

Полученные значения $\bar{\sigma}$ и $\bar{\Gamma}$ зависят от s , однако при $\varphi = 10^{13} \div 10^{14}$ нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ с погрешностью 10—15% можно пользоваться постоянными, приведенными в табл. 5.

Автор признателен Б. П. Кочурову за помощь при определении оптимальных параметров ЭО и Г. Т. Бышиной за помощь при вычислениях на ЭВМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Crouch E. «Atomic Data and Nuclear Data Tables», 1977, v. 19, N 5.
2. Mughabghab S., Garbor D. Neutron Cross Sections. № 1. BNL-325, Ed. 3, 1973.
3. Федорова А. Ф., Писанко Ж. П., Новоселов Г. М. Препринт КИЯИ-76-6; Препринт КИЯИ-76-7.
4. Ануфриев В. А. и др. «Атомная энергия», 1979, т. 46, вып. 3. с. 158.

Поступила в Редакцию 6.03.80

УДК 621.039.566

Корректировка макроскопических сечений путем уточнения параметров загрузки РБМК

ШКУРПЕЛОВ А. А., ИСАЕВ Н. В., НЕМИРОВ А. С.

Физический расчет РБМК является трудной математической задачей не только потому, что активная зона представляет собой большую и сложную гетерогенную систему, но и из-за существующих неопределенностей в ряде физических параметров, принимаемых во внимание при расчете. Для эксплуатационных расчетов РБМК в настоящее время используется программа БОКР-СОВЗ [1], в основу которой положена двумерная диффузионная модель. Макроскопические константы для этой программы составляются на основе расчетов ячейки реактора с граничными условиями, принятыми для однородной решетки. При расчете реальной загрузки реактора эти граничные условия могут нарушаться. Учет реальных граничных условий требует усложнения расчетной модели или корректировки макроскопических сечений ячеек реактора в рамках существующей расчетной модели.

Известно несколько подходов к корректировке макросечений [2, 3 и др.]. В настоящей работе не анализируются детально существующие подходы. Отметим только, что они довольно трудоемки, так как связаны с вычислением громоздких матриц или некоторых «пробных» функций, которые затруднительно использовать для расчетов последующих состояний реактора.

Нами предложен и использован при расчетах РБМК-1000 довольно простой и быстрый метод корректировки. При этом сохраняются существующие методы и программы расчета макроскопических сечений реактора, так как корректируются не отдельные значения макросечений, а те физические величины (энерговыведение, размер, плотность и т. п.), которые используются при расчете макросечений. Метод не требует расчета и хранения в памяти ЭВМ громоздких массивов данных и позволяет легко использовать результаты корректировки для прогнозирования последующих состояний реактора.

Рассмотрим двухгрупповое уравнение диффузии в виде

$$\begin{aligned} -D_{ij}^{(1)} \Delta \varphi_{ij}^{(1)} + (\Sigma_{ad}^{(1)})_{ij} \varphi_{ij}^{(1)} &= \frac{\chi^{(1)}}{k_{эф}} (Q_f)_{ij}; \\ -D_{ij}^{(2)} \Delta \varphi_{ij}^{(2)} + (\Sigma_a^{(2)})_{ij} \varphi_{ij}^{(2)} &= \\ &= (\Sigma_d^{1 \rightarrow 2})_{ij} \varphi_{ij}^{(1)} + \frac{\chi^{(2)}}{k_{эф}} (Q_f)_{ij}, \end{aligned} \quad (1)$$

где (ij) — номер ячейки реактора; $\varphi^{(2)}$ — плотность потока нейтронов (используемые здесь обозначения соответствуют общепринятым). Для РБМК $\chi^{(1)} = 1$; $\chi^{(2)} = 0$.

В программе БОКР-СОВЗ, используемой для физического расчета РБМК, принято, что $\nu^{(1)} \Sigma_f^{(1)} = 0$, а $\nu^{(2)} \Sigma_f^{(2)}$ соответствует некоторой эффективной величине. Тогда член источника делений имеет вид

$$(Q_f)_{ij} = (\nu_f^{(2)} \Sigma_f^{(2)})_{ij} \varphi_{ij}^{(2)}. \quad (3)$$

Для энергетического реактора, работающего на мощности, $k_{эф}^0 = 1$, а

$$(Q_f)_{ij} = W_{ij}^0/a, \quad (4)$$

где W_{ij}^0 — значение мощности (ij) -го канала, восстановленное по расчетно-экспериментальным методикам; a — некоторый нормировочный коэффициент.

Подставим значение Q_f из равенства (4) в уравнение (1). Тогда имеем

$$\begin{aligned} -D_{ij}^{(1)} \Delta \varphi_{ij}^{(1)} + (\Sigma_{ad}^{(1)})_{ij} \varphi_{ij}^{(1)} &= W_{ij}^0/a; \\ -D_{ij}^{(2)} \Delta \varphi_{ij}^{(2)} + (\Sigma_a^{(2)})_{ij} \varphi_{ij}^{(2)} &= (\Sigma_d^{1 \rightarrow 2})_{ij} \varphi_{ij}^{(1)}. \end{aligned} \quad (5)$$

Для решения системы (5) используются блоки программы БОКР-СОВЗ. При этом не требуется вводить внешние итерации, так как значение источника делений задано выражением (4). Полученные значения $\varphi_{ij}^{(2)}$ таковы, что они правильно описывают распределение мощности в реакторе. Отметим, что при решении системы (5) использованы некорректированные значения макросечений. Будем стремиться к тому, чтобы значения источ-

ников Q_j , полученные в физическом расчете по формуле (3), совпадали с значениями источника, полученными по формуле (4) с использованием расчетно-экспериментальной информации о мощности каналов. Разделим значения выражений (3) и (4) на $\varphi_{ij}^{(2)} (\Sigma_a^{(2)})_{ij}$ и обозначим

$$\begin{aligned} (k_T^p)_{ij} &= (v_f^{(2)} \Sigma_f^{(2)})_{ij} / (\Sigma_a^{(2)})_{ij}; \\ (k_T^a)_{ij} &= W_{ij}^a / [a (\Sigma_a^{(2)})_{ij} \varphi_{ij}^{(2)}], \end{aligned} \quad (6)$$

где k_T^p и k_T^a — некоторые безразмерные параметры ячеек. Тогда метод корректировки макроскопических констант ячеек будет основываться на том, чтобы значения k_T^a в процессе корректировки как можно ближе совпадали с k_T^p .

Нами выполнены расчеты k_T^a и k_T^p для реактора первого блока Курской АЭС по состоянию его на 11 ч 26 мин 3 ноября 1978 г. Результаты показывают, что k_T^p и k_T^a совпадают для большого числа ТВС. Это говорит о достаточной надежности макросечений, используемых в программе БОКР-СОВЗ. Однако замечено, что основные расхождения в k_T наблюдаются в ТВС, расположенных в основном вблизи регулирующих стержней.

Макроскопические сечения в программе БОКР-СОВЗ представлены в виде степенных полиномов от мощности W_{ij} и энерговыработки E_{ij} . Если мы доверяем значениям W_{ij} , то тогда единственным параметром, которым можно варьировать при расчете k_T^p , остается E_{ij} . Сделано предположение о том, что данные об энерговыработке E_{ij} , определенные системой централизованного контроля реактора, могут быть неточны для некоторых ТВС (например, для ТВС, примыкающих к стержням СУЗ). Действительно, спектр нейтронов в ТВС, примыкающих к регуляторам, зависит от глубины погружения поглотителя. В программе двумерного расчета (а также при составлении макросечений таких ТВС) это не учитывается. Не учитываются также возможные статистические разбросы в загрузке топлива в канал. Поправка в значения мощности прилегающих к стержню ТВС вводится в системе СКАЛА (в программе ПРИЗМА), однако такая поправка является оценочной. С учетом этого можно заключить, что мощность данной ТВС может отличаться от истин-

ной. При длительной работе реактора может случиться так, что значения E_{ij} , определенные системой централизованного контроля, отличаются от истинной. Этим частично объясняется различие в значениях k_T .

Корректировку значений E_{ij} будем проводить только в том случае, если не удовлетворяется условие

$$|(k_T^a - k_T^p)_{ij}| / (k_T^a)_{ij} \leq \varepsilon_1, \quad (7)$$

где $\varepsilon_1 \approx 0,001 \div 0,01$. При этом будем предполагать, что скорректированные значения энерговыработки \bar{E}_{ij} незначительно отличаются от значений E_{ij} , т. е.

$$|E_{ij} - \bar{E}_{ij}| / E_{ij} \leq \varepsilon_2, \quad (8)$$

где $\varepsilon_2 \approx 0,1 \div 0,2$. Заметим, что по условию (7) можно скорректировать сечения ячеек при замене E_{ij} на \bar{E}_{ij} . Оптимальные значения ε_1 и ε_2 находятся внутри указанных интервалов и могут быть найдены численным путем. С увеличением значений ε_1 и ε_2 эффективность корректировки возрастает, но и время, затрачиваемое на корректировку, также возрастает, так как увеличивается число ТВС, в которых необходимо проводить корректировку.

Рассмотрим численные примеры. Результаты расчетов приведены в таблице. Для оценки результатов корректировки использованы следующие величины: $k_{эф}$; коэффициент неравномерности энерговыделения k_W ; среднее квадратичное отклонение мощности

$$\sigma_2 = \sqrt{\sum_{ij} (W_{ij}^a - W_{ij}^p)^2 / (N - 1)},$$

где N — число ТВС в реакторе; максимальное отклонение расчетных и экспериментальных значений мощности ТВС

$$\sigma_{\max} = \max (W_{ij}^a - W_{ij}^p) / W_{ij}^a \cdot 100\%.$$

В результате корректировки ($\varepsilon_1 = 0,01$, $\varepsilon_2 = 0,2$) определены новые значения \bar{E}_{ij} для ТВС, неудовлетворяющие условию (7). При этом использованы четыре итерации по расчету макросечений [т. е. после каждого пересчета \bar{E}_{ij} определены новые макросечения, по ним проведен расчет $\varphi_{ij}^{(2)}$ системы (5), затем определены значения k_T и т. д.]. Результаты расчетов показывают, что расхожде-

Влияние корректировки на физический расчет РБМК

Параметр	Эксперимент	Расчет				
		без коррекции	коррекция E_{ij}	коррекция h_K	коррекция ρ_B	
					по всем ТВС	по датчикам
$k_{эф}$	1,00000	1,00972	0,99908	0,99916	0,99931	0,99932
k_W	1,268	1,602	1,340	1,339	1,339	1,339
σ_2 , МВт	—	0,259	0,081	0,074	0,045	0,038
σ_{\max} , %	—	32,0	16,1	15,0	10,8	5,2

ние в значениях k_W уменьшилось с 26,3 до 5,7%; σ_2 уменьшилось с 0,259 до 0,081 МВт, а σ_{\max} — с 32,0 до 16,1%. Таким образом, корректировка значений E_{ij} в рамках существующей расчетной модели существенно улучшает результаты физического расчета РБМК.

Для подтверждения правильности сделанных предположений о E_{ij} выполнен расчет того же блока Курской АЭС на 6 марта 1979 г. с учетом коррекции E_{ij} , проведенной по состоянию реактора на 3 ноября 1978 г. В результате расхождение в k_W уменьшилось с 22,1 до 8,0%, σ_2 с 0,284 до 0,148 МВт, а σ_{\max} с 33,1 до 23,7% (полученные значения эффективности корректировки зависят от выбора ϵ_2 на предыдущем этапе). Следует заметить, что между корректировками прошло ~ 4 мес. Для более коротких интервалов результаты корректировки выглядят эффективнее.

Для уменьшения существующих расхождений между результатами расчетов и показаниями системы СКАЛА проведена дополнительная корректировка расчета, связанная с устранением неточностей определения положения стержней h_K . Предполагалось, что у стержней регулирования существует люфт, равный $\Delta h_K = \pm 0,2$ м. Истинное положение \bar{h}_K стержней выбиралось таким образом, чтобы сумма значений k_T^p у прилегающих к стержню ТВС стремилась к соответствующей сумме значений k_T^0 . Значение k_W (см. таблицу) практически не изменилось при уточнении глубины погружения стержней \bar{h}_K . Наблюдаются небольшие ($\sim 1\%$) уменьшения σ_2 и σ_{\max} .

Для устранения возможных неопределенностей в загрузке поглотителя в стержнях регулирования проведена корректировка ядерных концентраций ^{10}B ρ_B . Новые значения ρ_B выбираются из условия, аналогичного описанному выше. При этом σ_2 (см. таблицу) уменьшилась до 0,045 МВт, а σ_{\max} — до 10,8%.

Если анализ расхождений k_T (при коррекции h_K или ρ_B) проводить не по суммам значений k_T

у прилегающих к стержню ТВС, а по значению k_T в той ТВС данной полячейки, в которой расположен датчик, то результаты расчетов улучшаются: $\sigma_2 = 0,038$ МВт, $\sigma_{\max} = 5,2\%$. Это можно объяснить особенностями алгоритма восстановления поля энерговыделения, используемого в системе централизованного контроля РБМК (в программе ПРИЗМА). Восстановление поля энерговыделения в ПРИЗМЕ проводится по показаниям датчиков, расчетным значениям поля энерговыделения и некоторым интерполяционным коэффициентам, полученным из метода статистической интерполяции [4]. Поэтому коррекция значений k_T в ТВС с датчиками позволяет улучшить совпадение полей энерговыделения не только в этих ТВС, но и в ТВС без датчиков.

Введение таким образом скорректированного расчета W_{ij} в систему дискретного контроля поля энерговыделения в РБМК позволит уменьшить погрешности в определении поля энерговыделения по совокупности расчетных и экспериментальных данных и повысить достоверность определения теплотехнической надежности активной зоны реактора. Пользуясь результатами этой корректировки, можно существенно улучшить точность расчета в последующее после корректировки время. Отметим, что на проведение трех последовательных корректировок (E_{ij} , h_K и ρ_B) затрачивается около 20 мин счетного времени на ЭВМ ЕС-1033.

Авторы благодарят В. П. Борцева за помощь в освоении программы физического расчета РБМК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Емельянов И. Я. и др. Атомная энергия, 1976, т. 40, вып. 2, с. 127.
2. Емельянов И. Я. и др. Там же, 1973, т. 34, вып. 2, с. 75.
3. Емельянов И. Я., Постников В. В., Юркин Г. В. Там же, 1976, т. 44, вып. 5, с. 299.
4. Доллежал Н. А., Емельянов И. Я. Канальный ядерный энергетический реактор. М., Атомиздат, 1980, с. 114.

Поступила в Редакцию 11.12.79

УДК 621.039.515

Гармоническое регулирование мощности энергетического реактора

ПОТАПЕНКО П. Т.

Для анализа реактора как объекта управления эффективно применяется метод гармоник [1—5]. В настоящей статье предлагаются системы регулирования гармоник.

Передаточные функции гармоник. Гармониками кратко называют ортонормированные собственные функции $f_i(\mathbf{r})$, удовлетворяющие уравнению

$$\nabla^2 f_j + B^2 f_j + \alpha_j^2 f_j = 0 \quad (1)$$

и нулевым граничным условиям в пределах объема реактора V . В уравнении (1) α_j^2 — собственные числа; $B^2 = (K - 1)/M^2$ — материальный пара-

метр реактора в стационарном состоянии; K — коэффициент размножения; M^2 — площадь миграции нейтронов.

При регулировании вследствие малости отклонений от стационарного режима допустимо пользоваться линеаризованными уравнениями

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{k\Phi}{\tau} + \frac{K-1}{\tau} \varphi + \frac{M^2}{\tau} \nabla^2 \varphi - \sum_{i=1}^6 \frac{\partial c_i}{\partial t}; \quad (2)$$

$$\partial c_i / \partial t = \beta_i \varphi / \tau - \lambda_i c_i, \quad i = 1, 2, \dots, 6. \quad (3)$$