

О ПРОСТРАНСТВЕННОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ НЕЙТРОНОВ В КАНАЛАХ ИОНИЗАЦИОННЫХ КАМЕР РЕАКТОРОВ ТИПА ВВЭР

А.М. Березовец, Г.И. Бородкин, Э.Б. Бродкин, А.Н. Еремин,
С.С. Ломакин, А.В. Моряков

Приведены расчетные и экспериментальные результаты исследования распределения потоков нейтронов в каналах ионизационных камер реакторов типа ВВЭР. Обнаружен значительный перепад быстрых и тепловых нейтронов по сечению каналов.

NEUTRON SPACE DISTRIBUTION IN WWER IONIZATION CHAMBER CHANNELS. A.M. BEREZOVETS, G.I. BORODKIN, E.B. BRODKIN, A.N. EREMIN, S.S. LOMAKIN, A.V. MORIAKOV. Calculational and experimental neutron flux distribution in WWER ionization chamber channels are presented. Substantial fast and thermal neutron gradient over channel cross-section is shown to exist.

ВВЕДЕНИЕ

О пространственном распределении нейтронов в каналах ионизационных камер (ИК) реакторов типа ВВЭР действующих АЭС в настоящее время имеется незначительная информация. Знание пространственного распределения нейтронов необходимо для выяснения причин, влияющих на точность контроля мощности реактора, осуществляемого с помощью расположенных в каналах ИК датчиков нейтронного потока.

Для создания образцовых нейтронных источников на основе нейтронного поля каналов ИК реакторов типа ВВЭР требуется тщательное исследование этого поля в полости каналов.

Методика определения характеристик поля нейтронов в околокорпусном пространстве предусматривает сопоставление расчетных и экспериментальных данных [1, 2]. Наиболее полная (относительно доступная) экспериментальная информация о нейтронном поле может быть получена в каналах ИК, поэтому в данной области можно провести сравнение расчетных и экспериментальных зависимостей.

Следует отметить, что неопределенность пространственного расположения детекторов нейтронного потока может приводить к значительному разбросу экспериментальных значений в каналах ИК [3, 4]. Поэтому при измерениях потоков нейтронов в каналах ИК необходимо проводить оценку влияния пространственной неопределенности на показания детектора нейтронов.

В данной работе представлены некоторые экспериментальные и расчетные результаты, позволяющие оценить пространственную зависимость нейтронного потока в каналах ИК серийных реакторов типа ВВЭР-1000, ВВЭР-440 и реактора типа ВВЭР-440, окруженного водяной биологической защитой.

КОНСТРУКЦИЯ И РАСПОЛОЖЕНИЕ КАНАЛОВ ИК

В исследуемых модификациях указанных реакторов типа ВВЭР каналы ИК представляют собой полые изогнутые трубы длиной около 9 м. Рабочая часть каналов,

т.е. та, где во время работы реактора находятся ионизационные камеры, расположена вертикально вблизи внутренней поверхности биологической защиты. Каналы ИК серийных ВВЭР-1000 и ВВЭР-440, имеющие внутренние диаметры 147 и 110 мм соответственно, окружены серпентинитовым бетоном. Каналы ИК ВВЭР-440 с водяной защитой, имеющие внутренний диаметр 104 мм, окружены водой. На рисунке показано поперечное сечение на

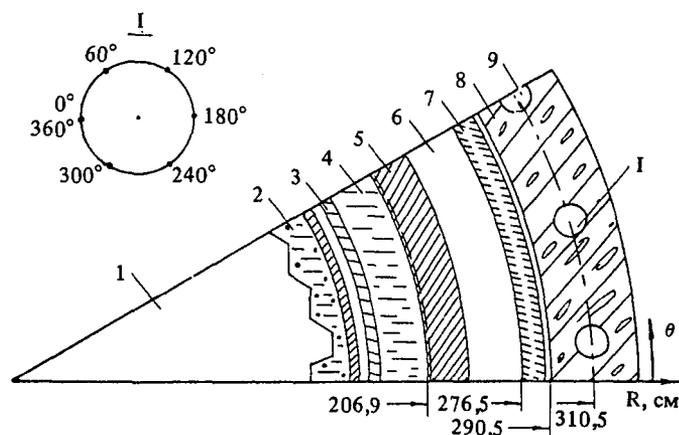


Схема серийного реактора типа ВВЭР-1000 (половина сектора периодичности, аппроксимирующая реактор при расчете в (r, θ) -геометрии): 1 — активная зона; 2 — "горячая" вода; 3 — шахта; 4 — "холодная" вода; 5 — корпус с наплавкой; 6 — воздушный зазор; 7 — теплоизоляция; 8 — бетон; 9 — канал ИК

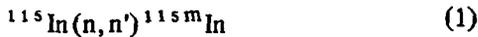
уровне центра активной зоны 30-градусного сектора симметрии серийного реактора типа ВВЭР-1000. Расположение каналов ИК в ВВЭР-440 такое же, за исключением габаритных размеров.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Для исследования поля нейтронов в каналах ИК использован активационный метод [5]. С помощью активационных детекторов измеряли распределение интегральной плотности потока нейтронов (ППН) по поперечному сечению каналов ИК на высоте приблизительно середины активной зоны. Размеры детекторов малы (диа-

метр активационных фольг от 3 до 10 мм) по сравнению с диаметрами каналов, что позволило проводить измерения без заметных искажений нейтронного поля в каналах.

Предполагалось, что спектр нейтронов с энергиями $> 1,0$ МэВ и ниже энергии, соответствующей кадмиевой границе ($\sim 0,5$ эВ), несущественно меняется по сечению воздушной полости каналов ИК. То есть можно считать, что распределение удельной скорости реакции активации



соответствует распределению интегральной ППН с энергиями $> 1,2$ МэВ, а распределение скорости реакции



соответствует распределению условной ППН $n_{\text{th}}v_0$ (n_{th} — плотность нейтронов с энергиями ниже кадмиевой границы; $v_0 = 2200$ м/с). Тогда допустимо считать, что по реакции (1) определяли плотность потока быстрых нейтронов (ППБН), а по реакции (2) — плотность потока тепловых нейтронов (ПТН).

Для измерения ППН по сечению каналов ИК использовали специальные алюминиевые кольца, которые жестко крепились к гибким стальным штангам, причем плоскость колец была перпендикулярна осям штанг. Для облегчения движения колец по изогнутым каналам ИК диаметр колец был сделан меньше внутренних диаметров каналов. Активационные детекторы располагались в центре и по периметру колец через 60° (см. рисунок). В каждой точке размещались индиевые и медные детекторы. Во время облучения кольца располагались перпендикулярно оси каналов. Однако угловую ориентацию детекторов по сечению каналов относительно направления на ось реакторов определить можно было только косвенно, так как во время доставки детекторов к месту облучения кольца могли повернуться вокруг своей оси.

Время облучения детекторов составляло несколько часов. Во время облучения параметры активной зоны реактора поддерживались постоянными. Мощности реакторов при этом были близки к номинальным.

Экспериментальные результаты, полученные для серийных реакторов ВВЭР-1000 и ВВЭР-440, сравнивались с расчетными.

4. РАСЧЕТ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА НЕЙТРОНОВ В КАНАЛАХ ИК

Для получения расчетных распределений ППН в каналах ИК использовалась программа DOT-III, решающая уравнение переноса нейтронов в двумерной геометрии. При расчете использована симметрия композиции реакторов типа ВВЭР в (r, θ) -геометрии, допускающая проведение расчетов $1/12$ сечения реакторов. Схема расчетной области ВВЭР-1000 показана на рисунке. Толщина биологической защиты за каналами ИК выбиралась таким образом, чтобы исключить влияние радиальных граничных условий (на границе с вакуумом) на простран-

ственное распределение нейтронов в каналах. В расчетах нейтронных потоков по программе DOT-III использовалась 22-групповая библиотека DLC-23/CASK. Источник в активной зоне задавался аналогично тому, как сделано в [6]. Каналы ИК при расчете ВВЭР-1000 в (r, θ) -геометрии задавались в одном угловом интервале с 10 интервалами по диаметру, а ВВЭР-440 — с 8 интервалами.

Полученные в результате (r, θ) -расчета распределения интегральных ППН с энергиями $> 1,1$ МэВ сравнивались с экспериментальными распределениями интегральных ППН, измеренных по реакции (1).

РАСЧЕТНЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментальные распределения ППБН по периметру колец, установленных в каналах ИК на уровне центра активных зон, приведены в табл. 1. Результаты

Т а б л и ц а 1. Экспериментальное распределение плотности потока нейтронов с энергиями $> 1,2$ МэВ по периметру колец, отн. ед.

Угловое направление, град.	ВВЭР-1000	ВВЭР-440 (бетон)	ВВЭР-440 (вода)
0	0,83	0,90	0,81
60	0,92	0,92	0,88
120	1,05	1,10	1,03
180	1,33	1,19	1,21
240	1,06	1,02	0,96
300	0,80	0,87	0,81
360(0)	0,83	0,90	0,81

представлены в относительных единицах, так как в этом случае погрешность результатов (5% для уровня доверительной вероятности 0,95) значительно меньше погрешности абсолютных значений (20%). За единицу принято среднее арифметическое величин ППН в распределении по периметру колец. Из табл. 1 видно, что все распределения имеют ярко выраженный максимум, однако не обладают симметрией. Если предположить, что поле нейтронов в сечении каналов симметрично относительно луча, выходящего из центра реактора и проходящего через ось каналов, то детекторы могут располагаться в несимметричных точках нейтронного поля из-за того, что центры колец смещены от этого направления. Тем не менее можно считать, что отношение максимального значения ППБН к минимальному составляет приблизительный перепад быстрых нейтронов в сечении каналов ИК по лучу, проходящему через ось каналов. В табл. 2 приведены максимальное, минимальное и полученное в центре кольца экспериментальные значения ППБН и ПТН, составляющие перепад нейтронов по сечению каналов ИК разных типов ВВЭР. Для серийных ВВЭР показаны для сравнения расчетные распределения ППБН в относительных единицах.

Из табл. 2 видно, хорошее совпадение экспериментальных и расчетных распределений ППБН для серийных ВВЭР. Для каналов ИК ВВЭР-1000 отношение максимума

Т а б л и ц а 2. Перепад нейтронов по сечению каналов ИК разных типов реакторов

Реактор	Плотность потока быстрых нейтронов, отн. ед.		Плотность потока тепловых нейтронов (эксперимент), отн. ед.
	эксперимент	расчет	
ВВЭР-1000	1,33	1,31	1,11
	1,00	1,00	1,03
	0,80	0,78	0,92
ВВЭР-440 (бетон)	1,19	1,18	1,09
	1,00	1,00	1,01
ВВЭР-440 (вода)	0,87	0,86	0,92
	1,21	—	1,10
	1,05	—	1,00
	0,81	—	0,93

Примечание. Для каждого реактора приводятся максимальные значения, в центре кольца и минимальные.

ППБН к минимуму составило 1,70. Это значительно меньше перепада ППБН по биологической защите, окружающей канал. Как показал расчет, приблизительно в 7 раз падает ППБН в бетоне на толщине, равной диаметру канала. Однако перепад по каналу является существенным, так как без пространственной фиксации детекторов в канале погрешность в определении ППБН составит не менее 70%. Для серийного ВВЭР-440 перепад по сечению канала ИК составил 1,37. Уменьшение перепада по сравнению с перепадом в канале ИК ВВЭР-1000 связано с тем, что диаметр канала ИК ВВЭР-440 меньше диаметра канала ИК ВВЭР-1000. Для канала ИК ВВЭР-440 с водяной защитой, как оказалось, перепад может достигать величины 1,50.

При анализе экспериментальных распределений тепловых нейтронов обнаружено, что отношение максимума ППТН к минимуму может достигать для каналов ИК ВВЭР-1000 величины 1,20, а для ВВЭР-440 — 1,18 (табл. 2). Снижение перепада ППТН по каналу при сравнении с перепадом ППБН можно объяснить тем, что градиент ППТН в бетоне, окружающем канал ИК, меньше градиента ППБН.

Абсолютные экспериментальные и некоторые расчетные значения ППБН в центре сечения каналов ИК на уровне середины активных зон представлены в табл. 3.

Напомним, что расчетные результаты получены для двумерной модели реактора. Как показывает опыт расчетов ВВЭР-440, для перехода к трехмерной модели эти результаты надо умножить на 1,10 — 1,15.

Эффективное сечение для пороговой энергии 1,2 МэВ реакции (1) взято равным 286 мб. Интегрирование расчетной ППН также сделано до энергии 1,2 МэВ. Расчетные и экспериментальные результаты нормированы на номинальную тепловую мощность реакторов: 3000 МВт для ВВЭР-1000 и 1375 МВт для ВВЭР-440. Для серийного ВВЭР-440 представлены результаты по двум блокам с разной компоновкой активной зоны. Один блок работал с активной зоной, полностью укомплектованной топлив-

Т а б л и ц а 3. Плотности потоков нейтронов с энергиями > 1,2 МэВ в центре сечений каналов ИК, нейтр./ (см² с)

Реактор	Модификация	Азимутальный угол, град	Эксперимент	Расчет
ВВЭР-1000	Серийный	15	1,08 ± 0,20 ^{*)}	0,98 ^{*)}
ВВЭР-440 (бетон)	Серийный	0	1,09 ± 0,21 ^{*)}	1,14 ^{*)}
	Серийный с 36 кассетами-экранами	0	5,17 ± 1,00 ^{*)}	4,73 ^{*)}
ВВЭР-440 (вода)	III блок НВАЭС	8	3,30 ± 0,60 ^{*)}	

) Запись 1,08 ± 0,20^{)} означает (1,08 ± 0,20) · 10^{*)}.

ными кассетами, а другой — с активной зоной, на периферии которой установлено 36 кассет-экранов, предназначенных для уменьшения потока быстрых нейтронов на корпус реактора.

Как видно из табл. 3, расхождение расчетных и экспериментальных значений не превышает погрешности экспериментальных результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальным и расчетным путем установлена особенность нейтронного поля каналов ИК реакторов АЭС типа ВВЭР, заключающаяся в том, что существует значительный перепад плотности потока нейтронов по сечению каналов. Отмечено хорошее совпадение расчетных и экспериментальных распределений ППБН. Расхождение абсолютных экспериментальных и расчетных значений ППБН в центре сечения каналов ИК не превышает погрешности результатов измерений.

Экспериментальным путем обнаружено, что перепад ППБН по сечению каналов больше перепада ППТН.

В результате проведенного исследования установлено, что для серийного ВВЭР-1000 ППБН по каналу снижается в 1,70 раза, а ППТН — в 1,20 раза; для серийного ВВЭР-440 ППБН снижается в 1,37, а ППТН — в 1,18 раза; для ВВЭР-440 с водяной защитой эти значения составляют 1,50 и 1,18 раза соответственно.

В дальнейшем рекомендуется учитывать эту особенность при эксплуатации датчиков аппаратуры контроля нейтронного потока и их калибровке в нейтронном поле каналов ИК реакторов типа ВВЭР.

В заключение авторы выражают признательность А.В. Хрусталеву за критические замечания при обсуждении статьи.

Список литературы

1. Brodtkin E.B., Kozhevnikov A.N., Khurstalev A.V. Determination of Characteristics of the Neutron Field Affecting on the WWER Reactor Vessel. — In: Proc. 6th Intern. Conf. Rad. Shielding (Tokyo, May 16 — 20, 1983). — Tokyo, 1983, CONF-830538, vol. 2, p. 1055.

2. Maerker R.E., Broadhead B.L., Williams M.L. Recent Progress and Developments in LWR-PV Calculational methodology. — In: Proc. 5th ASTM-EURATOM Symp. on Reactor Dosimetry (Geesthacht, Sept, 24 — 28, 1984). — Geesthacht, 1984, vol. 2, p. 639.
3. Ломакин С.С. и др. Экспериментальные данные о нейтронных полях ВВЭР-440. — Атомная энергия, 1983, т. 54, вып. 3, с. 200.
4. Морозов А.Г. Поле нейтронов в ядерных реакторах ВВЭР-440. — В кн.: Сборник научных трудов. Сер. Физические процессы в реакторах АЭС. — М.: ВТИ, 1985, с. 32.
5. Ломакин С.С., Петров В.И., Самойлов П.С. Радиометрия нейтронов активационным методом. — М.: Энергоатомиздат, 1983.
6. Бородин А.В. и др. Расчетно-экспериментальные исследования поля нейтронов в околокорпусном пространстве реакторов ВВЭР. — ВАНТ. Сер. Физика и техника ядерных реакторов, 1985, вып. 4, с. 72.

Статья поступила в редакцию
20 ноября 1986 г.

Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Физика и техника атомных реакторов,
1987, вып. 8, с. 74 — 77.