

АНАЛИЗ ПЛОТНОСТЕЙ ПОТОКОВ НЕЙТРОНОВ И СТЕПЕНИ ОХРУПЧИВАНИЯ МАТЕРИАЛА ОПОРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ РЕАКТОРОВ ВВЭР-440(230)

С.С. Ломакин (НТЦ ЯРБ), Б. Ошмера (ИЯИ, Чехия)

Для обоснования срока эксплуатации опорных конструкций атомных реакторов с точки зрения их прочности и продления срока эксплуатации АЭС весьма актуально уточнение величин плотностей потоков нейтронов на опорных конструкциях при оценке охрупчивания материала последних. Опорной конструкцией реактора служит кольцевой бак с водой, расположенный за его корпусом и выполненный из стали марки СтЗ.

Приведенный в статье анализ базируется на полученных авторами экспериментальных данных по характеристикам нейтронных полей в области опорных конструкций (в каналах ионизационных камер ИК, проходящих вблизи внутренней поверхности кольцевого бака) на Нововоронежской АЭС (НВАЭС) и Кольской АЭС (КАЭС), а также на модели реактора ВВЭР-440 (LR-0, ИЯИ, Чехия).

Характеристики поля тепловых и эпитепловых нейтронов (температура максвелловского распределения T , эпитепловой параметр $r\sqrt{T/T_0}$, плотность потока тепловых нейтронов nV_0) измерялись по методу Весткотта [1] с помощью активационных детекторов из лютеция, индия, золота, самария, лантана, марганца и меди. Параметры поля тепловых нейтронов в каналах ИК приведены в таблице. Это плотность потока нейтронов nV_0 , температура максвелловского распределения T , кадмиевое отношение R_{Cd} и эпитепловой параметр ($V_0 = 2200$ м/с, $T_0 = 293$ К). Все данные усреднены по блокам АЭС. Положение органов регулирования в измерениях соответствовало нормальному рабочему диапазону.

nV_0 , н/см ² с	T °К	$r\sqrt{T/T_0}$	R_{Cd}^{Cu}	R_{Cd}^{Mn}
$(2,04 \pm 0,10) \cdot 10^{10}$	409 ± 13	$0,08 \pm 0,01$	$12,0 \pm 0,04$	$12,2 \pm 0,04$

Двухпараметрическое представление спектра нейтронов в каналах ИК в области опорных конструкций применимо, поскольку спектр тепловых нейтронов достаточно близок к максвелловскому, а эпитепловых – к фермиевскому ($\sim 1/E$), т. е. полученные значения эпитеплового параметра, измеренные различными детекторами, весьма приближены друг к другу [2]. Как показали исследования полей нейтронов в каналах ИК НВАЭС и КАЭС, спектр тепловых нейтронов в этих каналах соответствует распределению Максвелла, а спектр надтепловых – спектру Ферми.

Из многократных измерений следует, что поле тепловых нейтронов характеризуется стабильностью и практически не зависит от выгорания топлива и концентрации борной кислоты в активной зоне.

Плотность потока быстрых нейтронов $\phi_{акт}$ измерялась с помощью активационных пороговых детекторов, содержащих ¹⁰³Rh, ¹¹⁵In, ⁵⁸Ni, ⁵⁴Fe, ¹²⁴Mg, ²⁷Al и ¹²⁷I.

Результаты измерений плотности потока быстрых нейтронов в каналах ИК при стандартной активной зоне в максимуме распределения приведены ниже.

НВАЭС блок 3, $\phi_{акт}(E > 0,5 \text{ МэВ}) = 6,45 \cdot 10^9 \text{ н/см}^2\text{с};$

НВАЭС блок 4, $\phi_{акт}(E > 0,5 \text{ МэВ}) = 7,37 \cdot 10^9 \text{ н/см}^2\text{с};$

КАЭС блок 1, $\phi_{акт}(E > 0,5 \text{ МэВ}) = 6,20 \cdot 10^9 \text{ н/см}^2\text{с}.$

Для определения плотности потока быстрых нейтронов были использованы также трековые нейтронные детекторы деления, которые состояли из алюминиевых дисков, содержащих слой ²³⁸U, и трековых регистраторов (слюда мусковит).

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

После облучения производилась стандартная обработка трековых регистраторов (травление, подсчет треков деления с помощью фотомикроскопа, цифровой камеры, персонального компьютера с распечаткой на лазерном принтере) для получения репликаций (рис.1).

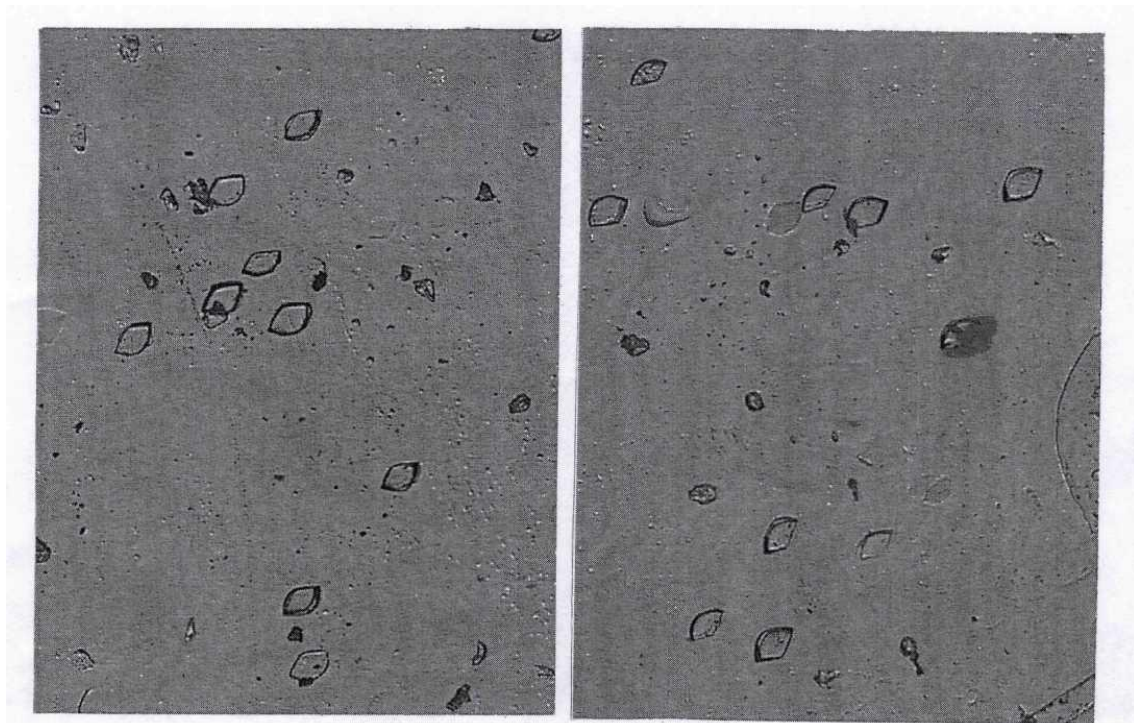


Рис. 1. Треки осколков деления в регистраторе

Плотность потока быстрых нейтронов в канале ИК блока 4 НВАЭС, измеренная трековыми делящимися детекторами, содержащими ^{238}U , составила $\Phi = 6,0510^9$ н/см²с для активной зоны с уменьшенной утечкой нейтронов в максимуме распределения Φ по высоте канала.

Для оценки степени охрупчивания материала опорной конструкции использовался дифференциальный спектр быстрых нейтронов (рис.2), измеренный на модели реактора ВВЭР-440 в области энергий 0,01-10 МэВ [3].

Спектр быстрых нейтронов измерялся с помощью спектрометра со стильбе-новым сцинтиллятором. Результаты в каждой точке получены усреднением некоторого количества измерений, что нашло отражение в соответствующем стандартном отклонении (относительной неопределенности).

Полученные данные о плотностях потоков тепловых и быстрых нейтронов, их отношение $nV/\Phi_b(E > \text{МэВ})$, измеренный спектр быстрых нейтронов и подтверждение фермиевского распределения эпитепловых нейтронов в каналах ИК позволили в терминах смещения на атом (СНА) провести с помощью экспериментальных данных оценку степени охрупчивания материала опорной конструкции реактора ВВЭР-440(230) с учетом вклада тепловых нейтронов.

В проведенной оценке использовалось сечение смещения в тепловой области энергий нейтронов, равное 10 б [4].

Скорость смещений от вклада тепловых нейтронов определяется как $0,2 \cdot 10^{-12}$ СНА/с, что составляет около 7% от величины СНА/с для нейтронов с энергией $E > 0,5$ МэВ.

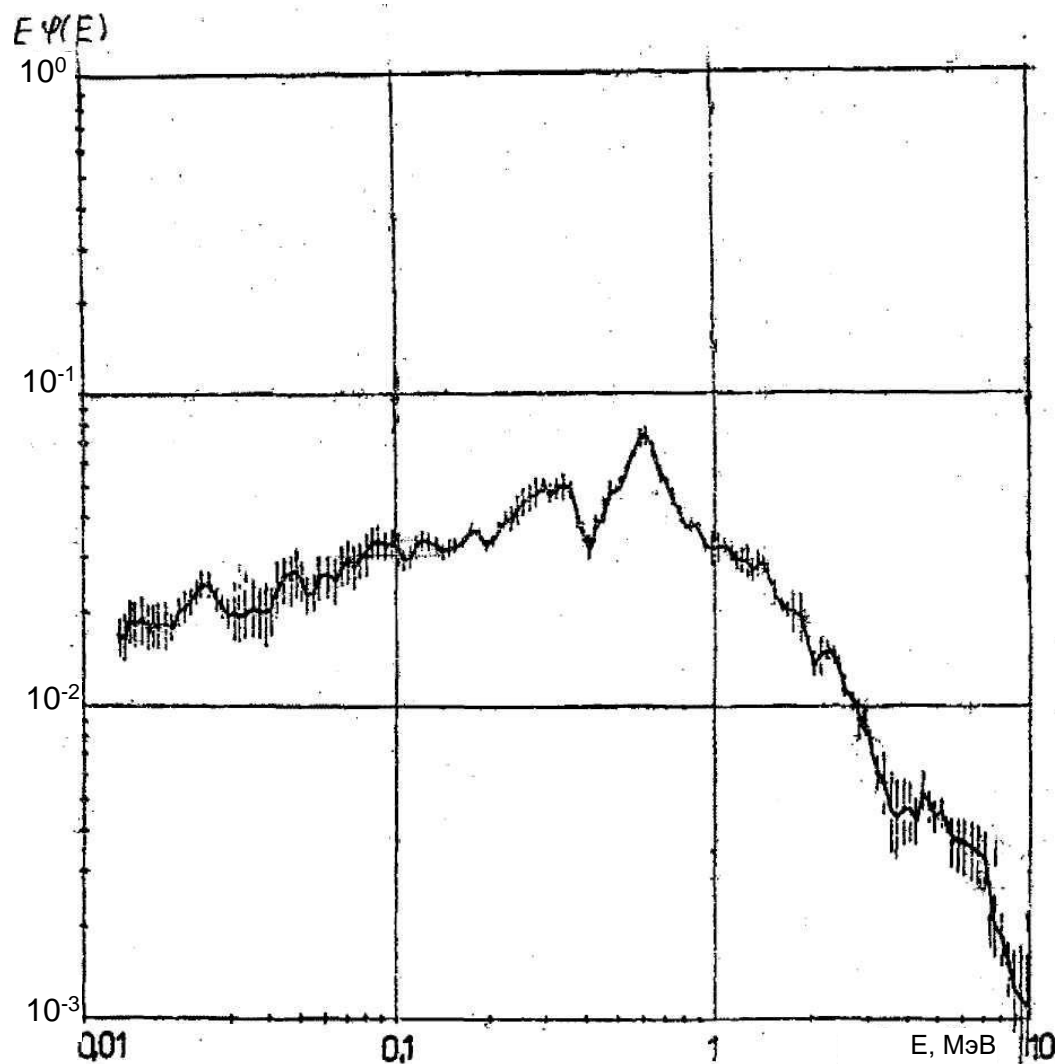


Рис. 2. Спектр нейтронов со статистической ошибкой

Литература

1. Westcott е.а. Proc. II Intern. Conf. Geneva. 1958. Conf. 15/P202.
2. С.С. Ломакин и др. // Экспериментальные данные о нейтронных полях ВВЭР-440. Атомная энергия. 1983. Т.54. Вып.3. С.41-42.
3. В. Osmera. Reaktor dosimetry of WWER-440 type reactors. Nucleon 3-4. 1993. P. 27-35.
4. Standard Practice for Characterizing Neutron Exposures in Iron and Low Alloy Steels in Terms of Displacements per Atom. USA, ASTM E693-94.