Эффективность поворотных регуляторов, расположенных в радиальном отражателе реактора

УДК 621.039.562

С. Н. БАРКОВ

При исследовании различных систем регулирования в малогабаритных энергетических реакторах большой интерес представляют регуляторы типа «поворотных барабанов», расположенные в радиальном отражателе реактора (см. рисунок).

В настоящей работе описана методика расчета компенсирующей способности системы регулировочных барабанов. В основу этой методики положен метод статистических испытаний при расчете эффективных отражающих свойств отражателя (эффективного альбедо) с регуляторами и без них и аналитический метод расчета реактора с альбедными граничными условиями.

Реактор для простоты считается бесконечным по оси. Конечность по высоте для всех групп учитывается как дополнительное поглощение в каждой группе нейтронов, характеризуемое увеличением сечения поглощения на величину $D_i\left(\frac{\pi}{H_{\text{эфф}}}\right)^2$.

Многогрупповое уравнение диффузии для активной зоны одномерного цилиндрического реактора имеет вид

$$\Delta\mathbf{\Phi}(r)+\hat{\varkappa}\mathbf{\Phi}(r)=0, \qquad (1)$$

где $\mathbf{\Phi}(r)$ — вектор потока; $\hat{\varkappa}$ — матрица переходов.

На границе активной зоны с отражателем должны выполняться условия

$$\mathbf{J}^{-}(R_{\text{а. з}})=\hat{\beta}\mathbf{J}^{+}(R_{\text{а. з}}), \qquad (2)$$

где

$$\mathbf{J}^{\pm}(r)=\frac{\mathbf{\Phi}(r)}{4}\mp\frac{\hat{D}}{2}\nabla\mathbf{\Phi}(r); \qquad (3)$$

$\hat{\beta}$ — эффективная альбедная матрица. Нетрудно показать [1], что решение уравнения (1) для активной зоны с граничными условиями (2) может быть записано в виде функции Бесселя от матричного аргумента, в разложении которой в ряд Тейлора присутствуют только целые степени матрицы

$$\mathbf{\Phi}(r)=J_0\left(\sqrt{\hat{\varkappa}}r\right)\mathbf{A}, \qquad (4)$$

где $\mathbf{A}$ — неизвестный вектор.

Подставим выражение (4) в (2), получим

$$\hat{L}\mathbf{A}=0, \qquad (5)$$

где $\hat{L}$ — квадратичная матрица n-го порядка; n — число групп. Условием критичности является равенство нулю определителя матрицы $\hat{L}$. Уравнение (1) после преобразования его и граничных условий (2) может быть также решено к конечно-разностному виду методом разностной факторизации [2].

Для определения эффективной альбедной матрицы рассмотрим цилиндрический радиальный отражатель, в котором расположена система регулирования. Предположим, что регуляторы образуют периодическую решетку с шагом $T=R_0\alpha$, в которой $\alpha=\frac{2\pi}{n_0}$, где n_0 — количество регуляторов; R_0 — радиус расположения центров регуляторов. Вследствие этого достаточно рассмотреть часть отражателя в виде сектора с центральным углом α (см. рисунок). Граничные условия между секторами находятся из условия периодичности решения.

Определим элементы эффективной альбедной матрицы β_{km} как отношение числа нейтронов, прошедших внутреннюю границу S_1 в отрицательном направлении по радиусу в группе m, к числу нейтронов, пересекающих эту границу в положительном направлении в группе k. При расчете альбедо отражателя для каждой группы нейтронов предполагается, что на внутреннюю поверхность S_1 сектора падает равномерно распределенный по поверхности поток нейтронов с косинусоидальным угловым распределением.

Расчеты показали, что для большинства отражателей из материалов, являющихся хорошими рассеивателями, изменение углового распределения нейтронов (например, косинусоидального на изотропное) мало влияет на альбедную матрицу. Так как влияние регуляторов обычно мало, то в этом случае целесообразно применять метод корреляций.

Метод корреляций для данной задачи состоит в одновременном нахождении по одним и тем же траекториям (или по серии траекторий, рассчитываемых одновременно с использованием одних и тех же случайных чисел) альбедной матрицы сплошного отражателя и отражателя с регуляторами, находящихся в различных положениях и имеющих различную степень черноты поглотителя. Особенно целесообразно применение метода корреляций, когда сечение рассеяния нейтронов в области, занимаемой поглотителем, близко к сечению рассеяния в материале отражателя. В этом случае при пересечении траектории с поглотителем достаточно изменить статистический вес нейтрона на величину $w=e^{-\Sigma_c l}$, где l — путь нейтрона в поглотителе.

Если поглотитель тонкий и радиус регулятора не слишком мал, то геометрическая толщина поглоти-

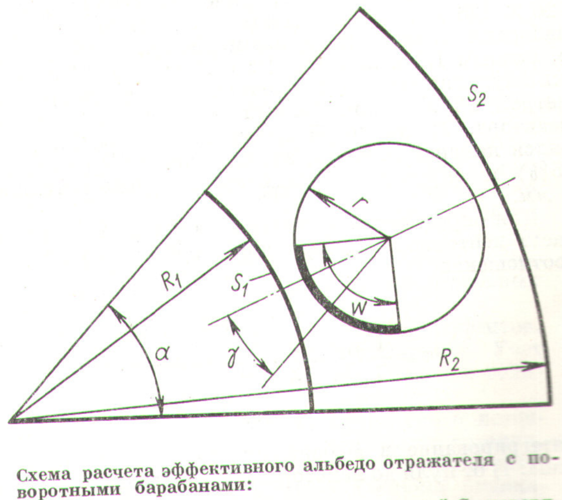


Схема расчета эффективного альбедо отражателя с поворотными барабанами:

R_1, R_2 — радиусы внутренней S_1 и внешней S_2 поверхности отражателя соответственно; r — радиус регулировочного барабана; α — центральный угол сектора; w — угол поглотителя; γ — угол поворота барабана.

теля может быть принята равной нулю, а изменение статистического веса учтено по оптическому пути, который проходит нейтрон в поглотителе: $w = e^{-d}$, где d — оптический путь. Величина d подсчитывается при каждом пересечении траектории с поглотителем или с хорошей точностью принимается равной

$$d = \frac{4V}{S}\Sigma_a.$$

Для нахождения по методу корреляций эффекта, вносимого регуляторами с рассеивающими свойствами, которые отличаются от свойств отражателя, необходимо рассчитать серию траекторий.

Практические расчеты на ЭВМ показали, что время, необходимое для расчета тысячи историй с началом в одной из групп для бериллиевого отражателя различной толщины q, составляет: $t = 2{,}5$ *мин* для $q = 10$ *см*; $t = 5$ *мин* для $q = 20$ *см*; $t = 7{,}5$ *мин* для $q = 30$ *см*. При расчете многогрупповой матрицы время увеличивается пропорционально числу групп.

Как показало сравнение результатов, полученных по описанной методике, с результатами аналитических расчетов для системы поглощающих стержней в отражателе, точность 10—15% от $\Delta k_{эфф}$ достигается уже после прослеживания одной-двух тысяч историй для каждой группы. Влияние регуляторов на изменение спектра реактора учитывается автоматически при решении диффузионного уравнения для активной зоны.

Практика расчетов показала, что применение коррелированного расчета альбедным методом позволяет исследовать эффекты до величины, равной 0,1% реактивности.

В заключение автор выражает благодарность Е. С. Глушкову, принимавшему участие в постановке задачи, за ценные советы.

Поступило в Редакцию 20/II 1967 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Б. Шихов, В. И. Давыдов, Л. К. Шишков. В сб. «Инженерно-физические вопросы ядерных реакторов». М., Атомиздат, 1966, стр. 67.
2. Г. И. Марчук. «Методы расчета ядерных реакторов». М., Атомиздат, 1961.

Влияние пустых каналов на длину замедления нейтронов

И. С. ГРИГОРЬЕВ

УДК 621.039.512.42

Теория диффузии в гетерогенных средах неоднократно проверялась экспериментально [1—3]. Представляет интерес выяснить основные закономерности влияния гетерогенной структуры замедлителя на длину замедления нейтронов.

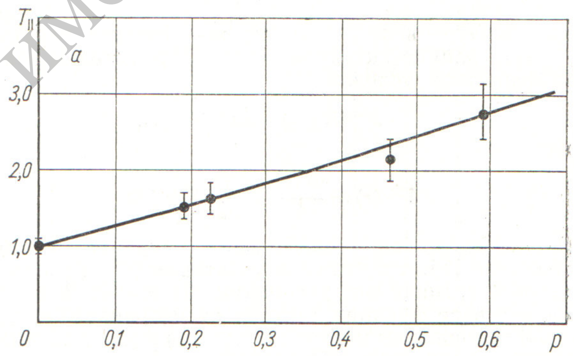
В настоящей работе было проведено экспериментальное измерение относительного влияния решетки пустых цилиндрических каналов на длину замедления нейтронов в воде. Вода в качестве замедлителя была выбрана из тех соображений, что ожидаемый эффект для нее достаточно велик, поскольку зависимость средней длины свободного пробега нейтронов в воде от их энергии более существенна, чем для графита или бериллия.

Возраст нейтронов измерялся в призме размером 126 × 126 × 126 *см*. Решетки образовывались двумя наборами тонкостенных алюминиевых труб радиусом ρ, равным 1,2 и 2,15 *см*. Источником нейтронов служил мультипликатор из блочков природного урана диаметром 22 *мм*, помещенный на тепловую колонну реактора. Надтепловой поток нейтронов $\Phi(x)$ измерялся камерой деления, заполненной U^{235} (обогащение 75%) и окруженной кадмиевым экраном толщиной 1 *мм*.

Для определения экспериментального значения возраста нейтронов в гетерогенной среде использовалось соотношение

$$\tau = \frac{1}{2}\overline{R^2} = \frac{1}{2}\cdot\frac{\int\limits_0^\infty x^2\Phi(x)\,dx}{\int\limits_0^\infty \Phi(x)\,dx}. \quad (1)$$

Интегрирование в выражении (1) проводилось в два этапа: 1) от нуля до некоторого x_0 — численно по экспе-



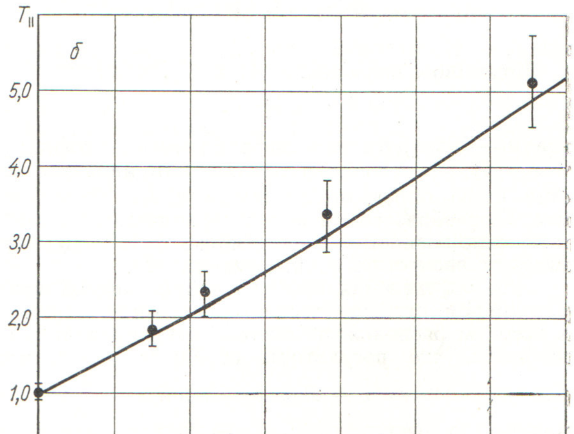


Рис. 1. Значения факторов $T_{\|}$ (p) при ρ: *а* — 1,2 *см*; *б* — 2,15 *см*.