

СРАВНЕНИЕ УСЛОВИЙ ОБЛУЧЕНИЯ ОБРАЗЦОВ МЕТАЛЛА КОРПУСА ВВЭР-1000 В КАНАЛАХ ВЫГОРОДКИ, ОБРАЗЦОВ-СВИДЕТЕЛЕЙ И ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ КОРПУСА РЕАКТОРА

А. В. Гриценко, В. Н. Буканов

Расчетным путем определены характеристики поля быстрых нейтронов, воздействующих на образцы материалов корпуса ВВЭР-1000 в каналах выгородки реактора. Сравниваются условия облучения образцов, образцов-свидетелей и внутренней поверхности верхней обечайки корпуса реактора. Показано, что характеристики поля нейтронов, воздействующих на образцы в каналах выгородки реактора, существенно отличаются от тех, при которых облучается внутренняя поверхность корпуса. Полученные данные необходимо учитывать при планировании экспериментов по облучению образцов материалов корпуса ВВЭР-1000 в каналах выгородки реактора.

Введение

Срок безопасной работы АЭС с реакторами ВВЭР-1000 главным образом зависит от состояния корпуса реактора (КР). Основным источником информации об изменении свойств материалов корпуса ВВЭР-1000 в процессе его эксплуатации является программа образцов-свидетелей (ОС). К сожалению, штатная программа ОС [1], реализуемая в настоящее время на АЭС Украины, обладает рядом существенных недостатков. Прежде всего к ним относятся неудачная схема расположения ОС в реакторе, наличие отклонений от документации, регламентирующей порядок установки контейнеров с образцами в контейнерных сборках, недостатки дозиметрического обеспечения программы ОС [2]. Все это не позволяет получить на основе результатов исследований облученных образцов представительный набор данных, необходимый для достоверного определения текущего состояния металла КР и оценки радиационного ресурса его безаварийной работы.

Программа ОС по срокам реализации является весьма продолжительным мероприятием. Так, например, третья выгрузка образцов из реактора должна осуществляться после 17 лет эксплуатации энергоблока. Учитывая, что результаты исследований уже извлеченных из реакторов комплектов ОС достаточно противоречивы, в настоящее время предпринимаются попытки получить дополнительную информацию о воздействии реакторного излучения на материалы КР. К ним можно отнести и исследования образцов материалов корпуса ВВЭР-1000, облученных в каналах выгородки реактора. Для правильного понимания результатов исследований представляется целесообразным определить характеристики поля быстрых нейтронов, воздействующих на образцы в каналах выгородки, и сравнить их с теми, при которых облучаются ОС в реакторе и внутренняя поверхность корпуса.

Расчетное определение условий облучения образцов в каналах выгородки

Анализ конструкторской документации внутрикорпусных устройств реактора ВВЭР-1000 показывает, что не во всех каналах выгородки может быть выполнено облучение образцов материалов корпуса. В верхних частях некоторых каналов установлены контейнерные сборки с ОС. Даже после выгрузки комплектов контейнерных сборок из реактора освободившиеся каналы не пригодны для размещения в них образцов. Если рассматривать 60-градусный сектор симметрии ВВЭР-1000, то фактически только в двух каналах могут быть установлены гирлянды из образцов по всей высоте выгородки. Именно в этих каналах производилось расчетное определение плотностей потоков нейтронов, спектров, флюенсов, величин смещений на атом для нейтронов с $E_n > 0,5$ МэВ, воздействующих на образцы.

Поставленная задача решалась с помощью пакета программ MCSS [3]. Поскольку пакет предназначен для расчетов характеристик поля нейтронов в местах расположения ОС в реакторе ВВЭР-1000, то перед определением условий облучения образцов в каналах выгородки в некоторые программы пакета были внесены изменения, вытекающие из характера решаемой задачи. Прежде всего расчетная область, в которой осуществляется моделирование физического процесса распространения частиц, была дополнена элементами, имитирующими расположенные в двух каналах выгородки гирлянды образцов. Геометрически гирлянды представлялись в виде призм высотой, равной высоте выгородки реактора. В каждом канале располагалось двенадцать призм, основаниями которых служили квадраты с размерами сторон, равными 1 см. Регистрация нейтронов при расчетах производилась в объемных детекторах, условно разделяющих каждую призму на равные участки. Высота каждого участка составляла приблизительно 2,6 см.

Основные элементы части расчетной области, включающей каналы выгородки реактора ВВЭР-1000 с расположенными в них образцами металла корпуса, схематически изображены на рис. 1.

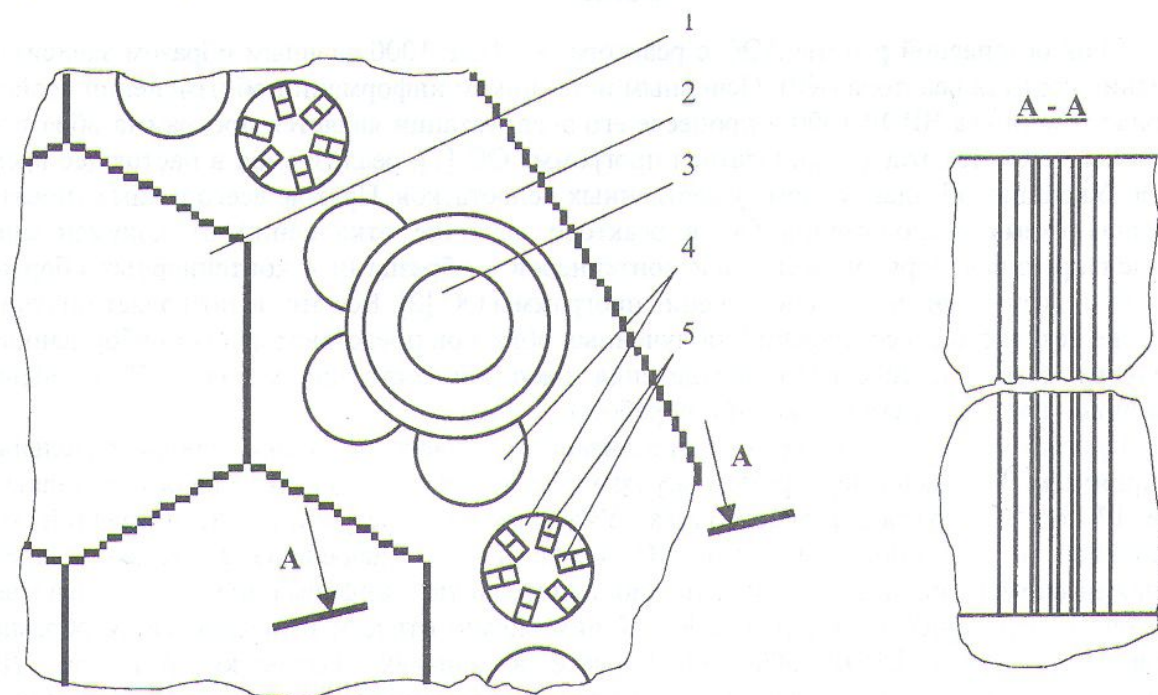


Рис. 1. Часть расчетной области, включающей каналы выгородки с расположенными в них гирляндами образцов: 1 – активная зона; 2 – выгородка; 3 – контейнерная сборка; 4 – каналы в выгородке; 5 – гирлянды образцов.

Учитывая различия в расположении образцов в каналах выгородки и ОС, изменения были внесены и в программу подготовки данных для транспортных расчетов. Так, при расчетном определении условий облучения образцов использовалась информация о распределении источников нейтронов по всей высоте активной зоны реактора.

Как уже упоминалось ранее, пакет программ MCSS предназначен для определения характеристик поля нейтронов в местах расположения ОС в реакторе ВВЭР-1000. Транспортная программа пакета включает целый комплекс неаналоговых методов моделирования траекторий нейтронов, которые подробно описаны в работе [3]. Естественно, что при расчетном определении условий облучения образцов в каналах выгородки часть неаналоговых методов (например, расщепление нейтронов по направлениям или расщепление при входе в контейнерную сборку и рулетка на выходе) не использовалась.

Сравнение условий облучения образцов в каналах выгордки, ОС и корпуса ВВЭР-1000

Сравнение условий облучения образцов в каналах выгордки реактора ВВЭР-1000 и ОС осуществлялось на основе результатов транспортных расчетов, выполненных для 8-й топливной кампании блока № 1 Хмельницкой АЭС. Характеристики поля быстрых нейтронов, воздействующих на ОС типа Шарпи основного металла корпуса ВВЭР-1000 двухъярусной контейнерной сборки 2Л1, определялись с помощью базовой версии пакета программ MCSS. При расчетном определении условий облучения образцов в каналах выгордки использовался описанный ранее модифицированный вариант транспортной программы этого пакета. Условия облучения внутренней поверхности верхней обечайки КР блока № 1 Хмельницкой АЭС в течение 8-й топливной кампании на уровне наиболее энергонапряженного слоя активной зоны реактора были получены с помощью расчетно-экспериментальной методики, описанной в работе [4].

При расчетах величин смещений на атом для нейтронов с $E_n > 0,5$ МэВ использовались данные по сечению смещения для железа в стали, приведенные в Международном дозиметрическом файле IRDF-90 (стандарт ASTM). Для характеристики спектров нейтронов применялись спектральные индексы, т.е. отношения интегральных плотностей потоков нейтронов с $E_n > 0,5$ МэВ к интегральным плотностям потоков нейтронов с $E_n > 3,0$ МэВ.

Интегральные плотности потока ($\varphi_{0,5}$), флюенсы ($\Phi_{0,5}$), спектральные индексы ($\varphi_{0,5}/\varphi_{3,0}$), величины смещений на атом ($D_{0,5}$) для нейтронов с $E_n > 0,5$ МэВ, воздействовавших на основной металл верхней обечайки КР на уровне наиболее напряженного слоя активной зоны и на ОС в контейнерной сборке 2Л1 в течение 8-й топливной кампании блока № 1 Хмельницкой АЭС, приведены в табл. 1 и 2 соответственно.

Таблица 1. Условия облучения внутренней поверхности корпуса реактора

Угловая координата, град.	$\varphi_{0,5}$, 10^{10} см ⁻² ·с ⁻¹	$\Phi_{0,5}$, 10^{17} см ⁻²	$D_{0,5}$, 10^{-4} смещений/атом	$\varphi_{0,5}/\varphi_{3,0}$
1	3,67	7,51	6,35	5,32
3	3,77	7,72	6,51	5,40
5	3,95	8,08	6,85	5,26
7	4,07	8,33	7,06	5,30
9	4,09	8,38	7,10	5,22
11	4,04	8,28	7,00	5,34
13	3,73	7,65	6,46	5,34
15	3,45	7,06	5,99	5,20
17	3,10	6,35	5,37	5,30
19	2,78	5,70	4,81	5,32
21	2,51	5,13	4,33	5,33
23	2,29	4,68	3,94	5,35
25	2,14	4,38	3,67	5,37
27	2,05	4,20	3,51	5,43
29	2,00	4,10	3,44	5,43

Детальный сравнительный анализ условий облучения ОС в реакторе ВВЭР-1000 и внутренней поверхности КР представлен в работе [5]. Здесь же отметим только тот факт, что даже минимальная плотность потока нейтронов с $E_n > 0,5$ МэВ на ОС существенно превышает максимальную на внутреннюю поверхность КР, тогда как спектральные индексы достаточно близки по величине.

Аксиальные распределения интегральной плотности потока нейтронов с $E_n > 0,5$ МэВ, воздействующих на образцы в каналах выгордки реактора, приведены на рис. 2. Нулевой

Таблица 2. Условия облучения образцов-свидетелей контейнерной сборки 2Л1

Индекс контейнера	$10^{10} \Phi_{0,5}, \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$\Phi_{0,5}, 10^{18} \text{см}^{-2}$	$D_{0,5}, 10^{-3}$ смещений/атом	$\phi_{0,5}/\phi_{3,0}$
Нижний ряд				
43ШАНТ	26,90	5,51	4,64	5,50
45ШАНТ	15,50	3,18	2,46	6,99
47ШАНТ	22,50	4,61	3,75	6,12
Верхний ряд				
7ШАНТ	10,60	2,17	1,92	4,81
9ШАНТ	6,15	1,26	1,03	5,97
11ШАНТ	8,53	1,75	1,50	5,30

координатой в аксиальном направлении служит низ активной зоны реактора. Для сравнения на этом рисунке показаны данные, полученные для гирлянд из образцов, которые располагались на минимальном и максимальном расстояниях от центральной оси реакторной установки.

На рис. 2 видно, что большая часть образцов в гирляндах, расположенных в каналах выгородки, облучается при условиях, когда интегральная плотность потока нейтронов

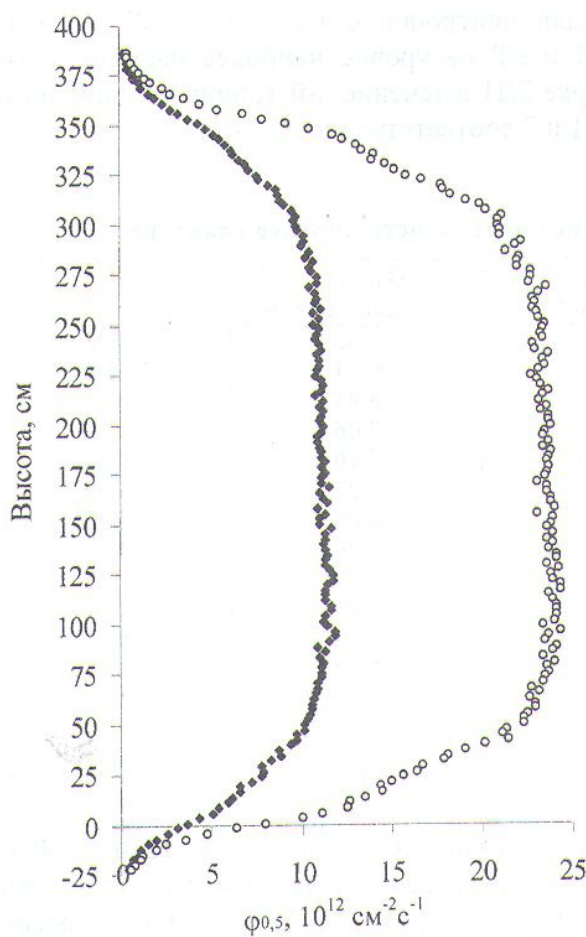


Рис. 2. Аксиальные распределения интегральной плотности потока нейтронов в канале выгородки: ♦ - гирлянда, максимально удаленная от центра реакторной установки; ° - гирлянда, минимально удаленная от центра реакторной установки.

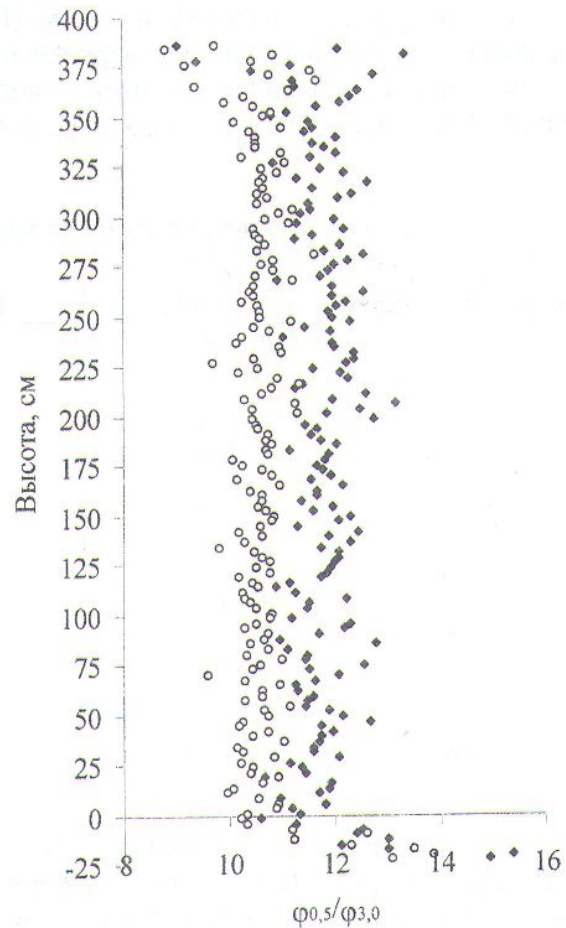


Рис. 3. Аксиальные распределения спектральных индексов, характеризующих поле нейтронов в канале выгородки: ♦ - гирлянда, максимально удаленная от центра реакторной установки; ° - гирлянда, минимально удаленная от центра реакторной установки.

постоянна в аксиальном направлении. Ее величина для гирлянд, удаленных на максимальное расстояние от центральной оси реакторной установки, составляет приблизительно $10,2 \cdot 10^{12}$ $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$, а для гирлянды, находящейся на минимальном расстоянии, – $23 \cdot 10^{12}$ $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$. Сравнение с данными, приведенными в табл. 1, показывает, что даже минимальная из этих величин почти в 250 раз превышает максимальную на внутреннюю поверхность КР. Для ОС это различие меньше и составляет приблизительно 40 раз.

Спектральные индексы, полученные для образцов двух выбранных нами для сравнения гирлянд, представлены на рис. 3. Данные, приведенные на этом рисунке, показывают, что величины пространственных индексов практически не зависят от места расположения образцов в каналах выгородки, однако по абсолютной величине они почти в два раза превышают полученные для ОС и внутренней поверхности КР. Это говорит о том, что спектр нейтронов в каналах выгородки значительно "мягче" спектров нейтронов, воздействующих на ОС и внутреннюю поверхность КР.

Условия облучения образцов в верхней части выгородки реактора, где наблюдаются значительные градиенты плотности потока нейтронов в аксиальном направлении, представлены в табл. 3. Сравнение этих данных с данными, полученными для ОС и внутренней поверхности КР, показывают их существенное различие.

Таблица 3. Условия облучения образцов в каналах выгородки

Высота, см	$\Phi_{0,5},$ $10^{12} \text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$		$\Phi_{0,5},$ 10^{19}см^{-2}		$D_{0,5}, 10^{-1}$ смещений/атом		$\Phi_{0,5}/\Phi_{3,0}$	
	мин	макс	мин	макс	мин	макс	мин	макс
386,5	0,210	0,381	0,430	0,780	0,0310	0,0575	9,03	9,75
381,4	0,422	0,693	0,864	1,419	0,0567	0,1040	13,33	10,87
376,2	0,605	1,050	1,239	2,150	0,0855	0,1520	11,17	9,17
371,1	1,077	1,699	2,205	3,480	0,1450	0,2430	12,73	10,77
365,9	1,574	2,837	3,222	5,808	0,2160	0,4190	11,27	9,37
360,8	2,322	4,409	4,755	9,029	0,3210	0,6210	12,31	10,29
355,7	3,204	6,754	6,561	13,830	0,4420	0,9420	11,66	10,48
350,5	4,342	9,186	8,891	18,811	0,6010	1,3200	10,83	10,68
345,4	5,222	11,717	10,694	23,993	0,7170	1,6600	11,60	10,99
340,2	5,828	12,989	11,934	26,597	0,7940	1,8500	12,02	10,53
335,1	6,224	14,005	12,745	28,679	0,8530	1,9900	11,81	10,52
329,9	6,879	14,666	14,087	30,031	0,9370	2,0700	11,55	10,26
324,8	7,491	15,834	15,340	32,423	1,0100	2,2500	11,75	10,63
319,6	8,150	17,796	16,688	36,441	1,1300	2,5100	11,30	10,67
314,5	8,723	18,302	17,861	37,477	1,2000	2,5900	11,61	10,65
309,4	9,050	19,927	18,531	40,803	1,2500	2,8300	12,09	10,75
304,2	9,710	21,075	19,882	43,156	1,3300	2,9700	11,55	11,23
299,1	9,726	20,939	19,915	42,875	1,3400	2,9700	12,01	10,70
293,9	10,103	20,997	20,688	42,994	1,3700	2,9700	12,17	10,49

Выводы

1. Интегральные плотности потока нейтронов с $E_n > 0,5$ МэВ на образцы в каналах выгородки реактора ВВЭР-1000 существенно превышают те, при которых облучаются ОС и внутренняя поверхность верхней обечайки КР. Это приводит к тому, что при облучении образцов материалов корпуса в каналах выгородки реактора на максимальном расстоянии от центра реакторной установки в зоне равномерного облучения за стандартную топливную кампанию может быть набран флюенс нейтронов почти в четыре раза превышающий предельнодопустимый. Под предельнодопустимым понимается флюенс, при котором сохраняется расчетный ресурс корпуса, его надежность и безопасность [6].

2. Спектр нейтронов на образцы в каналах выгородки реактора ВВЭР-1000 значительно "мягче" спектров нейтронов, воздействующих на ОС и внутреннюю поверхность КР.

Таким образом, при планировании экспериментов по облучению образцов материалов корпуса ВВЭР-1000 в каналах выгородки реактора необходимо учитывать существенное отличие характеристик поля нейтронов, воздействующих на образцы, от тех, при которых облучаются внутренняя поверхность КР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Образцы-свидетели*. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. 1152.75.00.000 ТО. – 60 с.
2. Буканов В.Н., Васильева Е.Г., Вишневский И.Н и др. Проблемы дозиметрии образцов-свидетелей, облученных в реакторе ВВЭР-1000 // Ядерная и радиационная безопасность. – 2000. – № 2. – С. 35 - 42.
3. Гриценко А.В., Буканов В.Н., Васильева Е.Г и др. Расчетное определение некоторых параметров условий облучения образцов-свидетелей корпуса ВВЭР-1000 // Збірник наукових праць Інституту ядерних досліджень. – 2000. – № 2. – С. 65 - 73.
4. Буканов В.Н., Васильева Е.Г., Гриценко А.В. и др. Методика определения радиационной нагрузки корпуса реактора ВВЭР-1000 // Ядерная и радиационная безопасность. – 2000. – № 3. – С. 33 - 42.
5. Буканов В.Н., Васильева Е.Г., Гриценко А.В., Демехин В.Л. Сравнение некоторых параметров условий облучения образцов-свидетелей и корпуса ВВЭР-1000 // Атомная энергия. – 1999. – Т. 87, вып. 4. – С. 317.
6. *Реакторная установка В-320*. Техническое обоснование безопасности реакторной установки 320.00.00.00.000Д61.

ПОРІВНЯННЯ УМОВ ОПРОМІНЕННЯ ЗРАЗКІВ МЕТАЛУ КОРПУСУ ВВЕР-1000 В КАНАЛАХ ВИГОРОДКИ, ЗРАЗКІВ-СВІДКІВ І ВНУТРІШНЬОЇ ПОВЕРХНІ КОРПУСУ РЕАКТОРА

О. В. Гриценко, В. М. Буканов

Розрахунковим шляхом визначено характеристики поля швидких нейтронів, що впливають на зразки матеріалів корпусу ВВЕР-1000 в каналах вигородки реактора. Порівнюються умови опромінення зразків, зразків-свідків і внутрішньої поверхні верхньої обечайки корпусу реактора. Показано, що характеристики поля нейтронів, що впливають на зразки в каналах вигородки реактора, істотно відрізняються від тих, при яких опромінюється внутрішня поверхня корпусу. Отримані дані необхідно враховувати при плануванні експериментів по опроміненню зразків матеріалів корпусу ВВЕР-1000 в каналах вигородки реактора.

COMPARISON OF IRRADIATION CONDITIONS OF WWER-1000 PRESSURE VESSEL METAL SPECIMENS IN BAFFLE CHANNELS, SURVEILLANCE SPECIMENS AND INNER SURFACE OF THE REACTOR PRESSURE VESSEL

O. V. Grytsenko, V. N. Bukanov

Characteristics of the fast neutrons field, which influence to WWER-1000 pressure vessel material specimens in reactor baffle channels are determined by calculational method. Irradiation conditions of specimens, surveillance specimens and inner surface of pressure vessel upper shell are compared. It is shown, that the characteristics of the field of neutrons, which influence on specimens in reactor baffle channels, essentially differ from ones, by which inner surface of pressure vessel is irradiated. It is necessary to take into account the obtained data during the designing of WWER-1000 pressure vessel material specimen irradiation experiments in reactor baffle channels.