

**Кочкин Вячеслав Николаевич**

**Расчетно-экспериментальный анализ условий облучения и разработка  
процедуры определения флюенса быстрых нейтронов  
для образцов-свидетелей корпусов реакторов ВВЭР-440**

05.14.03- Ядерные энергетические установки, включая  
проектирование, эксплуатацию и вывод из  
эксплуатации.

**Автореферат**

Диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва, 2011

Работа выполнена в Национальном исследовательском центре  
«Курчатовский институт».

Научный руководитель доктор технических наук, профессор,  
Штромбах Ярослав Игоревич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор,  
Петров Эрнст Ефимович

доктор технических наук,  
Рязанов Дмитрий Константинович

Ведущая организация: ОАО ОКБ «Гидропресс»

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2011г.  
в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д520.009.06 в  
Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт»

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский  
институт»

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2011г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
д.т.н., профессор

Мадеев В.Г.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность проблемы**

Задача обеспечения надежной работы корпусов ядерных реакторов является одной из важнейших в комплексе вопросов безопасности АЭС. В процессе эксплуатации происходит изменение прочностных свойств материала корпуса реактора (КР) вследствие облучения потоками быстрых нейтронов, приводящее к его радиационному охрупчиванию, что повышает вероятность хрупкого разрушения КР при аварийном расхолаживании и, тем самым, ограничивает его ресурс. Осуществление контроля за состоянием металла КР в течение всего назначенного срока службы осуществляется с помощью программы образцов-свидетелей (ОС).

На текущий момент проектный срок службы реакторов ВВЭР-440, эксплуатирующихся в России и на Украине, подходит к концу и требуется выполнение работ по обоснованию безопасной эксплуатации КР ВВЭР-440 с учетом продления срока службы. Обоснование безопасной эксплуатации выполняется на основе моделей радиационного охрупчивания материалов КР ВВЭР-440, которые, в свою очередь, опираются на результаты исследований ОС.

Для корректного построения модели радиационного охрупчивания материалов КР ВВЭР-440 необходимо, чтобы результаты исследования ОС представляли собой согласованный массив данных, т.е. были получены с использованием одних и тех же методических подходов. Однако, недостатки, а также изменения, которые с течением времени претерпевала процедура определения флюенса нейтронов на ОС реакторов ВВЭР-440, не позволяют рассматривать результаты их испытаний как согласованный массив данных. Для создания корректной базы данных результатов исследования ОС корпусов реакторов ВВЭР-440 требуется разработать единый расчетно-экспериментальный подход и выполнить переоценку флюенса нейтронов на уже выгруженных и исследованных комплектах.

Кроме того, необходимо отметить отсутствие надежных расчетно-экспериментальных оценок условий облучения ОС в каналах реакторов ВВЭР-440. Получение таких данных требуется для разработки и подготовки новых программ ОС, планирования и реализации исследовательских программ по облучению конструкционных материалов в каналах ВВЭР-440, а также для учета различия условий облучения образцов и внутренней поверхности корпуса реактора при нахождении соответствия между результатами испытаний образцов и состоянием корпуса реактора.

### **Цель работы**

Целью работы является разработка и внедрение процедуры определения флюенса быстрых нейтронов для образцов-свидетелей корпусов реакторов ВВЭР-440, выполнение расчетно-экспериментального анализа условий облучения образцов-свидетелей КР ВВЭР-440.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

1. Разработка расчетно-экспериментальной методики определения флюенса быстрых нейтронов на ОС КР ВВЭР-440, учитывающей особенности штатной программы ОС и позволяющей определение флюенса нейтронов на образцах после длительного облучения.
2. Адаптация программного комплекса (DOT3.5+ANISN+BUGLE96) для расчетов переноса нейтронов в канале ОС реакторов ВВЭР-440 с полной активной зоной и кассетами-экранами (КЭ), разработка уточненных расчетных моделей с подробным описанием геометрии и материалов облучательного канала и контейнеров с ОС.
3. Получение экспериментальных данных для подтверждения корректности разработанных расчетных моделей и оценки характеристик нейтронного поля в каналах ОС реакторов ВВЭР-440 с полной активной зоной и КЭ;
4. Проверка и обоснование разработанных моделей для расчета параметров нейтронного поля в каналах ОС ВВЭР-440 с КЭ и полной активной зоной на результатах выполненных экспериментальных исследований.
5. Тестирование разработанной методики определения флюенса быстрых нейтронов на примере штатных комплектов ОС КР с полной активной зоной и КЭ.
6. Проведение сравнительного расчетно-экспериментального анализа условий облучения ОС в каналах реакторов ВВЭР-440/213 с полной активной зоной и с КЭ.
7. Сравнение условий облучения ОС и КР ВВЭР-440/213, оценка распределения коэффициентов опережения облучения ОС по отношению к КР по гирляндам с ОС в реакторах с полной активной зоной и КЭ.

### **Научная новизна и практическая значимость работы**

1. Разработана расчетно-экспериментальная методика определения флюенса быстрых нейтронов на образцах-свидетелях КР ВВЭР-440/213, учитывающая историю облучения образцов, влияние схемы загрузки активной зоны реактора и зависимость спектральных характеристик поля нейтронов от положения образцов. Предложенные расчетно-экспериментальные подходы использованы не только для ОС ВВЭР-440, но и для разработки и внедрения методики определения флюенса быстрых нейтронов на образцах-свидетелях реакторов ВВЭР-1000 и разработки процедуры определения флюенса нейтронов на образцах, облучающихся в исследовательском реакторе ИР-8.

2. Выполненные оценки величины спектрального индекса  $SI_{0.5/3.0}$  в каналах ОС реакторов с полной активной зоной и КЭ показали неравномерность распределения  $SI_{0.5/3.0}$  по высоте канала, что обусловлено влиянием граненых поясов, фиксирующих выгородку реактора.

3. Показаны значимые различия спектральных характеристик в каналах ОС реакторов ВВЭР-440 с полной активной зоной и КЭ.

4. Выполнены расчетно-экспериментальные оценки распределения коэффициентов опережения (КО), по высоте гирлянд с ОС в реакторах с полной активной зоной и КЭ.

5. Результаты расчетно-экспериментальных оценок условий облучения образцов-свидетелей в каналах реакторов ВВЭР-440/213 применены при разработке новых программ образцов-свидетелей ВВЭР-440, при планировании и подготовке программ по облучению исследовательских образцов в каналах ВВЭР-440/213, а также для учета различия условий облучения образцов-свидетелей и внутренней поверхности КР при нахождении соответствия между результатами испытаний образцов-свидетелей и состоянием корпуса реактора.

6. Разработанная методика определения флюенса быстрых нейтронов на ОС КР ВВЭР-440 применена для переоценки флюенса быстрых нейтронов на всех образцах-свидетелях, а также образцах исследовательских программ облучавшихся в Российских и Украинских АЭС с ВВЭР-440. На основе полученных результатов сформирована представительная база данных для построения моделей радиационного охрупчивания материалов корпусов реакторов ВВЭР-440, необходимых при обосновании продления срока службы КР.

7. С помощью разработанной расчетно-экспериментальной методики определения флюенса быстрых нейтронов на ОС КР ВВЭР-440 выполнены работы по обоснованию эксплуатации в период продления срока службы до 45 лет КР ВВЭР-440 1-го поколения (1,2 блоков Кольской АЭС и 3,4 блоков Нововоронежской АЭС).

8. Разработанная методика использовалась при обосновании срока службы КР 1-го и 2-го блоков Ровенской АЭС на проектный срок и с учетом их продления на 20 лет.

### **Основные положения выносимые на защиту**

1. Расчетно-экспериментальная методика определения флюенса быстрых нейтронов на ОС КР ВВЭР-440/213.
2. Результаты сравнительного анализа условий облучения ОС в реакторах с полной активной зоной и кассетами-экранами.
3. Результаты сравнения условий облучения ОС и корпусов реакторов ВВЭР-440/213.

**Личный вклад автора** заключается в выполнении основного объема расчетных и экспериментальных исследований, изложенных в диссертационной работе, включающих: разработку методики определения флюенса быстрых нейтронов для ОС КР ВВЭР-440; подготовку расчетных схем для расчета параметров нейтронных полей на ОС и КР ВВЭР-440; проведение нейтронных расчетов; выполнение измерений удельной

активности проб металла и нейтронно-активационных детекторов; анализ полученных расчетных и экспериментальных результатов.

### **Объем и структура работы**

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы из 127 наименований, содержит 120 страниц, 37 рисунков и 11 таблиц и одного приложения.

### **Апробация работы**

Основные положения работы докладывались и обсуждались на 13-ом Международном Симпозиуме по реакторной дозиметрии (Экерслот, Нидерланды, 2008), На 2-м международном симпозиуме МАГАТЭ по управлению ресурсом АЭС в 2007 г. (Шанхай, Китай, 2007).

### **Публикации**

По материалам диссертационной работы опубликовано 7 работ, перечень которых приведен в конце автореферата.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель работы и решаемые задачи, научная новизна и практическая ценность, изложены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассмотрено современное состояние проблемы определения флюенса быстрых нейтронов на ОС.

В начале раздела рассматриваются особенности конструкции реакторной установки (РУ) ВВЭР-440. Проведен анализ программы ОС реакторов ВВЭР-440, выделены основные недостатки штатного нейтронно-дозиметрического сопровождения ОС. Показано, что применение только штатных нейтронно-активационных детекторов (НАД) не позволяет определить флюенс нейтронов на каждом образце.

Представлен обзор основных расчетных и экспериментальных подходов используемых при определении флюенса нейтронов на ОС. Рассмотрено применение метода нейтронно-активационного анализа для решения задач внутриреакторной дозиметрии. Приведены наиболее распространенные методы измерения удельных активностей нейтронно-активационных детекторов. Также в разделе рассматриваются основные методы расчета транспорта нейтронов для оценки нейтронных полей в реакторах ВВЭР и наиболее распространенные программные пакеты, применяемые для этих целей.

Проведен анализ нейтронно-дозиметрических исследований ОС КР ВВЭР-440, выполнявшихся в России и за рубежом. Показаны основные достоинства и недостатки процедуры определения флюенса быстрых нейтронов на ОС ВВЭР-440, применявшейся при исследовании ОС

Российских и Украинских АЭС. Показано, что недостатки, а также изменения, которые с течением времени претерпевала процедура определения флюенса нейтронов на ОС реакторов ВВЭР-440, не позволяют рассматривать результаты испытаний ОС как согласованный массив данных.

Процедуры определения флюенса быстрых нейтронов на ОС ВВЭР-440, используемые в других странах опираются на использование расширенных наборов НАД, которыми были оснащены ОС при проведении модернизации штатных программ ОС и результаты расширенных дозиметрических экспериментов, выполненных в каналах ОС ВВЭР-440.

Программа ОС Российских и Украинских реакторов ВВЭР-440 подобной модернизации не подвергалась, и расширенных экспериментальных исследований параметров нейтронных полей в каналах ОС ВВЭР-440 также не выполнялось, при этом в литературе результаты исследований, проведенных за рубежом, представлены в недостаточно полном для использования объеме и зачастую расходятся друг с другом.

Обоснование безопасной эксплуатации КР выполняется на основе моделей радиационного охрупчивания материалов КР ВВЭР-440, которые, в свою очередь, опираются на результаты исследований ОС. Это приводит к необходимости проведения расширенных расчетно-экспериментальных исследований условий облучения ОС КР ВВЭР-440, разработки единого расчетно-экспериментального подхода к определению флюенса нейтронов, который должен учитывать особенности штатной программы ОС и имеющиеся экспериментальные данные по исследованию выгруженных ранее образцов, а также к необходимости выполнения переоценки флюенса нейтронов на всех выгруженных и исследованных комплектах ОС ВВЭР-440 и исследовательских программ.

**Вторая глава** посвящена разработке методики переоценки флюенса быстрых нейтронов на ОС ВВЭР-440.

Основные требования к методике определения флюенса нейтронов на ОС ВВЭР-440 сформулированы следующим образом:

- Методика должна учитывать особенности нейтронно-дозиметрического сопровождения штатной программы ОС в т.ч. то, что основным источником экспериментальных данных являются результаты измерения удельной активности  $^{54}\text{Mn}$  в материале образцов;
- При определении флюенса нейтронов должна учитываться сложная история облучения образцов, в т.ч. изменение схемы загрузки активной зоны реактора в процессе облучения; возможное перемещение гирлянд с образцами в другой реактор; изменение спектра нейтронов в процессе облучения; изменение геометрии гирлянд с образцами в процессе облучения.

Требования, связанные с возможным изменением геометрии гирлянды при облучении и перестановкой образцов в каналы другого реактора, относятся в первую очередь к исследовательским программам.

В соответствии со сформулированными требованиями была разработана процедура, в основе которой лежат результаты измерения

активности  $^{54}\text{Mn}$  каждого ОС и результаты нейтронного расчета, проводимого индивидуально для каждой кампании, в течение которой облучались исследуемые образцы.

Расчетное значение плотности потока нейтронов с энергией  $E > 3,0$  МэВ, усредненное по топливным циклам, в течение которых проводилось облучение, для каждого образца, облучавшегося в канале ОС, может быть получено по формуле:

$$\overline{(\varphi_{>3,0}^{cal})} = \frac{\sum_{i=1}^N \varphi_{>3,0}^{calc,i}(h_i) \times t_{eff}^i}{\sum_{i=1}^N t_{eff}^i} \quad (1)$$

где:

$h_i$  – аксиальная координата ОС в канале, в котором образец облучался в течение  $i$ -го топливного цикла;

$\varphi_{>3,0}^{cal,i}(h_i)$  – расчетное значение плотности потока нейтронов, воздействовавших на образец в течение  $i$ -го топливного цикла,  $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$ ;

$t_{eff}^i$  – продолжительность  $i$ -ого топливного цикла, эфф. суток.

Тогда относительная плотность потока нейтронов  $\varphi_{>3,0}^{rel,i}(h_i)$ , нормированная на  $\overline{(\varphi_{>3,0}^{cal})}$ , для каждого топливного цикла  $i$ , в течение которого облучался образец, находится по соотношению:

$$\varphi_{>3,0}^{rel,i}(h_i) = \frac{\varphi_{>3,0}^{cal,i}(h_i)}{\overline{(\varphi_{>3,0}^{cal})}} \quad (2)$$

Расчетно-экспериментальное значение плотности потока нейтронов с энергией  $E > 3,0$  МэВ, усредненное по всему периоду облучения образца, рассчитывается по формуле

$$\overline{(\varphi_{>3,0}^{exp})} = \frac{A_{eoi}^{Mn}}{\sigma_{>3,0} \sum_{i=1}^N K_i} \quad (3)$$

где:

$A_{eoi}^{Mn}$  – измеренная удельная активность изотопа  $^{54}\text{Mn}$  в образце на момент конца облучения, Бк/ядро;

$\sigma_{>3,0}$  – интегральное сечение реакции  $^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$ ;

$K_i$  – фактор, учитывающий историю облучения в топливном цикле  $i$ :

$$K_i = \varphi_{>3,0}^{rel,i}(h_i) \times \sum_k P_k (1 - e^{-\lambda(\Delta t_k)}) e^{-\lambda(t_{eoi} - t_k)} \quad (4)$$

$P_k$  – тепловая мощность реактора в интервале времени  $k$  топливного цикла  $i$ ;

$\Delta t_k$  – длительность интервала времени  $k$  топливного цикла  $i$ ;

$t_k$  – окончание интервала времени  $k$  топливного цикла  $i$ ;

$t_{eoi}$  – окончание облучения;



$\lambda$  – постоянная распада изотопа  $^{54}\text{Mn}$ ;

Расчетно-экспериментальные значения  $\varphi_{>3.0}^i(h_i)$  плотности потока нейтронов с энергией  $E > 3.0$  МэВ, действовавших в  $i$ -том топливном цикле на образец, можно теперь получить в виде:

$$\varphi_{>3.0}^i(h_i) = (\overline{\varphi_{>3.0}^{\text{exp}}}) \times \varphi_{>3.0}^{\text{rel},i}(h_i). \quad (5)$$

Таким образом, значение флюенса нейтронов с энергией  $E > 0,5$  MeV  $\Phi_{>0.5}$  для образцов, облучавшихся в течение  $M$  топливных циклов, равно

$$\Phi_{>0.5} = \sum_i^M SI_{0.5/3.0}(h_i) \times \varphi_{>3.0}^i \times t_{\text{eff}}^i \quad (6)$$

где  $SI_{0.5/3.0}(h_i)$ - спектральный индекс в канале ОС в положении  $h$  в топливном цикле  $i$ .

Значение спектрального индекса  $SI_{0.5/3.0}$ , используемое в процедуре переоценки флюенса, является расчетным, и при его получении необходим подробный учет геометрии внутрикорпусных устройств реактора, канала ОС и контейнеров с образцами.

Таким образом, можно выделить следующие основные этапы процедуры переоценки флюенса на ОС реактора ВВЭР-440:

- 1) Измерение относительной активности изотопа  $^{54}\text{Mn}$  в области надреза каждого образца. Отбор проб металла от нескольких образцов, измерение их активности и определение абсолютных значений активности  $^{54}\text{Mn} - A_{\text{eoi}}^{54\text{Mn}}$  в образцах.
- 2) Проведение нейтронных расчетов для каждого топливного цикла, в течение которого облучались образцы. В результате расчета для каждого контейнера с образцами, в зависимости от его положения в канале, получают значения величин  $\varphi_{>3.0}^i(h)$ ,  $SI_{0.5/3.0}^i(h)$ ,  $\sigma_{>3.0}^i(h)$ .
- 3) Определение расчетно-экспериментальных значений плотностей потока и флюенса нейтронов, действовавших на каждый образец, по соотношениям (1-6).

Очевидно, что приведенные выше рассуждения могут быть применены для определения флюенса нейтронов на ОС, облучавшихся в каналах ВВЭР-440, не только по активности  $^{54}\text{Mn}$ , но и по другим дозиметрическим реакциям на быстрых нейтронах, в зависимости от имеющихся экспериментальных данных. При этом одной из задач, необходимых для внедрения предложенного подхода при определении флюенса быстрых нейтронов на ОС ВВЭР-440, является корректный расчет параметров нейтронного поля в каналах ОС.

**Третья глава** посвящена описанию методики расчета и расчетных моделей, использованных при выполнении данной работы.

Расчет пространственного распределения плотности потока быстрых нейтронов на корпусах реакторов и образцах свидетелей был осуществлен в многогрупповом приближении методом дискретных ординат с помощью программ DOT3, ANISN и библиотеки групповых сечений BUGLE 96.

Трехмерное распределение нейтронного поля было получено методом синтеза двух двумерных ( $R-\theta$  и  $R-Z$ ) и одномерного ( $R$ ) расчетов.

Особенностью разработанной расчетной модели является подробное описание геометрии и материалов облучательного канала и контейнеров с ОС. Пример аппроксимации геометрии в области канала с ОС приведен на рисунке 1.

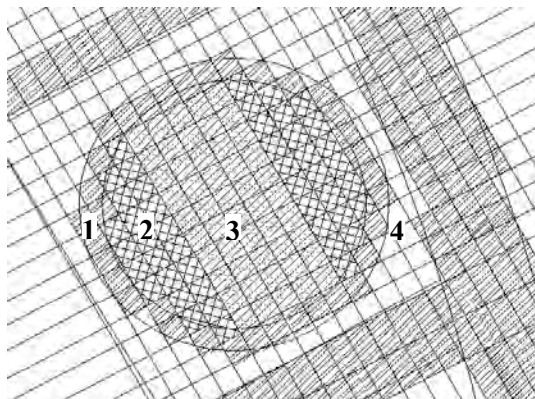


Рисунок 1. Фрагмент  $R-\theta$  сетки в пределах канала образцов-свидетелей.

1- стенка контейнера, 2- алюминиевый наполнитель, 3- образцы-свидетели, 4- вода в канале.

Для подготовки источника нейтронов в  $R-\theta$  геометрии использовались результаты расчета по ТВЭЛЬНОГО приращения выгорания в кассетах сектора 60-градусной симметрии для выбранных топливных циклов. Относительные интенсивности источника переносятся на расчетную сетку с помощью специально разработанного пакета программ, рассчитывающих относительный вклад мощности ТВЭЛа в ячейку  $R-\theta$  сетки по соотношению площадей ТВЭЛов, попадающих в данную ячейку, с площадью ячейки.

Аксиальное распределение интенсивности источника нейтронов в активной зоне при расчете условий облучения образцов-свидетелей в  $R-Z$  геометрии рассчитывалось по данным о распределении приращения выгорания по высоте периферийных топливных кассет, расположенных напротив канала образцов-свидетелей.

Аксиальное распределение интенсивности источника нейтронов в активной зоне при расчете условий облучения корпуса реактора в  $R-Z$  геометрии рассчитывалось по данным о распределении приращения выгорания по высоте всех периферийных топливных кассет сектора 60-градусной симметрии.

Для проведения расчетов нейтронных полей на ОС предложено два подхода к моделированию геометрии гирлянды:

– приближение «непрерывного» контейнера, в котором гирлянда с образцами описывается одним контейнером соответствующей длины и зазоры между контейнерами не учитываются;

– приближение с «дискретными» контейнерами, в котором учитывается точное расположение контейнеров и разрывы между ними.

**Четвертая глава** посвящена экспериментальному обоснованию методики расчёта нейтронного поля в каналах образцов-свидетелей.

В разделе 4.1 приводится описание эксперимента по облучению двух метрологических гирлянд в каналах ОС реактора 3-го блока Кольской АЭС и измерению удельной активности НАД выполнявшихся в рамках международного метрологического проекта COBRA. Анализ полученных экспериментальных результатов показывает, что, несмотря на одинаковую конструкцию каналов ОС и экспериментальных гирлянд и симметричную загрузку активной зоны реактора, усредненные по контейнерам значения скоростей реакций НАД для идентичных контейнеров двух гирлянд имеют систематическое различие, составляющее в среднем 6-7%. Полученный результат свидетельствует о том, что каналы, предназначенные для образцов-свидетелей, по своим нейтронным характеристикам не являются полностью идентичными.

Проводится сравнение экспериментальных результатов с расчетом. Показано, что совокупно по обеим гирляндам, при расчете с «непрерывным» контейнером, диапазоны C/E составляют (0,96-1,10) для скорости реакции  $^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$ , (0,96-1,08) для скорости реакции  $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$ , (0,85-1,00) для скорости реакции  $\text{Ti}(n,x)^{46}\text{Sc}$  и (1,02-1,17) для скорости реакции  $^{93}\text{Nb}(n,n')^{93m}\text{Nb}$  при средних значениях C/E 1,03, 1,03, 0,92 и 1,10 соответственно.

Результаты расчетов по схеме с «дискретным» контейнером хорошо согласуются с расчетами по схеме с «непрерывным» контейнером, при этом находятся несколько ближе к эксперименту. Совокупно по обеим гирляндам среднее значение C/E для скоростей реакций  $^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$  и  $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$  равно 1,00, для скорости реакции  $\text{Ti}(n,x)^{46}\text{Sc}$  -0,91, для скорости реакции  $^{93}\text{Nb}(n,n')^{93m}\text{Nb}$  -1,00. Сравнение экспериментальных и расчетных скоростей реакций приведено в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Сравнение расчета выполненного в приближении «непрерывного» контейнера с экспериментом.

| Гирлянда | Контейнер | C/E                   |                       |                                       |                                |
|----------|-----------|-----------------------|-----------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
|          |           | $^{54}\text{Fe}(n,p)$ | $^{58}\text{Ni}(n,p)$ | $^{93}\text{Nb}(n,n')^{93m}\text{Nb}$ | $\text{Ti}(n,x)^{46}\text{Sc}$ |
| 1        | 2         | 1,01                  | 0,96                  | 1,08                                  | 0,85                           |
|          | 3         | 0,96                  | 0,98                  | 1,02                                  | 0,87                           |
|          | 8         | 1,01                  | 1,02                  | 1,06                                  | 0,90                           |
|          | 10        | 1,02                  | 1,02                  | 1,11                                  | 0,91                           |
|          | среднее   | <b>1,00</b>           | <b>1,00</b>           | <b>1,07</b>                           | <b>0,88</b>                    |
| 2        | 2         | 1,08                  | 1,04                  | 1,14                                  | 0,90                           |
|          | 3         | 1,03                  | 1,08                  | 1,12                                  | 0,96                           |
|          | 8         | 1,03                  | 1,06                  | 1,11                                  | 0,96                           |
|          | 10        | 1,10                  | 1,08                  | 1,17                                  | 1,00                           |
|          | среднее   | <b>1,06</b>           | <b>1,06</b>           | <b>1,13</b>                           | <b>0,96</b>                    |

Использование расширенных наборов НАД позволяет оценить распределение отношений скоростей реакций в местах расположения контейнеров с НАД, которые коррелируют с соответствующими

спектральными индексами. Важность корректной оценки спектральных индексов и, в первую очередь, величины  $SI_{0.5/3.0}$ , определяется тем, что они используются для перехода от флюенсов, определенных по соответствующим реакциям, к флюенсу нейтронов с  $E > 0,5$  МэВ. В таблице 3 приведены расчетные и экспериментальные отношения скорости реакции  $^{93}\text{Nb}(n,n')^{93m}\text{Nb}$  к скоростям реакций  $^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$ ,  $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$ ,  $\text{Ti}(n,x)^{46}\text{Sc}$ .

Таблица 2. Сравнение расчета выполненного в приближении дискретного контейнера с экспериментом.

| Гирлянда | Контейнер | C/E                   |                       |                                       |                                |
|----------|-----------|-----------------------|-----------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
|          |           | $^{54}\text{Fe}(n,p)$ | $^{58}\text{Ni}(n,p)$ | $^{93}\text{Nb}(n,n')^{93m}\text{Nb}$ | $\text{Ti}(n,x)^{46}\text{Sc}$ |
| 1        | 2         | 0,98                  | 0,93                  | 0,99                                  | 0,84                           |
|          | 3         | 0,94                  | 0,95                  | 0,93                                  | 0,86                           |
|          | 8         | 0,98                  | 0,99                  | 0,96                                  | 0,89                           |
|          | 10        | 1,00                  | 0,99                  | 1,00                                  | 0,91                           |
|          | среднее   | <b>0,97</b>           | <b>0,97</b>           | <b>0,97</b>                           | <b>0,87</b>                    |
| 2        | 2         | 1,05                  | 1,00                  | 1,04                                  | 0,90                           |
|          | 3         | 1,01                  | 1,04                  | 1,01                                  | 0,95                           |
|          | 8         | 1,00                  | 1,02                  | 1,03                                  | 0,95                           |
|          | 10        | 1,07                  | 1,05                  | 1,05                                  | 0,99                           |
|          | среднее   | <b>1,03</b>           | <b>1,03</b>           | <b>1,03</b>                           | <b>0,95</b>                    |

Таблица 3. Усредненные по гирляндам отношения расчетных и экспериментальных скоростей реакций

|           | эксперимент |      | расчет<br>«непрерывный»<br>контейнер | расчет<br>«дискретный»<br>контейнер |
|-----------|-------------|------|--------------------------------------|-------------------------------------|
|           | Г1          | Г2   |                                      |                                     |
| RRFe/RRNb | 2,83        | 2,81 | 3,02                                 | 2,81                                |
| RRNi/RRNb | 2,02        | 2,07 | 2,16                                 | 2,03                                |
| RRTi/RRNb | 20,3        | 20,3 | 24,4                                 | 22,5                                |

На рисунке 2 представлено сравнение отношения скоростей реакций  $^{93}\text{Nb}(n,n')^{93m}\text{Nb}$  и  $^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$ , полученных в рамках международного сличительного метрологического проекта COBRA, с результатами расчета в приближении «дискретных» контейнеров и приведенными в литературных источниках данными экспериментов, выполненных на АЭС Пакш и АЭС Дукованы. Результаты расчета хорошо сходятся с экспериментальными данными проекта COBRA и измерениями на АЭС Пакш, при этом наблюдается систематическое расхождение с результатами эксперимента на АЭС Дукованы, составляющее ~ 13%.

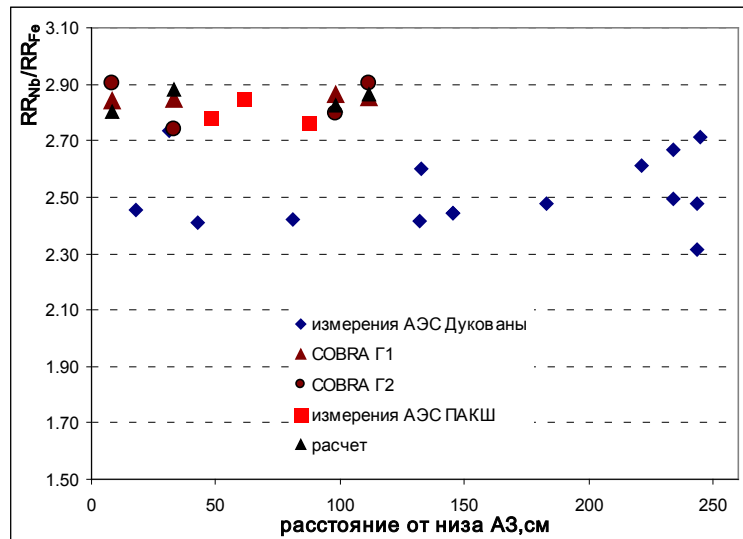


Рисунок 2. Сравнение величин  $RR_{Nb}/RR_{Fe}$ , полученных в рамках проекта SOBRA, экспериментах выполненных на АЭС Пакш и АЭС Дукованы с результатами расчета в приближении «дискретных» контейнеров.

**В разделе 4.2** приводится описание эксперимента и сравнение полученных результатов с расчетами в каналах ОС реактора с кассетами-экранами.

Для оценки условий облучения в каналах ОС ВВЭР-440, эксплуатирующихся с кассетами экранами на периферии активной зоны, и валидации расчетных моделей в настоящей работе рассматриваются результаты нейтронно-дозиметрических исследований экспериментальной гирлянды с образцами облучавшейся в реакторе 1-го блока Ровенской АЭС (с кассетами-экранами) в течение одного топливного цикла в рамках международного проекта PRIMAVERA. В состав гирлянды входило 6 контейнеров с образцами. В трех контейнерах гирлянды были установлены наборы НАД, содержащие детекторы Fe, Nb.

В рамках экспериментальных исследований были выполнены измерения удельной активности  $^{54}Mn$  в области надреза каждого образца и результаты измерения активности НАД.

Нейтронные расчеты выполнялись двумя различными способами – в приближении «непрерывного» контейнера и с «дискретными» контейнерами. Распределение расчетных и экспериментальных скоростей реакции  $^{54}Fe(n,p)^{54}Mn$  в образцах по высоте гирлянды показаны на рисунке 3. Диапазон C/E при расчете с «непрерывным» контейнером составляет (1,00-1,08), а при расчете с «дискретным» контейнером – (0,98-1,06). Средние по всем контейнерам гирлянды значения C/E составляют 1,04 и 1,02 соответственно. Таким образом, как расчет с «непрерывным» контейнером, так и расчет в приближении «дискретных» контейнеров, хорошо согласуются с экспериментальными данными по активности  $^{54}Mn$ , и расхождение расчета с экспериментом в обоих случаях не превышает 10%.

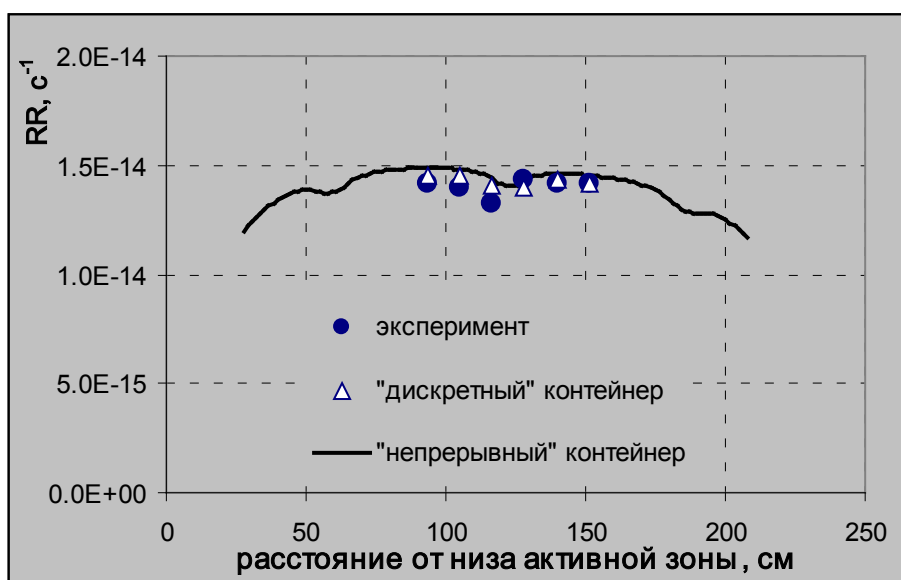


Рисунок 3. Распределение усредненных по контейнеру расчетных и экспериментальных скоростей реакции  $^{54}\text{Fe}(n,p)$  по высоте гирлянды.

В таблице 2 приведены расчетные и экспериментальные отношения скоростей реакций  $^{93}\text{Nb}(n,n')^{93m}\text{Nb}$  и  $^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$ . Отношение скоростей реакций, полученных в расчете с «непрерывным» контейнером, на ~6% выше аналогичной величины, полученной в расчете с «дискретными» контейнерами, что соответствует результатам, полученным при анализе эксперимента СОВРА. При этом экспериментальные данные находятся между двумя расчетами и отклонение обоих расчетов от эксперимента примерно одинаково. Однако расчеты с «дискретным» контейнером дают более консервативный результат с точки зрения исследования ОС, что делает их применение в дозиметрии ОС ВВЭР-440 более целесообразным.

Таблица 2 Расчетные и экспериментальные отношения скоростей реакций  $^{93}\text{Nb}(n,n')^{93m}\text{Nb}$  и  $^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$ .

| контейнер | Эксперимент                        | *C <sub>1</sub>                    |                   | **C <sub>2</sub>                   |                   | C1/C2 |
|-----------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------|------------------------------------|-------------------|-------|
|           | RR <sub>Nb</sub> /RR <sub>Fe</sub> | RR <sub>Nb</sub> /RR <sub>Fe</sub> | C <sub>1</sub> /E | RR <sub>Nb</sub> /RR <sub>Fe</sub> | C <sub>2</sub> /E |       |
| 1         | 3,08                               | 3,28                               | 1,06              | 3,08                               | 1,00              | 1,06  |
| 2         | 3,24                               | 3,30                               | 1,02              | 3,12                               | 0,96              | 1,06  |
| 3         |                                    | 3,41                               |                   | 3,22                               |                   | 1,06  |
| 4         |                                    | 3,40                               |                   | 3,21                               |                   | 1,06  |
| 5         |                                    | 3,30                               |                   | 3,11                               |                   | 1,06  |
| 6         | 3,23                               | 3,28                               | 1,02              | 3,08                               | 0,95              | 1,06  |
| среднее   |                                    |                                    | 1,03              |                                    | 0,97              | 1,06  |

\*C<sub>1</sub> – расчет с «непрерывным» контейнером.

\*\*C<sub>2</sub> – расчет с «дискретными» контейнерами.

В главе 5 проводится сравнительный анализ условий облучения образцов-свидетелей в каналах ВВЭР-440 с полной активной зоной и кассетами-экранами на примере исследования штатных комплектов ОС после длительного облучения.

В рамках экспериментальной части исследований, описанной в разделе 5.1, проведено измерение удельной активности  $^{54}\text{Mn}$  в области надреза каждого образца. Анализ полученных распределений показал, что установка кассет-экранов практически не влияет на форму аксиального распределения поля быстрых нейтронов в каналах образцов-свидетелей.

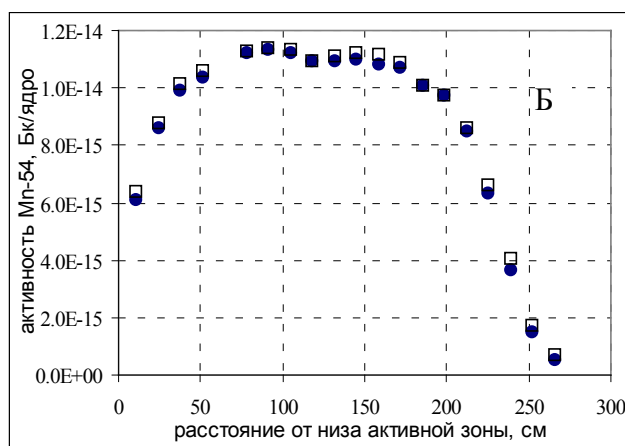
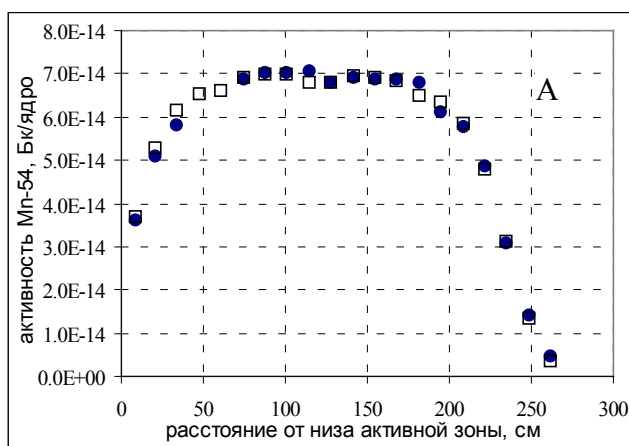
Расчет нейтронных полей выполнялся в приближении «дискретных» контейнеров. В разделе 5.2 проводится сравнение полученных в результате расчета активностей  $^{54}\text{Mn}$  в материале образцов с экспериментом. Полученные результаты приведены на рисунке 4.

Для образцов-свидетелей, облучавшихся в реакторе с кассетами-экранами, среднее значение отношения расчета к эксперименту составляет 1,05. При этом для контейнеров №№3-20, расположенных в пределах активной зоны реактора, величина С/Е не превышает значения 1,10, а для 1-го и 2-го контейнеров, облучавшихся выше границы активной зоны, различие между расчетом и экспериментом увеличивается и достигает 1,36 и 1,14 соответственно.

Для образцов свидетелей, облучавшихся в реакторе с полной активной зоной, среднее значение отношения расчета к эксперименту составляет 0,99. Для контейнеров №№2-20 величина С/Е находится в диапазоне 0,94-1,06, а для самого верхнего контейнера гирлянды отношение расчета к эксперименту составляет 0,74.

В целом необходимо отметить весьма удовлетворительное соответствие расчета экспериментальным результатам, однако в обоих случаях для верхних контейнеров, облучающихся выше границы активной зоны, расхождение расчета и эксперимента достаточно велико.

Полученный эффект может объясняться тем, что метод «синтеза», используемый в расчете, дает недостаточно корректные результаты для образцов, облучающихся за границами активной зоны реактора (в т.ч. из-за невозможности корректно описать геометрию и материалы над активной зоной), а также погрешностями расчета источника в верхних частях периферийных топливных кассет.



● - эксперимент

□ - расчет

Рисунок 4. Сравнение расчетных и экспериментальных активностей  $^{54}\text{Mn}$  в образцах свидетелях облучавшихся в реакторе с кассетами-экранами (слева) и в реакторе с полной активной зоной (справа).

**Раздел 5.3** посвящен определению флюенсов быстрых нейтронов, воздействовавших на ОС при облучении. Флюенс нейтронов определялся двумя способами – по предложенной в настоящей работе методике («новый» метод) и по применявшемуся ранее при исследовании ОС «старому» методу. Отношения флюенсов быстрых нейтронов, определенных по «новому» и «старому» методам -  $\varphi_{>0.5}^{new} / \varphi_{>0.5}^{old}$  приведены в таблице 3. Диапазоны  $\varphi_{>0.5}^{new} / \varphi_{>0.5}^{old}$  составляют (0,98-1,36) для образцов, облучавшихся в реакторе с полной активной зоной, и (0,84-1,27) для образцов, облучавшихся в реакторе с КЭ, при средних значениях  $\varphi_{>0.5}^{new} / \varphi_{>0.5}^{old}$  равных 1,21 и 1,13 соответственно.

Важно отметить систематическую зависимость величины  $\varphi_{>0.5}^{new} / \varphi_{>0.5}^{old}$  от положения контейнера в гирлянде, которая наблюдается для обоих комплектов ОС. Так, в верхнем контейнере гирлянды величина  $\varphi_{>0.5}^{new}$  несколько ниже соответствующего значения определенного по «старой» процедуре, но с приближением к активной зоне величина  $\varphi_{>0.5}^{new} / \varphi_{>0.5}^{old}$  растет, достигая максимума в контейнерах, расположенных напротив центра активной зоны, при этом для нижних контейнеров гирлянды значение  $\varphi_{>0.5}^{new} / \varphi_{>0.5}^{old}$  опять уменьшается. При анализе полученных расхождений следует учесть, что в течение ряда кампаний, предшествующих выгрузке ОС в обоих реакторах, была реализована схема загрузки активной зоны с малой утечкой и на периферии активных зон были установлены ТВС с большой глубиной выгорания. Характер аксиального распределения источника нейтронов в сильно выгоревших и свежих периферийных ТВС различаются, при этом именно периферийные ТВС, установленные напротив каналов с ОС, вносят основной вклад в формирование нейтронного поля в контейнерах с образцами. При определении флюенса по «старой» методике по реакции  $^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$  «запоминаются» лишь последние несколько кампаний и получаемое распределение флюенса по гирлянде определяется выгоревшими периферийными ТВС, в то время как в «новой» процедуре применение

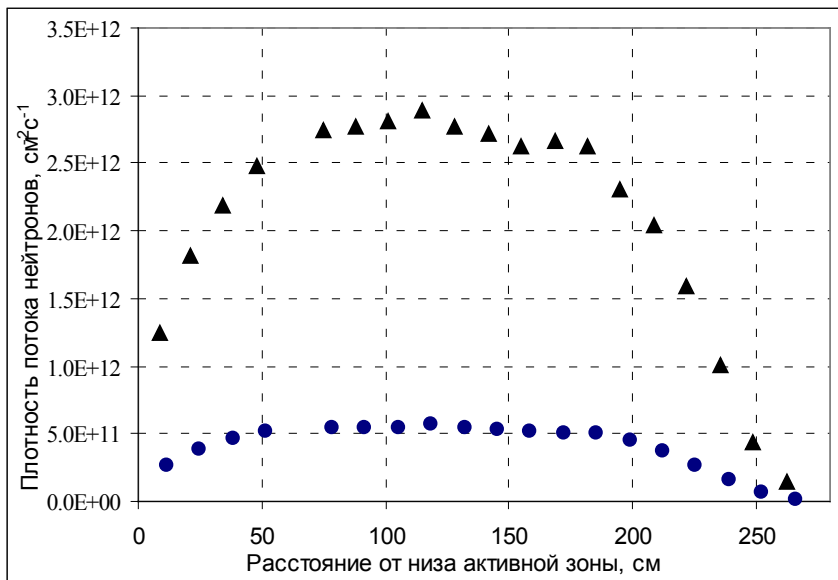


расчета позволяет учесть вклад в накопление флюенса всех кампаний, включая кампании со свежими ТВС на периферии.

Таблица 3. Отношение флюенсов быстрых нейтронов, определенных по «новой» и «старой» процедурам.

| № контейнера | $\varphi_{>0.5}^{new} / \varphi_{>0.5}^{old}$ |                      |
|--------------|---|----------------------|
|              | КЭ  | Полная активная зона |
| 1            | 0,84  | 0,98                 |
| 2            | 1,04  | 1,00                 |
| 3            | 1,02  | 1,03                 |
| 4            | 1,03  | 1,07                 |
| 5            | 1,06  | 1,13                 |
| 6            | 1,12  | 1,21                 |
| 7            | 1,22  | 1,28                 |
| 8            | 1,16  | 1,26                 |
| 9            | 1,15  | 1,26                 |
| 10           | 1,16  | 1,29                 |
| 11           | 1,22  | 1,35                 |
| 12           | 1,27  | 1,36                 |
| 13           | 1,19  | 1,31                 |
| 14           | 1,18  | 1,30                 |
| 15           | 1,19  | 1,32                 |
| 17           | 1,22  | 1,31                 |
| 18           | 1,15  | 1,25                 |
| 19           | 1,11  | 1,20                 |
| 20           | 1,06  | 1,13                 |

В разделе 5.4 выполнено сравнение условий облучения образцов-свидетелей в каналах реакторов с полной активной зоной и КЭ. На рисунке 5 приведены рассчитанные по «новой» методике усредненные за все время облучения плотности потока нейтронов с  $E > 0.5$  МэВ в гирляндах ОС, облучавшимися в реакторах с полной активной зоной и КЭ. Средняя плотность потока нейтронов, воздействовавших на ОС в реакторе с полной активной зоной, превышает аналогичное значение для образцов, облучавшихся в реакторе с КЭ в ~5 раз.



● - плотность потока нейтронов на ОС в реакторе с кассетами-экранами.  
 ▲ - плотность потока нейтронов на ОС в реакторе с полной активной зоной.  
 Рисунок 5. Усредненные за время облучения расчетно-экспериментальные плотности потока нейтронов с  $E > 0,5$  МэВ в гирляндах с образцами, облучавшимися в реакторах с полной активной зоной и кассетами-экранами.

Анализ показывает, что влияние КЭ на условия облучения ОС заключается не только в снижении плотности потока нейтронов, воздействующих на образцы, но и в существенном изменении нейтронного спектра. На рисунке 6 приведено сравнение распределения расчетных спектральных индексов  $SI_{0,5/3,0}$  по высоте каналов ОС реакторов с полной активной зоной и КЭ.

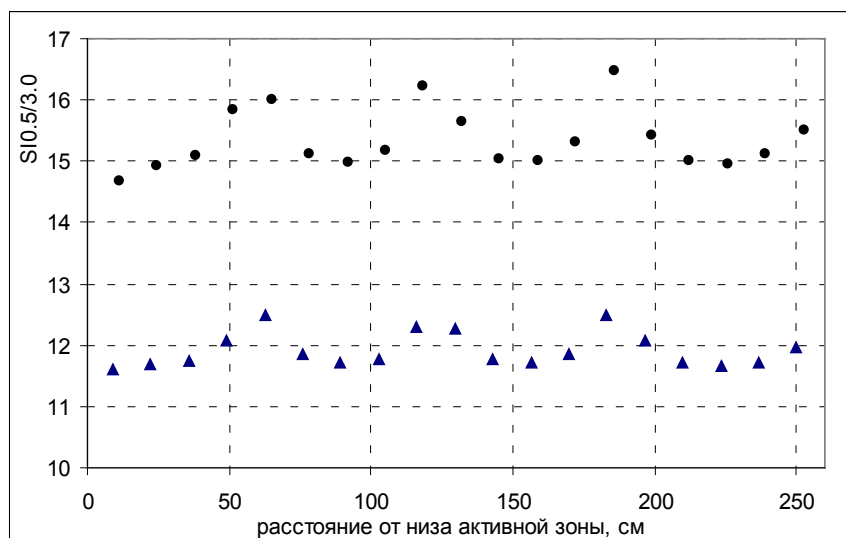


Рисунок 6. Распределение величины спектрального индекса  $SI_{0,5/3,0}$  в каналах ОС корпусов реакторов с полной активной зоной и кассетами-экранами. ● -  $SI_{0,5/3,0}$  в контейнерах с ОС в реакторе с кассетами-экранами.  
 ▲ -  $SI_{0,5/3,0}$  в контейнерах с ОС в реакторе с полной активной зоной.

Средние значения величины  $SI_{0.5/3.0}$  в каналах ОС реакторов с полной зоной и КЭ различаются в  $\sim 1,3$  раза и составляют 11,9 и 15,4 соответственно.

Характерная форма распределения  $SI_{0.5/3.0}$  на приведенных распределениях обусловлена влиянием граненых поясов, фиксирующих выгородку реактора.

Таким образом, можно отметить существенное влияние граненых поясов на характеристики поля нейтронов в каналах ОС и важность их учета при определении флюенса быстрых нейтронов на ОС.

**Раздел 5.5** посвящен сравнению условий облучения образцов-свидетелей и корпуса реактора. При оценке представительности условий облучения ОС и переносе результатов их исследования на корпус реактора (КР) важным фактором является соотношение скорости облучения ОС и внутренней поверхности КР.

Для оценки условий облучения КР в работе были проведены расчеты групповых плотностей потоков и флюенсов быстрых нейтронов на внутренней поверхности КР с полной активной зоной и КЭ за период, соответствующий облучению в них ОС. Расчеты нейтронных полей выполнялось согласно процедуре, описанной в главе 3.

В качестве количественной характеристики опережения облучения ОС по отношению к КР используется коэффициент опережения (КО) – величина, равная отношению усредненной расчетно-экспериментальной величины плотности потока (или флюенса) нейтронов с  $E > 0,5$  МэВ, воздействовавших на образцы-свидетели за все время их облучения, к соответствующему максимальному значению в интересующей зоне внутренней поверхности корпуса реактора за период облучения ОС:

$$КО = \frac{\varphi_{>0.5}^{OC}(p/\varepsilon)}{\varphi_{>0.5}^{KP}} \quad (7)$$

Получаемые таким образом значения КО являются более представительным по сравнению с КО, определенными для конкретного топливного цикла, поскольку усредняют влияние различных топливных загрузок активной зоны и режима работы реактора за весь период облучения.

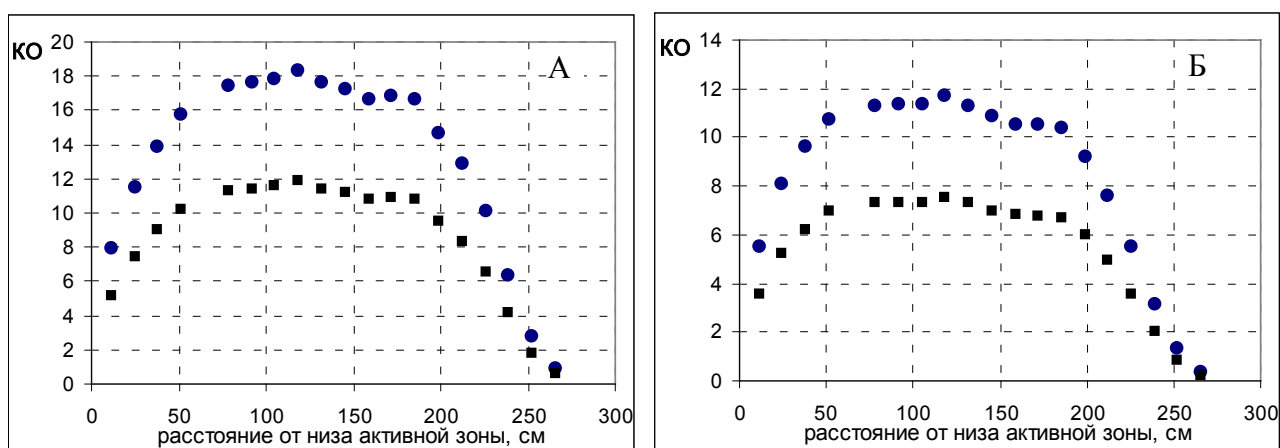
На основании определенных расчетно-экспериментальным методом значений средней за время облучения плотности потока быстрых нейтронов, воздействовавших на ОС, и расчетных значений флюенса нейтронов на внутренней поверхности корпусов реакторов с полной активной зоной и с КЭ были получены зависимости КО от положения контейнера с ОС в канале. Соответствующие распределения приведены на рисунке 7.

Анализ полученных результатов показывает следующее. Минимальные значения коэффициента опережения облучения ОС достигаются в верхних контейнерах гирлянд, при этом большей части контейнеров, расположенных напротив активной зоны реактора, соответствует максимально значение КО.

В реакторе, эксплуатирующемся с КЭ, образцы, установленные напротив активной зоны, облучаются в условиях, при которых плотность потока быстрых нейтронов примерно в 6,8 раз превосходит плотность потока на корпусе реактора на уровне центра активной зоны и примерно в 10,5 раз

на уровне сварного шва №4. Полный диапазон изменения величины КО по гирлянде с ОС составляет от 0,34 до 10,8 для металла сварного шва №4 и от 0,22 до 7,0 для области на уровне центра активной зоны (основной металл).

В реакторе с полной конфигурацией активной зоны образцы, расположенные в области “плато” высотного распределения нейтронного потока, облучаются в условиях, при которых плотность потока в  $\sim 11,5$  раз превышает плотность потока на основном металле (напротив активной зоны) и в  $\sim 18$  раз на уровне сварного шва №4. Полный диапазон изменения величины КО для основного металла и сварного шва №4 составляет (0,59-11,88) и (0,91-18,34) соответственно.



● - КО для сварного шва №4

■ – КО для основного металла.

Рисунок 7. Распределение коэффициента опережения по контейнерам гирлянд ОС для корпуса реактора с кассетами-экранами (А) и с полной активной зоной (Б)

Как уже было сказано, полученные расчетно-экспериментальные КО являются усредненными за длительный период облучения (длительность облучения ОС превышает 20 кампаний как в случае реактора с полной активной зоной, так и в случае реактора с кассетами-экранами). Проведенный анализ полученных в данной работе расчетных распределений плотностей потока нейтронов в каналах ОС и на внутренней поверхности КР с полной активной зоной показал, что величина коэффициента опережения облучения ОС, расположенных напротив центра активной зоны, слабо зависит от конфигурации загрузки активной зоны реактора и изменяется в пределах 5-8% для разных кампаний.

В реакторе с кассетами-экранами зависимость величины коэффициента опережения облучения ОС, расположенных напротив центра активной зоны, от характера топливной загрузки существенно выше - для разных кампаний различия достигают 35%.

Коэффициент опережения облучения верхних контейнеров с образцами-свидетелями в реакторах с полной активной зоной зависит от параметров загрузки значительно сильнее. Величина КО для верхнего

контейнера (№ 1 и № 20) по отношению к основному металлу в кампаниях со свежими топливными кассетами на периферии составляет  $\sim 0,28$ . В кампаниях с сильно выгоревшими периферийными ТВС, установленными напротив канала с ОС, величина КО увеличивается в 1,5 раза и достигает значений  $\sim 0,4$ . Аналогичная картина наблюдается и для ОС, облучающихся в реакторе с кассетами-экранами.

В **шестой главе** показано применение разработанной методики определения флюенса быстрых нейтронов на ОС при исследовании радиационного охрупчивания материалов КР ВВЭР-440.

Разработанная в диссертации методика была применена для повышения представительности базы данных по радиационному охрупчиванию материалов корпусов реакторов ВВЭР-440.

В рамках международного проекта TAREG с помощью данной методики проведена расчетно-экспериментальная переоценка флюенсов быстрых нейтронов для всех испытанных ОС КР ВВЭР-440, эксплуатирующихся в России и на Украине. На базе переоценки флюенсов быстрых нейтронов для всех материалов были переоценены результаты испытаний образцов на ударный изгиб, построены новые сериальные кривые и определены новые значения критической температуры хрупкости.

На основе полученных в диссертации расчетно-экспериментальных распределений величин КО по гирляндам с ОС из некоторых комплектов ОС были отобраны и испытаны образцы, облучавшиеся с плотностью потока быстрых нейтронов, близкой к плотности потока на внутренней поверхности корпуса реактора. Полученные результаты позволили подтвердить представительность базы данных НИЦ «Курчатовский институт».

На основе анализа уточненной базы данных по радиационному охрупчиванию материалов КР ВВЭР-440 и результатов микроструктурных исследований были разработаны зависимости для определения радиационного охрупчивания основного металла, материала сварных швов с содержанием меди меньше или равным 0,08 % и с содержанием меди больше 0,1%.

На основе разработанной методики и проведенных в диссертационной работе расчетов и экспериментальных исследований в рамках работ по продлению срока службы КР 1-го и 2-го энергоблоков Ровенской АЭС был выполнен анализ представительности условий облучения ОС этих реакторов и определены флюенсы нейтронов, воздействовавших на штатные комплекты ОС последних выгрузок.

С использованием полученных данных были разработаны зависимости для прогноза хрупкой прочности корпуса реактора 1-го и 2-го блока Ровенской АЭС и оценки их остаточного ресурса. Полученные зависимости использовались для обоснования срока службы КР 1-го и 2-го блоков Ровенской АЭС на проектный срок и с учетом их продления на 20 лет.

С использованием проведенных в диссертации исследований условий облучения в каналах ОС реакторов с КЭ была разработана программа ОС для

реактора 1-го блока Ровенской АЭС при его эксплуатации после восстановительного отжига.

Разработанная методика определения флюенса нейтронов на ОС была применена в рамках работ по обоснованию продления срока службы КР 1-го поколения до 45 лет при исследовании образцов металла темплетов, вырезанных из КР 1,2 блоков Кольской АЭС и 3,4 блоков Нововоронежской АЭС и затем дооблученных в каналах ОС реакторов ВВЭР-440/213.

Дооблучение образцов проводилось как в реакторах с полной активной зоной, так и в реакторе с кассетами-экранами. С использованием полученных результатов были разработаны прогнозные зависимости радиационного охрупчивания металла указанных корпусов реакторов, разработан руководящий документ «Методика определения радиационного охрупчивания материалов корпусов ВВЭР-440 при повторном после отжига облучении» и выполнено расчетно-аналитическое обоснование при их сверхпроектной эксплуатации.

Результаты нейтронно-дозиметрических исследований были использованы для обоснования отказа от дальнейшей вырезки темплетов из КР реакторов 1,2 блоков Кольской АЭС и 3,4 блоков Нововоронежской АЭС при их эксплуатации в период продления срока службы до 45 лет.

## **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ.**

По результатам полученным в диссертации можно сделать следующие выводы:

Разработана расчетно-экспериментальная методика определения флюенса быстрых нейтронов на ОС КР ВВЭР-440, позволяющая учесть сложную историю облучения образцов при их длительном облучении.

– На базе программного комплекса (DOT3.5+ANISN+BUGLE96), в приближении метода синтеза двумерных и одномерного расчетов разработаны уточненные расчетные модели для расчетов переноса нейтронов в канале ОС реакторов ВВЭР-440 с полной активной зоной и КЭ;

- Проведены исследования экспериментальных гирлянд и двух штатных комплектов ОС, облучавшихся в реакторах ВВЭР-440 с полной активной зоной и КЭ.

- Выполнен сравнительный анализ различных подходов к моделированию геометрии гирлянды с образцами при проведении нейтронных расчетов;

- Выполнена валидация расчетной модели на экспериментальных данных, полученных в каналах ВВЭР-440 с полной АЗ и КЭ, продемонстрировано хорошее соответствие расчетных и экспериментальных результатов, что подтверждает адекватность разработанных расчетных моделей и их пригодность для применения при определении флюенса быстрых нейтронов на ОС ВВЭР-440, расположенных по высоте в пределах границ активной зоны реактора.

- Выполнено определение флюенса быстрых нейтронов на ОС, длительное время облучавшихся в каналах реакторов с полной активной

зоной и КЭ. Показано значительное изменение величин флюенсов быстрых нейтронов на исследованных ОС по сравнению с результатами, полученными с помощью ранее использованной нейтронно-дозиметрической процедуры.

- На примере штатных комплектов ОС проведено сравнение условий облучения образцов в реакторах с полной активной зоной и КЭ.

- Проведен сравнительный анализ условий нейтронного облучения ОС и внутренней поверхности КР. Получены распределения величины КО по высоте гирлянд с ОС в реакторах с полной активной зоной и КЭ.

Применение расчетно-экспериментальной методики определения флюенса быстрых нейтронов на ОС КР ВВЭР-440 позволило повысить представительность базы данных по радиационному охрупчиванию материалов корпусов реакторов ВВЭР-440, разработать новые нормативные зависимости радиационного охрупчивания КР ВВЭР-440. Результаты работ с применением разработанной методики были использованы при обосновании срока службы КР 1-го и 2-го блоков Ровенской АЭС на проектный срок и с учетом их продления на 20 лет и при обосновании безопасной эксплуатации КР ВВЭР-440 1-го поколения в период продления срока службы до 45 лет.

#### **Основные публикации по теме диссертации.**

Основное содержание диссертационной работы и ее результатов полностью отражено в 7 научных работах автора:

1. S.M. Zaritsky, V.I. Vikhrov, V.N. Kochkin, D.Yu. Erak, E.B. Brodtkin, and A.L.Egorov, «Measurement and Calculation of WWER-440 Pressure Vessel Templates Activity for Support of Vessel Dosimetry», *Journal of ASTM International*. Vol. 3, No. 10, 2006, Paper ID JAI 100365. See also *Reactor Dosimetry, 12th International Symposium*, STP 1490, Editors David W. Vehar, David M. Gilliam, and James M. Adams, 2008, 398.

2. V. Kochkin, D. Erak, V. Vikhrov, D. Makhotin, S. Zaritsky, P. Panferov and A. Egorov, “Specification of Irradiation Conditions in VVER-440 Surveillance Positions”, *Reactor Dosimetry State of the Art 2008. Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Symposium on Reactor Dosimetry*. Akersloot, The Netherlands, 25-30 May, 2008. Eds. Wim Voorbraak, Luigi Debarberis, Pierre D’hondt, Jan Wagemans. World Scientific, 2009, pp. 204-212.

3. V. Kochkin, D. Erak, D. Makhotin, S. Zaritsky, and A. Egorov, “Upgraded neutron Dosimetry Procedure for VVER-440 Surveillance Specimens”, *Reactor Dosimetry State of the Art, 2008. Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Symposium on Reactor Dosimetry*. Akersloot, The Netherlands, 25-30 May, 2008. Eds. Wim Voorbraak, Luigi Debarberis, Pierre D’hondt, Jan Wagemans. World Scientific, 2009, pp. 291-299.

4. J. Wagemans, L. Borms, M. Willekens, J. Oeyen, A. Moens, V. Kochkin, “Reactor Dosimetry with Niobium”, *Journal of ASTM International*. Vol. 3, No. 2, Paper ID JAI 13439 (2006). See also *Reactor Dosimetry, 12th International Symposium*, STP 1490, Editors David W. Vehar, David M. Gilliam, and James M. Adams, 2008, p. 482.

5. D.Yu.Erak, Yu.R.Kevorkian, S.M.Zaritsky, A.A.Chernobaeva, Ya.I.Shtrombakh, V.N.Kochkin, "Radiation Embrittlement and Neutron Dosimetry Aspects in WWER-440 Reactor Pressure Vessels Life Time Extension" IAEA-CN-155-059, IAEA Second International Symposium on Nuclear Power Plant Life Management, Shanghai, China, Book of extended synopses, CN-155, 15-18 October, 2007, p.127.
6. В.Н.Кочкин, Д.Ю.Махотин, Д.Ю.Ерак, «Сравнительный анализ параметров нейтронного поля на образцах-свидетелях и корпусах реакторов ВВЭР-440», Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. Выпуск 1, с. 63-73, 2011г.
7. В.А. Насонов, Н.И. Алексеев, Д.Ю. Ерак, Е.А. Гомин, В.Н. Кочкин, В.И. Вихров, Д.Ю. Махотин, А.В. Талиев, Д.А. Шкаровский, М.С. Юдкевич «Разработка расчетно-экспериментальных методик определения параметров полей нейтронов в реакторе ИР-8 РНЦ КИ для фундаментальных и прикладных исследований», Препринт ИАЭ-6579/4, РНЦ «Курчатовский институт», Москва, 2009.