

УДК 621.039.51

ФИЗИКА

И. Н. Айрапетян, Г. Г. Арутюнян, В. П. Афанасьев, А. В. Овсепян

Расчет состояний активной зоны ВВЭР с автоматическим выбором распределения кассет

(Представлено академиком В. А. Амбарцумяном 5/VII 1977)

Работа посвящена разработке метода расчета варианта оптимальной загрузки активной зоны реактора, который был бы прост и мог бы быть рекомендован для использования в автоматизированной системе управления работой реактора. Для водо-водяных реакторов существует комплекс программ, позволяющих рассчитывать возможные состояния активной зоны с достаточной для эксплуатации точностью. Эти программы, обеспечивая достаточную точность, имеют очень большой объем и осуществимы на самых больших ЭВМ.

Первым этапом работы было создание программы расчета режима активной зоны, предназначенной для малой ЭВМ.

Нами создана программа расчета активной зоны на базе существующей стандартной программы для водо-водяных реакторов (¹). Была использована та же физическая модель и те же математические методы, однако, благодаря несколько иной реализации и уменьшению объема производимых вычислений, достигнута возможность расчета режима активной зоны на машинах семейства «Наири» — одних из самых малых отечественных ЭВМ. Программа позволяет рассчитывать поле нейтронов и энерговыделения для определенной загрузки реактора и следить за их изменениями в процессе выгорания. Входные данные те же, что и в (¹). Расчет поля нейтронов осуществляется решением одногруппового дифференциального уравнения:

$$\nabla^2 \Phi(x, y, z) + \kappa^2 \Phi(x, y, z) = 0, \quad (1)$$

где Φ — поток нейтронов, κ — материальная характеристика активной зоны.

Уравнение (1) решается методом сеток, подробная схема решения дана в (¹⁻⁴).

При расчете выгорания топлива учитывается изменение изотопного состава, отравление реактора ксеноном и самарием, а также влияние изменения мощности и локальной температуры на размножающие

свойства среды. Регулирование реактора допускается как поглощающими кассетами, так и растворенным поглотителем.

Программа требует сравнительно небольшой объем оперативной памяти машины ~ 7500 ячеек, а на машинах с меньшим объемом оперативной памяти (до 2000 ячеек) она может быть реализована при наличии одного внешнего магнитного накопителя. Контрольные расчеты, сделанные по данной программе на машине «Напри-2» показали совпадение результатов с расчетами, сделанными по программе (1).

Расчет активной зоны реализован 4-мя этапами.

I этап—внутренние итерации, где решается система алгебраических уравнений, полученных из конечно-разностной схемы решения уравнения (1), причем число уравнений порядка 1000.

II этап содержит анализ окончания решения системы уравнений, вычисление параметров, ускоряющих сходимость итерационного процесса, а в случае стыковки этой программы с другими управляющими программами, также выдачу промежуточных результатов.

III этап—правка коэффициентов размножения среды и пересчета источника нейтронов.

IV этап—анализ окончания расчетов, обработка и выдача результатов.

Следует отметить, что применение малой ЭВМ приводит к большому расчетному времени, однако, целью настоящей программы в системе управления не является постоянная имитация состояний активной зоны реактора, а лишь контроль отдельных состояний в процессе управления.

Одним из путей повышения надежности работы ядерных реакторов, а также увеличения безаварийной длительности кампании является выравнивание энерговыделения по активной зоне.

Основным способом выравнивания энерговыделения является загрузка реактора кассетами разного обогащения.

Таким образом, возникает задача нахождения расположения кассет разного обогащения по активной зоне, обеспечивающего возможно большую равномерность энерговыделения в течение всей кампании выгорания топлива.

При перегрузке реактора, когда размножающие характеристики уже использованных кассет отличаются друг от друга, число возможных вариантов расположения сильно увеличивается по сравнению с начальным состоянием, когда число разных типов кассет порядка 3-х и 4-х. Расположение кассет выбирается по различным физическим и геометрическим соображениям, которое затем уточняется с помощью контрольных расчетов всей кампании. Естественно, такой способ нахождения расположения кассет не пригоден для автоматической системы, поэтому была поставлена задача создать алгоритм выбора расположения кассет, отвечающий поставленным условиям лучшим образом.

Трудность выбора лучшего варианта расположения заключается в том, что геометрия активной зоны довольно сложна из-за наличия

поглотителей и ломаной границы, что исключает соображения симметрии. Число кассет при этом достаточно велико, и исключает возможность применения метода простого перебора различных вариантов расположения.

Вопросы оптимальной загрузки реактора рассматривались в работах (3,4), где для различных одномерных случаев (бесконечный цилиндр, круг) получены законы распределения размножающих свойств, удовлетворяющие различным условиям. По аналогии с результатами этих работ можно заключить, что при наличии технических ограничений, кривая размножающих свойств $K_{\infty}(r)$ для конечного цилиндрического реактора должна иметь вид, показанный на рис. 1, где закон изменения кривой на участке $O-R'$, а также значение R' для разных конструкций будут разные. Для каждого конкретного гетерогенного реактора с учетом особенностей конструкции активной зоны, приближенной закономерности изменения $K_{\infty}(r)$ по r и технических ограни-

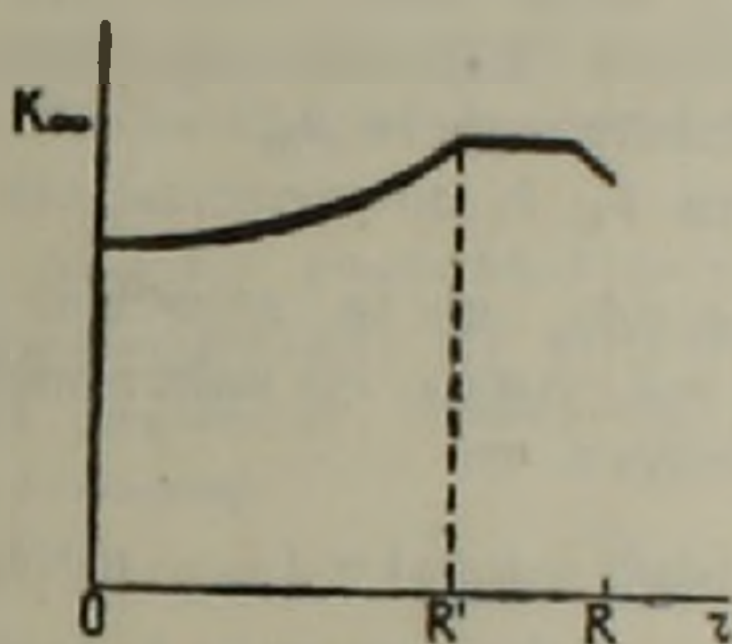


Рис. 1. Качественная кривая изменения величины коэффициента размножения K_{∞} в зависимости от расстояния r от центра реактора

чений можно подобрать такие обогащения кассет, при которых поле энерговыделения наиболее равномерное. Таким образом, в каждом отдельном случае перегрузки реактора, задачу можно свести к нахождению такого расположения имеющихся кассет, при котором обеспечится наибольшее приближение к имеющемуся для данного реактора лучшему полю распределения размножающих свойств.

Пусть задана матрица A , соответствующая лучшему полю K_m . Требуется из имеющихся элементов b построить такую матрицу, B , которая лучшим образом соответствует матрице A , в смысле минимума суммы квадратов отклонений соответствующих элементов матриц

$$\min S = \min \sum_{i,k} (b_{ik} - a_{ik})^2. \quad (2)$$

Составим из элементов a_{ik} монотонную последовательность a_m .

Расположим элементы матрицы B также монотонно, приведя две монотонные последовательности a_m и b_m в соответствие, получим то расположение элементов, при котором матрица B будет максимально приближена к A в смысле (2).

Для доказательства достаточно показать, что при любой перестановке элементов последовательности сумма квадратов отклонений $b_m - a_m$ увеличивается. Запишем

$$S = \sum_m (b_m^2 + a_m^2) - 2 \sum_m b_m a_m \quad (3)$$

Учитывая, что

$$\sum_m (b_m^2 + a_m^2) = \text{const} \quad (4)$$

условие минимальности S сведется к требованию максимальности

$$\sum_m b_m a_m, \text{ т. к. } a_m > 0 \text{ и } b_m > 0.$$

Покажем, что максимум $\sum a_m b_m$ имеет место для монотонной последовательности b_m . Рассмотрим перестановку любой пары элементов b_k, b_l монотонной последовательности b_m .

Вклад пары элементов b_k, b_l до перестановки в $\sum a_m b_m$ описывается выражением $a_k b_k + a_l b_l$, после перестановки элементов b_k и b_l вместо этого получим $a_k b_l + a_l b_k$. Из монотонности последовательностей a_m и b_m сразу следует, что

$$(a_k b_k + a_l b_l) - (a_k b_l + a_l b_k) = (a_k - a_l)(b_k - b_l) \geq 0,$$

т. е. после перестановки любой пары элементов b_k и b_l сумма $\sum_{m=1}^N a_m b_m$ уменьшается и S возрастает. Аналогичное можно показать

для перестановок с участием любого числа элементов. Таким образом, располагая элементы b_m матрицы так, чтобы элемент b_m занимал бы то же место в матрице B , что и элемент a_m в матрице A , мы получим матрицу B близкую к матрице A , в смысле (2). При расположении топлива по активной зоне важно обеспечить не столько минимум суммы квадратов отклонений от идеального варианта по всей активной зоне, сколько минимум наибольшего локального отклонения от идеального варианта, поскольку именно в точке наибольшего локального отклонения можно ожидать нарушения технологических условий в процессе работы. Из вышеприведенного доказательства видно, что одновременно с минимумом суммы квадратов отклонений всегда имеет место и минимум наибольшего локального отклонения.

По приведенному алгоритму создана программа для автоматического расчета расположения кассет водо-водяного реактора. При заданном наборе кассет машина автоматически располагает их лучшим образом и по программе расчета поля нейтронов считает контрольную

неравномерность энерговыделения. Сравнение со стандартным распределением, применяемым в водо-водяных реакторах для начальной загрузки тремя типами кассет показало, что алгоритм автоматического расположения обеспечивает хорошую равномерность энерговыделения.

Предлагаемый алгоритм в сочетании с программой расчета состояния активной зоны может быть применен для автоматической загрузки и перегрузки реактора при заданном наборе кассет.

Ереванский государственный университет
Арм. НИОАЭ

Ի. Ն. ՀԱՅՐԱՊԵՏՅԱՆ, Գ. Հ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ, Վ. Պ. ԱՅԱՆԱՍԵՎ, Ա. Վ. ՀՈՎՍԵՓՅԱՆ

Ջրա-ջրային էներգետիկ ունակությունների ակտիվ զոնայի վիճակի հաշվարկը
կասետների ավտոմատ ընտրությամբ

Ստեղծված է ջրա-ջրային ունակությունների ակտիվ զոնայի վիճակի հաշվարկի ծրագիրը, որը նախատեսված է փոքր էլեկտրոնային հաշվիչ մեքենաների համար:

Առաջարկված է վառելիքի կասետների կամայական հավաքածուի ակտիվ զոնայով բաշխման ալգորիթմ, որի դեպքում ապահովվում է նախապես դրված սլայմանների լավագույն մոտեցումը բառակուսային շեղումների դոմարի մինիմումի իմաստով:

ЛИТЕРАТУРА — ԳՐԱԿԱՆՔԻ ԹՅՈՒՆ

¹ Препринт ИАЭ им. Курчатова № 2093, 1971. ² Л. В. Канторович и В. И. Крылов. Приближенные методы высшего анализа, Гостехиздат, М., 1952. ³ В. Вазон и Дм. Форсайт, Разностные методы решения дифференциальных уравнений в частных производных, ИЛ, М., 1963. ⁴ Г. И. Марчук. Методы вычислительной математики, Наука, Новосибирск, 1973. ⁵ А. П. Рудик, Оптимальное расположение ядерного горючего в реакторе, Атомиздат, М., 1974. ⁶ А. П. Рудик, Ядерные реакторы и принцип максимума Понтрягина, Атомиздат, М., 1971.