, блок №4) в месте максимума распределения плотности потока нейтронов превышает значение 10^{18} н/см² при проектном сроке эксплуатации. В случае продления срока службы флюенс нейтронов увеличивается пропорционально времени продления.

Таким образом, при обосновании безопасности реакторной установки ВВЭР-440 необходимо проводить оценку хрупкой прочности опорной конструкции реактора в соответствии с [4].

Проведенные измерения также позволили сравнить полученное значение флюенса с расчетным значением, используемым при оценке хрупкой прочности, и показали консервативность расчетных результатов [1].

Измеренные на макете корпуса реактора ВВЭР-1000 скорости реакций деления U-238 и U-236 и их отношения дают возможность оценивать программные средства и результаты расчетов, используемые при обосновании безопасности корпусов ВВЭР-1000.

Литература

1. Расчетно-экспериментальное определение плотности потока нейтронов на опорной конструкции корпуса реактора ВВЭР-440 первого поколения /С.С. Ломакин, В.А. Пиминов, В.И. Цофин и др.// Вопросы атомной науки и техники. 2005 (в печати).
2. Ošmera B., Zaritsky S. Review of Experimental Data for WWER Reactor Pressure Vessel Dosimetry Benchmarking. Paper presented to 11-th ISRD. Brussel. 2002.
3. Track Detector Measurment in RPV of WWER-1000 Mock-Up in the LR-0 Reactor /B. Ošmera, S. Lomakin, N. Karpunin et. al.// Report to 12-th ISRD. Gatlinburg. 2005.
4. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок: ПНАЭ Г-7-002-86/ Энергоатомиздат. М.: 1989.

