

УДК 621.039.5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФЛЮЕНСА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ НА КОРПУСЕ ВВЭР-1200 ПО РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ, ВКЛЮЧАЮЩЕЙ МЕТОД МОНТЕ-КАРЛО

Днепровская Н.М., Кравченко М.О., Рубин И.Е., Тетерева Н.А.

(ОИЭЯИ — Сосны, г. Минск, Республика Беларусь)

e-mail: rubin@sosny.bas-net.by

При обосновании надежности и долговечности корпуса реактора основное значение имеет моделирование ослабления потока быстрых нейтронов за активной зоной. В настоящей работе исследуется возможность создания быстродействующего расчета флюенса быстрых нейтронов на корпусе ВВЭР-1200 на основе метода Монте-Карло кода MCU-PD, используемого для определения ослабления вылетающих из активной зоны нейтронов [1]. В предлагаемой модели предварительно рассчитываются коэффициенты $T_{i \rightarrow j}$ как потоки в регистрационных областях j корпуса реактора от единичных внешних источников, задаваемых поочередно в ТВС i на периферии активной зоны (рис. 1). После этого результирующие потоки Φ_j определяются без расчета методом Монте-Карло, только суммированием вкладов внешних источников q_i :

$$\Phi_j = \sum_i q_i T_{i \rightarrow j}.$$

Интенсивность источников рассчитывается с помощью инженерного кода DYN3D. При этом учитываются изменение нейтронно-физических характеристик активной зоны рассматриваемых топливных загрузок: мощности, отравления и выгорания топлива в реакторе, а

также перестановка ТВС. Поскольку коэффициенты $T_{i \rightarrow j}$ определялись с помощью кода MCU-PD, не имеющего блока теплогидравлики, соответствующие расчеты проводили для состояния на малой мощности в начале первой загрузки. Затем они принимаются для всего топливного цикла с реальными мощностью, отравлением, выгоранием и загрузкой, поскольку коэффициенты $T_{i \rightarrow j}$, соответствующие только нейтронам энергией $E > 0,5$ МэВ, как оказалось, почти не зависят от этих величин. Зависимость потоков от перечисленных параметров проявляется через изменение распределения источников q . Коэффициенты $T_{i \rightarrow j}$ определяются для единичного внешнего источника, расположенного в твэлах i -й ТВС на интервале 200 см в центральной по высоте части активной зоны. Регистрационные области j в корпусе реактора представляют собой цилиндры диаметром, равным его толщине 19,75 см, и высотой 375 см (напротив активной зоны). Таким образом, при определении коэффициентов $T_{i \rightarrow j}$ утечка нейтронов источника по торцам исключается.

Большое влияние на поток нейтронов в корпусе оказывает описание потвэльного и высотного распределения источника в периферийных ТВС.

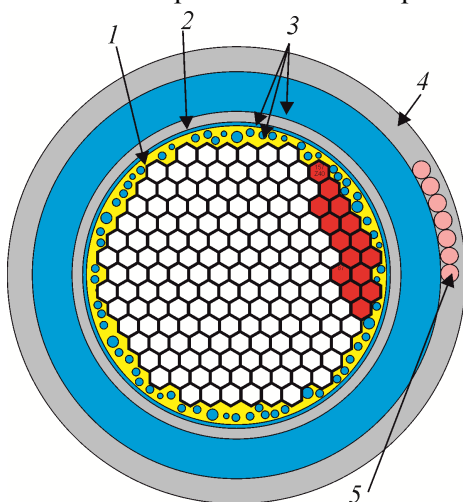
Потвэльная неравномерность источника.

Пространственная неравномерность энерговыделения и рождающихся нейтронов по профилю периферийных ТВС описывается, как, например, в работе [2], на основе функций x и y . В принятом линейном P_1 -приближении остаются только три ортогональные функции P_k :

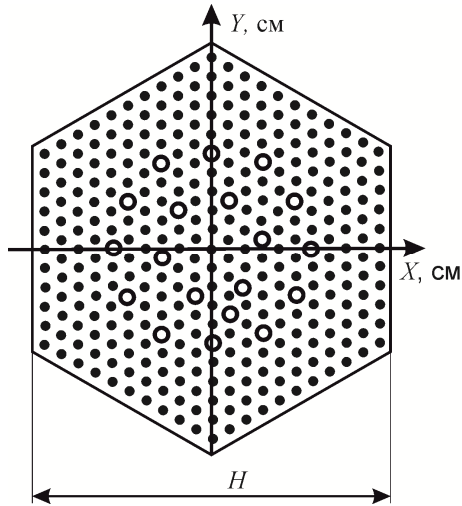
$$P_0 = 1; P_x = c_x x; P_y = c_y y; x = X/H; \quad (1)$$

$$y = Y/(2H/\sqrt{3}),$$

оси X и Y расположены, как показано на рис. 2, $-H/2 < X < H/2$; $-H/\sqrt{3} < Y < H/\sqrt{3}$; $-1/2 < x < 1/2$; $-1/2 < y < 1/2$; $c_x = 3,7969$; $c_y = 4,3879$. Тогда распределение внешнего источника в плане будет иметь вид



Р и с. 1. Задание внешнего источника при расчете потока быстрых нейтронов в корпусе ВВЭР-1200: 1 — выгородка; 2 — шахта; 3 — вода; 4 — корпус; 5 — область регистрации (выделена ТВС с внешним источником)



Р и с. 2. Оси координат X и Y для описания неравномерности: ● — твэл; ○ — направляющие и измерительные каналы (H — шаг размещения ТВС)

$$q(x, y) \sim q_0 + q_x x + q_y y. \quad (2)$$

Первый член в правой части уравнения (2) есть средняя по твэлам интенсивность источника, остальные два описывают потвэльную неравномерность в направлении X и Y . Хотя описание источников в виде разложения (2) потребует значительного увеличения предварительных расчетов, появляется возможность представления в рамках P_1 -приближения потвэльного распределения источника в ТВС. Коэффициенты c_x , c_y в выражении (1) определены так, чтобы выполнялось условие ортонормированности при потвэльном суммировании, т.е. при интегрировании по профилю ТВС (l — индекс твэла):

$$\frac{1}{312} \sum_{i=1}^{312} P_k(x_i y_i) P_k(x_i y_i) = \delta_{k',k}.$$

Коэффициенты q_k в уравнении (2) определяются по соотношению

$$q_k = \frac{1}{312} \sum_{i=1}^{312} P_k(x_i y_i) q(x_i y_i). \quad (3)$$

Разложение энергосвечения, значит, и внешнего источника q по профилю ТВС, полученное с использованием кода DYN3D, сводится к суммированию по уравнению (3) с разными весами:

$$q_0 = \frac{1}{312} \sum_{i=1}^{312} q_i; \quad q_x = \frac{1}{312} \sum_{i=1}^{312} c_x x_i q_i; \quad q_y = \frac{1}{312} \sum_{i=1}^{312} c_y y_i q_i.$$

Гармоники источника $P_k(x, y)$, принимающие как положительное, так и отрицательное значение, не могут быть использованы в расчетах с помощью кода MCU-PD, так как он не воспринимает отрицательных значений внешнего источника. Поэтому при описании неравномерности источника используются переменные, не принимающие отрицательных значений: $x' = 1/2 - x$, $y' = 1/2 + y$. При этом, поскольку гармоники x' и y' уже не ортогональны, рассчитанные коэффициенты $T'_{k,i \rightarrow j}$ ($k \neq 0$) соотносятся с $T_{k,i \rightarrow j}$, которые соответствуют ортогональным гармоникам x и y : $T'_{k,i \rightarrow j} = T_{k,i \rightarrow j} + T_{0,i \rightarrow j}/2$.

Интегральные по объему потоки Φ_j в регистрационных областях j корпуса реактора определяются по формуле

$$\Phi_j = \sum_i (A_{0,i} T_{0,i \rightarrow j} + A_{x,i} T'_{x,i \rightarrow j} + A_{y,i} T'_{y,i \rightarrow j}). \quad (4)$$

Коэффициенты $A_{0,i}$, $A_{x,i}$ и $A_{y,i}$ уравнения (4) определяются из значений $q_{k,i}$, характеризующих абсолютную интенсивность и неравномерность источника в ТВС i (после процедуры ортогонализации), следующим образом:

$$A_{0,i} = q_{0,i} - (A_{x,i} + A_{y,i})/2; \quad A_{x,i} = -q_{x,i} c_x; \quad A_{y,i} = q_{y,i} c_y.$$

Погрешности описания неравномерности источника в плане получены на основе сравнительных расчетов с помощью кода MCU-PD потока, среднего по толщине корпуса, в азимутальном направлении 0° в разных приближениях потвэльной неравномерности внешнего источника. Результаты, соответствующие состоянию на минимально контролируемом уровне мощности первой загрузки, приведены в таблице для трех ТВС с максимальным вкладом в поток.

В качестве потвэльного распределения внешнего источника в одном случае было взято потвэльное распределение, рассчитанное с помощью кода MCU-PD с источником деления (как тестовое) и DYN3D, в другом — по аппроксимации (4). В качестве среднего по ТВС значения внешнего источника q_0 принято относительное распределение энергосвечения по ТВС. Погрешности не учитывают неопределенности внешнего источника по ТВС q_0 и его распределение внутри ТВС в расчетах методом Монте-Карло, оцениваемые на уровне 1 и 10% соответственно.

Плотность потока нейтронов, рассчитанная с помощью кода MCU-PD с разным потвэльным распределением внешнего источника, $10^{-7} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$

TBC	$q_0, \text{с}^{-1}$		Прямые расчеты с потвэльным распределением источника		Расчеты по аппроксимации (4) с разложением источника			
	MCU-PD	DYN3D	MCU-PD	DYN3D	MCU-PD		DYN3D	
					P_0	P_1	P_0	P_1
102	1,21	1,17	$9,65 \pm 0,6\%$	$9,33 \pm 0,6\%$	$12,4 \pm 0,4\%$	$9,56 \pm 0,5\%$	$12 \pm 0,4\%$	$9,33 \pm 0,4\%$
88	1,42	1,4	$3,44 \pm 0,9\%$	$3,51 \pm 1\%$	$3,96 \pm 0,9\%$	$3,54 \pm 0,8\%$	$3,9 \pm 0,9\%$	$3,52 \pm 0,8\%$
75	1,2	1,17	$9,61 \pm 0,5\%$	$9,46 \pm 0,6\%$	$12,5 \pm 0,5\%$	$9,65 \pm 0,4\%$	$12,2 \pm 0,5\%$	$9,45 \pm 0,4\%$
	Сумма		$22,7 \pm 0,3\%$	$22,3 \pm 0,4\%$	$28,9 \pm 0,3\%$	$22,8 \pm 0,3\%$	$28,1 \pm 0,3\%$	$22,3 \pm 0,3\%$

Как видно из таблицы, учет потвэльного распределения энерговыделения снижает поток примерно на 20% по сравнению с равномерным распределением по профилю TBC. Вместе с тем аппроксимация (4) для потвэльного распределения энерговыделения в случае суммарных значений не приводит к отличию потоков, заметно выходящему за рамки статистической погрешности результатов. Намного существеннее отличия, обусловленные разными кодами. Таким образом, линейное приближение описания потвэльной неравномерности оказывается эффективным для случая большого градиента потока на боковой границе активной зоны с отражателем. Использование более высоких приближений представляется излишним.

Неравномерность источника по высоте.

Неравномерность распределения источника (энерговыделения) в активной зоне и потока в корпусе по высоте описывается равномерным разбиением по слоям, внутри которых зависимость от высоты отсутствует. Вертикальная перетечка нейтронов, рожденных в слое m' TBC i и попадающих в слои m корпуса, приближенно характеризуется весами w_p , зависящими от близости слоев m' и m . С учетом сделанных предположений уравнение (4) имеет вид

$$\Phi_{j,m} = \sum_i \sum_{m'} (A_{0,i,m'} T_{0,i \rightarrow j} + A_{x,i,m'} T'_{x,i \rightarrow j} + A_{y,i,m'} T'_{y,i \rightarrow j}) \omega_p, \quad (5)$$

где $p = |m - m'|$; $m = m' - 4$; $m' - 3, \dots, m' + 4$. Для каждого значения m' выполняется условие $\omega_0 + 2(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4) = 1$.

Веса ω_p также определялись предварительными расчетами методом Монте-Карло. Вследствие ограниченного объема регистрационных областей слоев m ($m = 1, \dots, 20$) в корпусе в расчетах требуется значительно большее число ис-

торий, чем в расчетах с одним слоем по всей высоте. По этой причине в отличие от расчета коэффициентов $T_{k,i \rightarrow j}$ определение ω_p выполнялось только для одной TBC № 75 (влияние номера TBC несущественно). Единичный внешний источник при этом задавался в слое $m' = 10$. Зависимость веса ω_p от расстояния между объектами i и j в плане не учитывается.

Коэффициенты уравнения (5) определяются следующим образом:

$$A_{0,i,m'} = q_{0,i,m'} - (A_{x,i,m'} + A_{y,i,m'})/2;$$

$$A_{x,i,m'} = -q_{x,i,m'} C_x; A_{y,i,m'} = q_{y,i,m'} C_y.$$

Соотношение интенсивности источника нейтронов и энерговыделения в слое m' TBC i принято тем же, что и макросечений генерации и энерговыделения:

$$\langle v \Sigma_f \rangle_{i,m'} / \langle \kappa \Sigma_f \rangle_{i,m'}.$$

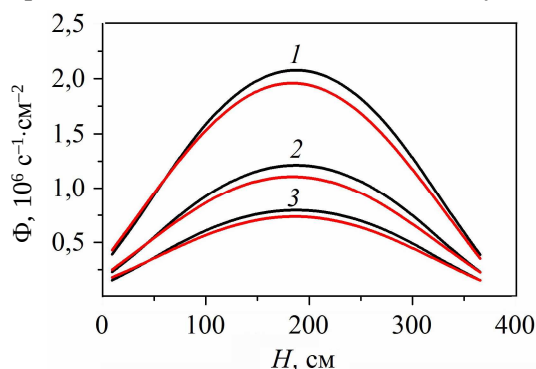
Верификация модели. Для оценки точности предлагаемого подхода рассчитаны потоки нейтронов энергией $E > 0,5$ МэВ в 140 регистрационных областях корпуса реактора, представляющих собой цилиндры высотой 18,75 см и диаметром, равным толщине корпуса. Равномерное расположение областей по азимуту от 0 до 30° в плане показано на рис. 1, на каждую азимутальную точку приходится по 20 расположенных равномерно по высоте цилиндров напротив активной зоны. Коэффициенты $T_{k,i \rightarrow j}$ рассчитывали с погрешностью 1—2%, для чего потребовалось сравнительно небольшое число историй (до 50 млн в каждом расчете) вследствие отсутствия итераций по источнику деления.

Тестом служил полномасштабный расчет ВВЭР-1200 с помощью кода MCU-PD с источником деления, статистическая погрешность потоков в котором оценивается 1% максимального. Для достижения такой погрешности по-

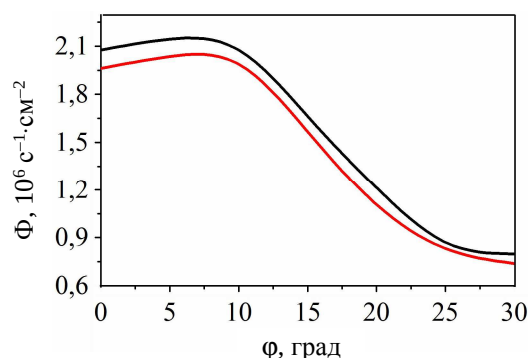
требовалось число историй в несколько миллиардов. В обоих случаях принимали минимально контролируемый уровень мощности реактора 0,3 МВт, первую загрузку, отсутствие выгорания и отравления (рис. 3, 4).

Предложенный подход достаточно близко к тесту описывает распределение потока быстрых нейтронов в регистрационных областях: расхождение не превышает 6% по отношению к максимальному. Основными причинами отличий являются различие методик расчета реактора и ядерных данных, используемых в модели и тестовом расчете, приближенность описания перетечки нейтронов в аксиальном направлении, статистические погрешности в расчетах методом Монте-Карло. В данном случае расхождение удовлетворяет критерию приемлемости сравнения расчетных и экспериментальных результатов для оборудования ВВЭР, рекомендуемому в работе [4] на уровне 10—15%.

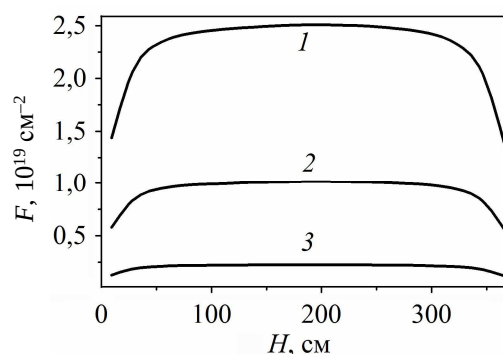
Результаты расчета флюенса нейтронов на корпусе реактора. С использованием предложенного подхода рассчитан флюенс быстрых нейтронов в течение 60 лет эксплуатации



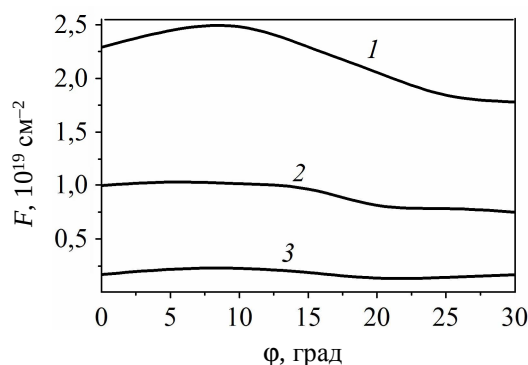
Р и с. 3. Зависимость потока Φ от высоты в регистрационных областях для азимутального угла φ 0 (1), 20 (2), 30° (3): — — расчет по предложенной модели; — — тестовый расчет соответственно



Р и с. 4. Азимутальная зависимость потока Φ в среднем по высоте сечения: — — расчет по предложенной модели; — — тестовый расчет



Р и с. 5. Распределение флюенса нейтронов F по высоте корпуса реактора: 1, 3 — внутренняя и внешняя поверхность соответственно; 2 — середина корпуса



Р и с. 6. Распределение флюенса нейтронов F по азимутальному углу: 1, 3 — внутренняя и внешняя поверхность соответственно; 2 — середина корпуса

ВВЭР-1200 в годичном режиме перегрузки, падающих на его внутреннюю, в середине толщины и наружную поверхность корпуса (рис. 5, 6). С этой целью предварительно были выполнены расчеты коэффициентов $T_{k,i \rightarrow j}$ с несколькими рядами регистрационных областей для каждого азимутального угла.

Максимальный флюенс нейтронов, примерно соответствующий азимутальному углу 10° и высоте 200 см от низа активной зоны, на внутренней поверхности составляет $2,51 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$, что в 2,5 раза меньше значения, до которого аттестованы конструкционные материалы корпуса реактора.

Закключение. Разработанный комбинированный подход расчета потока и флюенса нейтронов в материалах за активной зоной ВВЭР сочетает преимущества инженерных методов по быстродействию и высокую точность описания ослабления нейтронов в конструкционных материалах. После определения коэффициентов $T_{k,i \rightarrow j}$, описывающих ослабление интенсивности нейтронов методом Монте-Карло, соответствующая расчетная модель становится

аналогичной по быстрдействию имитации топливного цикла с помощью кода DYN3D или другого реакторного.

Использование в подходе к расчету метода Монте-Карло позволяет отобразить гетерогенность конструкционных материалов реактора и вследствие этого получить преимущество по точности перед кодами, например, DORT, TORT, реализующими S_n -метод. Применение метода Монте-Карло в данном подходе главным образом стало возможным благодаря описанию неравномерности потвального распределения энерговыделения в периферийных ТВС в линейном P_1 -приближении.

Использование предлагаемой модели может быть эффективным и при решении других задач, например, определении наведенной активности в образцах-свидетелях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев Н.И., Большагин С.Н., Гомин Е.А. и др. Статус МСУ-5. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2011, вып. 4, с. 5—23.
2. Днепроvская Н.М., Касюк Д.М., Лицкевич Д.Н. и др. Методика восстановления макрораспределения величин и наложения на соответствующие микрораспределения в ТВС реактора ВВЭР-1000 (ВВЭР-1200) с последующей визуализацией. — Весці НАН Беларусі. Сер. Фіз.-тэхн. навук, 2014, № 1, с. 82—87.
3. Бородин П.Г., Хренников Н.Н., Газетдинов А.С. Рекомендации по проведению мониторинга радиационной нагрузки для оценок прогноза остаточного ресурса оборудования ВВЭР с учетом требований действующих нормативных документов. — В сб.: 10-я Межд. научно-технич. конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». Подольск, ОКБ «Гидропресс», 16—19 мая 2017 г., с. 82—95.

Поступила в Редакцию 23.03.21

УДК 621.039.564.5

ПОДДЕРЖАНИЕ И ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ МОЩНОСТИ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Тимонин А.С. (НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва),

Ещенко С.Н., Минаков А.А., Ефремов А.Ю., Пиядов О.Г. (АО «Промсервис», г. Димитровград),

Потапов О.А. (Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Белоярская АЭС», г. Заречный),

Гуревич В.М. (ООО «Центрприбор», г. Дзержинский, Московская обл.)

e-mail: timonin@nrcki.ru

Поддержание и повышение точности контроля расхода питательной воды и тепловой мощности реакторной установки. Тепловая мощность реакторной установки является одним из основных контролируемых параметров, который характеризует безопасность эксплуатации. На энергоблоках с ВВЭР оперативный контроль тепловой мощности осуществляется с помощью штатной системы внутриреакторного контроля [1, 2]. Тепловая мощность определяется несколькими способами, при этом погрешность средневзвешенной мощности не должна превышать обоснованную в проекте. Для современных проектов энергоблоков пределы относительной погрешности составляют $\pm 2\%$.

Способ расчета тепловой мощности, основанный на показаниях внутри- и внезонных детекторов плотности нейтронного потока, требует пересчета этих показаний в калориметрические

величины. Такой пересчет так или иначе основывается на независимых способах определения тепловой мощности с помощью датчиков теплофизического контроля. Например, на энергоблоках с ВВЭР при оценке тепловой мощности по параметрам первого контура используются показания датчиков температуры, установленных в этом контуре (в активной зоне, в корпусе реактора и главных циркуляционных петлях), расход теплоносителя по петлям первого контура вычисляется на основе напорных характеристик главных циркуляционных насосов и гидравлических характеристик тракта теплоносителя первого контура.

Вместе с тем погрешность теплофизических измерений, например, с помощью петлевых датчиков температуры может иметь значимые составляющие, которые плохо поддаются оперативной оценке и коррекции [3]. Погрешности определения петлевого расхода теплоносителя