

## Функционалы нейтронного потока, воздействующего на корпус реактора ВВЭР-440

*Определены условия облучения корпуса реактора ВВЭР-440 при наличии и отсутствии кассет-экранов на периферии активной зоны. Исследованы распределения функционалов нейтронного потока на внутренней поверхности и в толще металла корпуса реактора при различных вариантах топливных загрузок.*

О. М. Пугач, В. Л. Демехин, В. М. Буканов, С. М. Пугач

### Функціонали нейтронного потоку, що діє на корпус реактора ВВЕР-440

*Визначено умови опромінення корпусу реактора ВВЕР-440 за наявності та відсутності касет-екранів на периферії активної зони. Досліджено розподіли функціоналів нейтронного потоку на внутрішній поверхні і в товщі металу корпусу реактора при різних варіантах паливних завантажень.*

**Б**езопасная эксплуатация корпуса ВВЭР, возможность продления срока его службы сверх установленного проектом во многом зависит от состояния металла корпуса. Важным источником информации об изменении свойств металла корпуса реактора (КР) под воздействием нейтронного излучения является программа образцов-свидетелей. В то же время результаты испытаний облученных образцов могут быть использованы для оценки технического состояния КР только в том случае, если известны условия облучения корпуса, прежде всего, его зон, из металла которых изготовлены образцы.

Конструкция реактора ВВЭР практически исключает возможность экспериментального определения условий облучения корпуса [1]. Решение этой задачи требует применения специальных методик. Такая методика для реакторов типа ВВЭР-440 разработана в Институте ядерных исследований НАН Украины [2]. Она обеспечивает определение значений функционалов нейтронного потока (ФНП), характеризующих условия облучения КР. К этим функционалам относят [2], прежде всего, такие линейные ФНП, как: флюенс нейтронов с энергией  $E_n > 0,5$  МэВ ( $\Phi_{0,5}$ ); приведенная к номинальной мощности реактора и усредненная за кампанию интегральная плотность потока нейтронов (ППН) с  $E_n > 0,5$  МэВ ( $\Phi_{0,5}$ ); число смещений на атом (с.н.а.), вызванных нейтронами с  $E_n > 0,5$  МэВ в материале корпуса ( $D_{0,5}$ ); приведенная к номинальной мощности реактора и усредненная за кампанию скорость накопления с.н.а. Кроме того, к ФНП, характеризующим условия облучения КР, причисляют спектральный индекс, который является нелинейным функционалом и рассчитывается как отношение флюенса нейтронов с  $E_n > 0,5$  МэВ к флюенсу нейтронов с  $E_n > 3,0$  МэВ ( $SI_{0,5}$ ).

Нижняя энергетическая граница, т. е. 0,5 МэВ, выше которой должны определяться значения ФНП, задается требованиями нормативных документов, действующих в атомной энергетике [3, 4]. Выбор величины флюенса нейтронов с  $E_n > 3,0$  МэВ при расчетах спектральных индексов объясняется тем, что энергия 3,0 МэВ является эффективным порогом реакции  $^{54}\text{Fe}(n, p)^{54}\text{Mn}$ , которая широко используется в реакторной дозиметрии [5].

Исследования условий облучения корпуса ВВЭР-440 выполнены на основе результатов, полученных для энергоблоков № 1 и № 2 Ровенской АЭС за все топливные кампании, которые достаточно типичны для реакторов этого типа. Следует заметить, что в активной зоне (АКЗ) реактора энергоблока № 1 вместо части ТВС на периферии установлены кассеты-экраны (КЭ) — распространенное явление при эксплуатации ВВЭР-440.

Рассмотрим, прежде всего, пространственные распределения значений линейных ФНП в околокорпусном пространстве (ОКП) ВВЭР-440.

### Пространственные распределения линейных функционалов нейтронного потока

Форма аксиального распределения значений любого линейного ФНП на внутренней поверхности КР, как видно, например, на рис. 1, достаточно слабо зависит от компоновки АКЗ. Максимум распределения расположен на высоте около 90 см от низа АКЗ реактора, а «полка» — между 80 и 150 см.

Крутизну изменения ФНП по высоте на уровне нижней части АКЗ в некоторой степени характеризует отно-

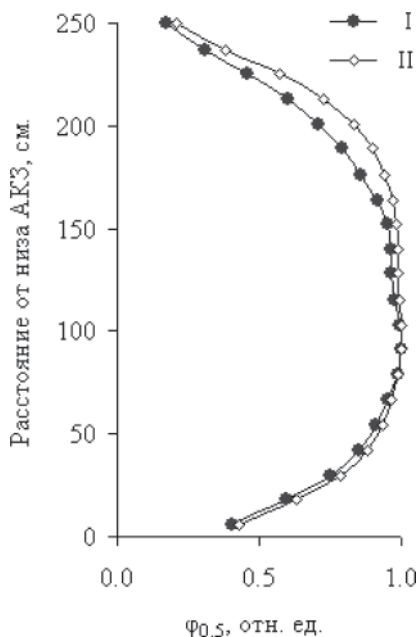


Рис. 1. Аксиальное распределение ПФН с  $E_n > 0,5$  МэВ на внутренней поверхности корпуса ВВЭР-440 в районе максимума азимутального распределения при наличии (I) и отсутствии (II) КЭ в АКЗ реактора

шение его максимального значения к значению на уровне шва № 4, т. е. на высоте 21,5 см. Для каждого типа компоновки АКЗ (т. е. при наличии или отсутствии КЭ) оно составляет приблизительно 1,8 для 1-й кампании и лежит в диапазоне 1,5÷1,7 для всех последующих, что численно подтверждает консервативность аксиального распределения. Учитывая этот факт, дальнейший анализ условий облучения КР выполнялся, прежде всего, на уровне максимальной радиационной нагрузки корпуса.

Форма азимутального распределения значений линейных ФНП на внутренней поверхности корпуса ВВЭР-440 (рис. 2) практически не зависит от характеристик топливной загрузки для каждого типа компоновки АКЗ. При наличии КЭ в АКЗ азимутальное распределение линейных

ФНП имеет следующие характерные особенности: глобальный минимум на азимуте 30°, локальный — 0° (60°) и два максимума — приблизительно 12° и 48°. Если КЭ отсутствуют в АКЗ, то те же координаты имеют глобальный и локальный максимумы и два минимума соответственно, т. е. само распределение можно условно назвать обратным первым. Условность связана с различными отношениями между максимальным и минимальным значениями линейных ФНП для заданного уровня. Для разных кампаний при наличии и отсутствии КЭ значения, например,  $\Phi_{0,5}$  лежат соответственно в диапазонах 1,7÷2,0 и 1,2÷1,6, а  $D_{0,5}$  — 1,8÷2,1 и 1,2÷1,5. Кстати, из приведенных значений видно, что поле нейтронов в ОКП реактора более консервативно при наличии КЭ в АКЗ. Этот вывод подтверждается и сравнением диапазонов максимальных для каждой кампании значений  $\Phi_{0,5}$ : 1,6÷2,8·10<sup>18</sup> и 3,5÷9,8·10<sup>18</sup> см<sup>-2</sup> в случае наличия и отсутствия КЭ соответственно; в первом случае как абсолютная, так и относительная ширина диапазона значительно меньше, чем во втором.

Сравнивать условия облучения КР для различных топливных кампаний с точки зрения величины радиационной нагрузки представляется более корректным не по значениям флюенса, а по значениям ПФН [6]. Сравнение диапазонов максимальных для каждой кампании значений  $\Phi_{0,5}$  в случае наличия КЭ (0,7÷1,1·10<sup>11</sup> см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>) и в случае их отсутствия (1,8÷3,2·10<sup>11</sup> см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>) показывает, что установка КЭ приводит к уменьшению радиационной нагрузки на КР примерно в 2,5—3 раза.

Изменение любого линейного ФНП по толщине корпуса ВВЭР-440, как показал их анализ, не зависит от аксиальной координаты. Несмотря на то, что данное изменение незначительно зависит от азимута при различных типах компоновки АКЗ, оно достаточно хорошо, как видно из рис. 3, может быть аппроксимировано единой формулой

$$F(x) = F(0) \cdot e^{-\alpha x},$$

где  $F(0)$  — ФНП на внутренней поверхности КР;  $\alpha$  — коэффициент ослабления;  $x$  — толщина КР.

Коэффициент ослабления для флюенса и ПФН с  $E_n > 0,5$  МэВ равен 0,09 см<sup>-1</sup>, а для с.н.а. — 0,11 см<sup>-1</sup>.

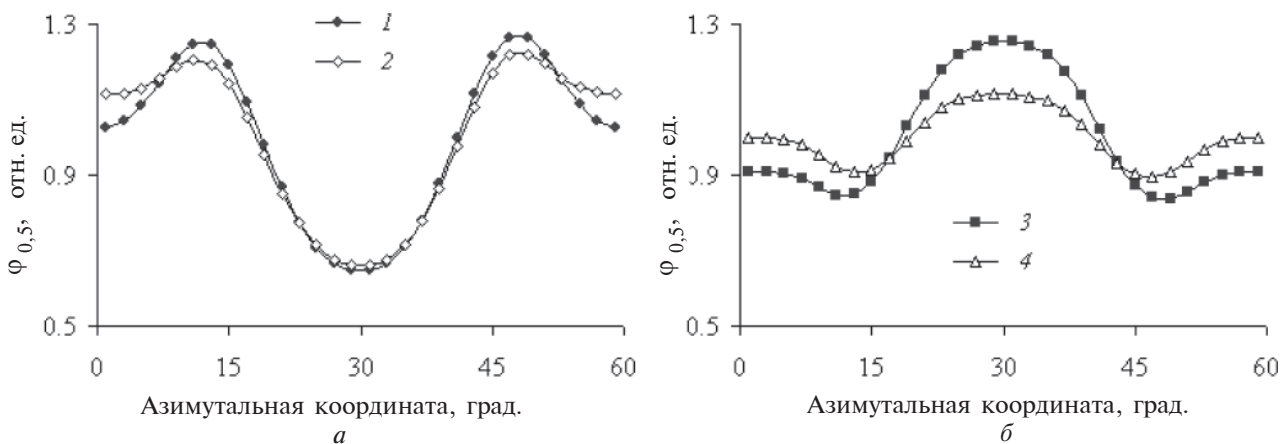


Рис. 2. Азимутальное распределение ПФН с  $E_n > 0,5$  МэВ на внутренней поверхности корпуса ВВЭР-440 на уровне его максимальной радиационной нагрузки при наличии (а) и отсутствии (б) КЭ в АКЗ:

1, 3 — топливные загрузки, характеризующиеся наличием свежего топлива на периферии АКЗ;  
2, 4 — топливные загрузки, характеризующиеся наличием выгоревшего топлива на периферии АКЗ

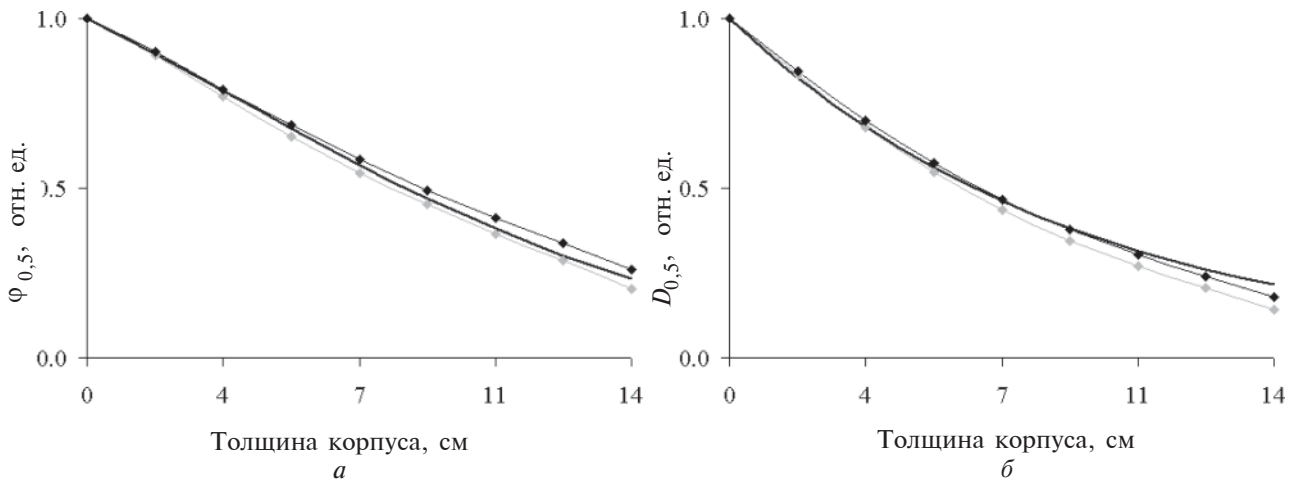


Рис. 3. Относительное изменение по толщине корпуса ВВЭР-440 ППН с  $E_n > 0,5$  МэВ (а) и числа с.н.а. (б) в районе максимума (◆) и минимума (◐) азимутального распределения и аппроксимирующая кривая (%)

### Пространственные зависимости спектрального индекса

Анализ спектров быстрых нейтронов в различных зонах ОКП реактора ВВЭР-440 показал, что они достаточно близки по форме (рис. 4). Это позволяет использовать в качестве ее достаточной характеристики единственный параметр — спектральный индекс, который, как указывалось выше, представляет собой отношение флюенса нейтронов с  $E_n > 0,5$  МэВ к флюенсу нейтронов с  $E_n > 3,0$  МэВ. Очевидно, что чем меньше величина спектрального индекса, тем больше в спектре доля высокоэнергетичных нейтронов. Такой спектр можно достаточно условно считать более жестким. И наоборот, чем больше указанная величина, тем меньше в спектре доля высокоэнергетичных нейтронов и тем мягче спектр.

Анализ полученных значений спектральных индексов показал, что формы спектра быстрых нейтронов на уровне АКЗ реактора зависят от азимутальной и радиальной координаты точки, но практически не зависят от аксиальной.

Общая форма азимутальной зависимости спектрального индекса на внутренней поверхности корпуса ВВЭР-440

практически не связана с характеристиками топливной загрузки для каждого типа компоновки АКЗ. При этом азимутальное распределение  $SI_{0,5}$  вне зависимости от компоновки АКЗ имеет следующие общие особенности (рис. 5): два глобальных минимума на азимуте около  $13^\circ$  и  $47^\circ$  и один слабовыраженный локальный —  $0^\circ$  ( $60^\circ$ ), а также два слабовыраженных локальных максимума —  $5^\circ$  и  $55^\circ$ . Отличие в общей форме распределения  $SI_{0,5}$  для различных типов компоновки АКЗ наблюдается в диапазоне углов от  $23^\circ$  до  $37^\circ$ : при отсутствии КЭ оно практически постоянно со слабовыраженным экстремумом на азимуте  $30^\circ$ , а при их наличии имеет ярко выраженный глобальный максимум с той же координатой. Именно здесь для некоторых кампаний спектральный индекс достигает своего абсолютно максимального значения, равного 7,3, т. е. на корпус ВВЭР-440 воздействует нейтронный поток с наиболее мягким спектром. А нейтронный поток с наиболее жестким спектром воздействует на КР в районе глобального минимума азимутального распределения  $SI_{0,5}$ , где для некоторых кампаний реактора с КЭ в АКЗ его значение составляет 6,1. Напомним, что для этого типа компоновки АКЗ примерно здесь же находится и максимум азимутального распределе-

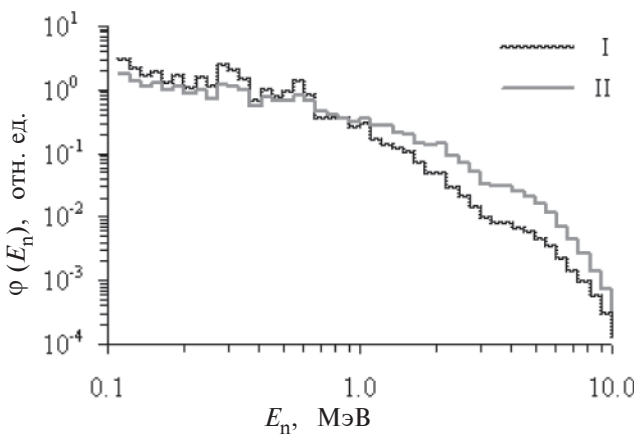


Рис. 4. Нормированные спектры нейтронов в ОКП реактора ВВЭР-440: I — на внешней поверхности корпуса при наличии КЭ в АКЗ; II — на внутренней поверхности корпуса при отсутствии КЭ в АКЗ

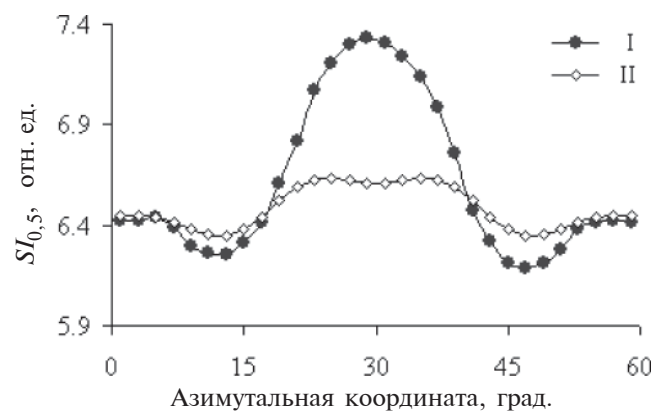


Рис. 5. Азимутальное распределение спектральных индексов на внутренней поверхности корпуса ВВЭР-440 на уровне его максимальной радиационной нагрузки при наличии (I) и отсутствии (II) КЭ в АКЗ реактора

ния ППН. При другом типе компоновки АКЗ, т. е. в случае отсутствия КЭ, имеется обратная зависимость: в области максимума ППН спектр нейтронов более мягкий, чем в области минимума. При этом диапазон значений  $SI_{0,5}$  для разных кампаний при отсутствии КЭ (6,4 — 6,9) входит в диапазон значений  $SI_{0,5}$  при их наличии (6,1 — 7,3).

Изменение спектрального индекса по толщине КР практически не зависит ни от компоновки АКЗ, ни от азимутальной и аксиальной координат.

## Выводы

Определены условия облучения корпуса ВВЭР-440 при наличии и отсутствии КЭ в АКЗ реактора.

Показано, что форма азимутальных и аксиальных распределений линейных ФНП на внутреннюю поверхность КР практически не зависит от характеристик топливной загрузки для каждого типа компоновки АКЗ, т. е. наличия или отсутствия КЭ, а меняется только по абсолютной величине.

Установка КЭ на периферию АКЗ приводит к уменьшению радиационной нагрузки на КР примерно в 2,5 — 3 раза.

Нейтронный поток с наиболее жестким спектром воздействует на корпус ВВЭР-440 при наличии КЭ в АКЗ в районе максимума азимутального распределения ППН, а с наиболее мягким — в районе минимума. В случае отсутствия КЭ спектральные индексы имеют меньший диапа-

зон значений и в области максимума ППН спектр нейтронов более мягкий, чем в области минимума.

## Литература

1. Пояснительная записка к предложению по разработке и внедрению штатных систем мониторинга радиационной нагрузки корпусов и внутрикорпусных устройств реакторов ВВЭР (СМРН ВВЭР): Приложение 2 к письму ИАЭ им. И. В. Курчатова (Москва, Россия) № 36-04/1 от 21.01.91 к зам. Министра Минатомэнергопрома СССР. — 5 с. (2.диск).
2. Пугач А. М., Буканов В. Н., Васильева Е. Г. и др. Разработка методических основ системы мониторинга радиационной нагрузки корпуса реактора ВВЭР-440 // 36. науч. праць Ін-ту ядерних досліджень. — 2006. — № 2 (18). — С. 64–69.
3. Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПН АЭ Г-7-008-89). — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 168 с.
4. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПН АЭ Г-7-002-86). — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 527 с.
5. Брегадзе Ю. И., Степанов Э. К., Ярына В. П. Прикладная метрология ионизирующих излучений. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 264 с.
6. Буканов В. Н., Васильева Е. Г., Вишневский И. Н. и др. Мониторинг радиационной нагрузки корпуса ядерного реактора как составная часть программы управления сроком службы оборудования энергоблока АЭС // Ядерная и радиационная безопасность. — 2005. — № 2. — С. 22–27.