По полученному значению P и известному закону распределения рассматриваемого параметра находим практически предельное отклонение параметра для ячейки $(\Delta\mathscr{P})^*$, обеспечивающее заданное значение $P_M(m)$. Так, для $P_M(3) = 0{,}00135$ (вероятность одностороннего выхода нормально распределенной случайной величины за пределы 3σ, часто принимаемая в качестве допустимой степени риска при расчетах надежности)

$$P = 0{,}111,$$

чему соответствует практически предельное отклонение нормально распределенного параметра (фактор перегрева для ячейки)

$$(\Delta\mathscr{P})^* = 1{,}22\sigma.$$

Обычно для твэла принимают $(\Delta\mathscr{P})_{\text{макс}} = 3\sigma$, откуда следует, что в рассматриваемом случае фактор перегрева уменьшается приблизительно в 2,5 раза. Соответственно уменьшается и вызываемое этим фактором отклонение температуры твэла.

Если канал составляется из элементов двух типов (например, твэлы и вытеснители), то по аналогии с выражением (1)

$$P_{M_1M_2}(m_1, m_2) = \frac{(p_1M_1)!\,(M-m_1)!\cdot(p_2M_2)!\,(M_2-m_2)!}{M_1!\,(p_1M_1-m_1)!\cdot M_2!\,(p_2M_2-m_2)!}. \quad (4)$$

При $P_1 = P_2 = P$ задача сводится к предыдущей. Если $P_1 \neq P_2$, можно рассматривать различные варианты сочетания значений P_1 и P_2, обеспечивающие заданное значение $P_{M_1M_2}(m_1, m_2)$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Крамеров А. Я., Шевелев Я. В.** Инженерные расчеты ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1964.
2. **Клемин А. И.** Инженерные вероятностные расчеты при проектировании ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1973.
3. **Principles** of Not-channel Factor Calculations for Fast Reactors. Vienna, IAEA-166, 1974.
4. **Храновский В. А., Курбатов И. М.** «Атомная энергия», 1978, т. 44, вып. 3, с. 258.
5. **Дунин-Барковский И. В., Смирнов Н. В.** Теория вероятностей и математическая статистика в технике. М., ГИТТЛ, 1955.

Поступило в Редакцию 19.03.80

УДК 621.039.51.12:539.125.52

Погрешности гомогенизации и гетерогенизации при расчете РБМК

ГОРОДКОВ С. С.

Энергораспределение в канальном реакторе примерно с одинаковым успехом может быть рассчитано как по гомогенно-сеточной, так и по гетерогенной (основанной на методе источников-стоков) программам. Поскольку различие результатов этих расчетов не мало (до 1—2% по $k_{\text{эф}}$ и до 10—20% по потокам нейтронов), возникает вопрос, какой из этих алгоритмов точнее. Для ответа воспользуемся тем обстоятельством, что в каждом алгоритме используют разные малогрупповые ячеечные константы без учета того, что они получены из одноячеечного многогруппового кинетического расчета, общего фактически для обоих алгоритмов. Поэтому в качестве эталонного совсем не обязательно использовать многогрупповой кинетический расчет реактора. Рассмотрим модельную задачу о полирешетке, перенос нейтронов в которой описывается двухгрупповым диффузионным уравнением

$$\hat{D}\Delta\Phi - \hat{\Sigma}\Phi = 0, \quad (1)$$

где

$$\Phi = \begin{pmatrix}\Phi_f \\ \Phi_t\end{pmatrix}, \quad \hat{D} = \begin{pmatrix}D_f & 0 \\ 0 & D_t\end{pmatrix}, \quad \hat{\Sigma} = \begin{pmatrix}\Sigma_a^f + \Sigma^{1\to 2} - \nu\Sigma_f^f & -\nu\Sigma_f^t \\ -\Sigma^{1\to 2} & \Sigma_a^t\end{pmatrix}.$$

Характеристики $\hat{D}$ и $\hat{\Sigma}$ постоянны по отдельным ячейкам полирешетки и близки к используемым в расчетах РБМК. Эту задачу можно решить точно по гомогенно-сеточной программе с шагом сетки, много меньшим шага решетки. Если затем решим ее с помощью гетерогенной программы, то по разнице результатов получим представление о по-

Некоторые результаты сравнения расчетов полирешеток РБМК

Приближенный расчетный метод	Полирешетка	$\Delta k_{\text{эф}}$, %	$\delta\overline{\Phi}_t/\overline{\Phi}_t$, %: Максимальное в ячейках Р	Среднее в ячейках Р	В ячейке П	В ячейке В
Точное решение — гомогенное						
Гетерогенный	I	0,29	—0,50	0,36	—2,84	7,84
	II	0,14	0,37	0,25	—2,20	8,95
Гомогенно-сеточный, вариант А	I	1,47	—2,88	2,06	—14,43	6,17
	II	1,80	7,52	3,85	—7,57	18,27
Гомогенно-сеточный, вариант Б	I	—0,34	1,57	1,10	3,76	—8,85
	II	—0,59	0,74	0,35	5,86	—10,75
Точное решение — гетерогенное						
Гомогенно-сеточный, вариант А	I	1,18	—2,54	1,89	—11,59	—1,67
	II	1,66	7,25	3,55	—5,37	9,32
Гомогенно-сеточный, вариант Б	I	—0,63	1,91	1,33	7,60	—16,69
	II	—0,73	—0,69	0,47	8,06	—19,70

грешности, которую вносит в расчет РБМК использование гетерогенного приближения. Для этого заменим каждую ячейку полирешетки на гетерогенную, состоящую из однородного замедлителя с нитевидным источником-стоком на оси (Городков С. С. «Атомная энергия», 1980, т. 48, вып. 6, с. 370). Симметричная по углу составляющая нейтронного поля в такой ячейке имеет вид

$$\phi(\mathbf{r}) = \hat{Z}\,[\hat{I}_0(r) + \hat{K}_0(r)\,\hat{\alpha}]\,\varphi, \qquad (2)$$

где

$$\hat{z} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ L^2/(\tau - L^2) & 1 \end{pmatrix}, \quad \varphi = \begin{pmatrix} \varphi_\tau \\ \varphi_L \end{pmatrix};$$

$$\hat{I}_0 = \begin{pmatrix} I_0(r/\sqrt{\tau}) & 0 \\ 0 & I_0(r/L) \end{pmatrix}; \quad \hat{K}_0 = \frac{1}{2\pi}\begin{pmatrix} K_0(r/\sqrt{\tau}) & 0 \\ 0 & K_0(r/L) \end{pmatrix};$$

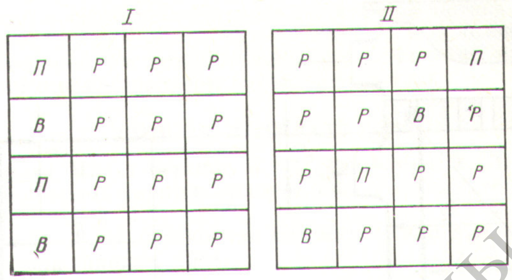
τ — возраст нейтронов; L — длина диффузии тепловых нейтронов в замедлителе; φ_τ и φ_L — свободные коэффициенты; $\hat{\alpha}$ — 2 × 2-матрица, элементы которой подбираются так, чтобы гетерогенная ячейка была эквивалентна исходной. Из нескольких форм эквивалентности мы предпочли ту, которая приводит к наиболее простой связи между гомогенными и гетерогенными константами и требует, чтобы соотношение между утечкой нейтронов через границу и средним по ячейке потоком нейтронов ($\overline{\phi} = \hat{D}\hat{\Phi}$) было одинаковым в гомогенной и гетерогенной ячейках. Это условие приводит к уравнению

$$\hat{\Sigma}\hat{D}^{-} = [\hat{Z}\,(\hat{I}_1 - \hat{K}_1\hat{\alpha})]\,[\hat{Z}\,(\hat{I} + \hat{K}\hat{\alpha})]^{-}, \qquad (3)$$

из которого определяется $\hat{\alpha}$. В уравнении (3) I_1, $\hat{K}_1$ — интегралы по поверхности ячеек от $\frac{\partial}{\partial n} I_0(r)$ и $\frac{\partial}{\partial n}\hat{K}_0(r)$; $\hat{I}$, $\hat{K}$ — средние по объему ячейки от $\hat{I}_0(r)$ и $\hat{K}_0(r)$ соответственно. В результате гетерогенного расчета находят коэффициенты φ, а затем $\overline{\phi}$ можно определить по формуле

$$\overline{\phi} = \hat{Z}\,(\hat{I} + \hat{K}\alpha)\,\varphi. \qquad (4)$$

Помимо гетерогенного с точным расчетом сравниваются также гомогенные расчеты с одним узлом сетки на ячейку. Узлы могут располагаться либо в центрах (вариант А), либо в углах ячеек (вариант Б). Именно по этим схемам проводится подавляющее большинство реакторных расчетов, так как двукратное уменьшение шага двумерной сетки приводит к восьмикратному увеличению объема вычислений.



Два типа полирешеток: Р — технологический канал; П, В — введенный и извлеченный поглощающие стержни

Два типа полирешетки, использованные в расчетах, изображены на рисунке. Гомогенные характеристики ячеек близки к применяемым в расчетах РБМК. Каждое решение нормировалось на средний по рабочим ячейкам поток тепловых нейтронов. Результаты сравнения приведены в первой части таблицы. Видно, что погрешность гетерогенизации настолько невелика, что даже выгоднее было бы использовать гетерогенный расчет вместо грубосеточного при решении гомогенных задач такого типа. Любопытно также, что вариант Б, идеологически равноценный варианту А, на практике оказывается точнее.

Выбранную проблему можно рассмотреть и с противоположной точки зрения, предположив, что точным расчетом является гетерогенный. Погрешности гомогенизации этой задачи будут равны с точностью до знака погрешностям гетерогенизации предыдущей задачи. Сравнение грубо-сеточных решений с гетерогенным (в данном случае точным) показывает, что преимущество варианта Б перед вариантом А уменьшается. Итак, можно сказать, что аккуратно выполненные гомогенизация и гетерогенизация вносят в общую погрешность расчета РБМК малый вклад по сравнению с другими приближениями: двумерным, малогрупповым, грубо-сеточным и пр.

УДК 621.039.5:532.5

Определение параметров потока в опускном кольцевом канале реактора

ОЛЕЙНИК В. Н.

Распределение теплоносителя по сечению активной зоны в реакторах корпусного типа определяется особенностями его течения на входных участках внутрикорпусного гидравлического тракта. Одним из таких участков в ВВЭР является опускной кольцевой канал между корпусом реактора и его выемной частью. Подвод теплоносителя в опускной кольцевой канал осуществляется через один или несколько входных патрубков, т. е. является сосредоточенным. Непосредственно у входных патрубков образуются вихревые зоны. Поля скорости и гидродинамического давления по окружности опускного кольцевого канала существенно неравномерны [1]. При удалении от входных патрубков распределение гидродинамических параметров в опускном кольцевом канале становится более равномерным. Однако полного выравнивания потока в выходном сечении опускного кольцевого канала может и не быть. В связи с этим важное практическое значение имеет задача расчетного определения гидродинамических параметров потока по длине и окружности опускного кольцевого канала при различном числе работающих входных патрубков. Опыты показывают, что за пределами существования вихревых зон гидравлические потери потока в опускном кольцевом канале малы. Поэтому определим гидродинамические параметры потока, исходя из предположения о потенциальном характере течения.

Пусть в опускной кольцевой канал с внутренним радиусом R_1, внешним радиусом R_2 и непроницаемым разделителем потока через входной патрубок поступает поток невязкой жидкости. В связи с тем что ширина опускного кольцевого канала всегда значительно меньше его среднего радиуса $R = 0{,}5\,(R_1 + R_2)$, изменением параметров потока по ширине опускного канала пренебрегаем. Таким образом, будем рассматривать течение невязкой жидкости на некоторой цилиндрической поверхности, радиус которой R, а высота H.

Входной патрубок представим в виде источника мощностью Q с линейными размерами 2δ вдоль оси и $2R\varepsilon$ по окружности (рис. 1).