

Физика

А. В. ОВСЕПЯН, И. Н. АИРАПЕТЯН

РАСЧЕТ ВЫГОРАНИЯ ВОДОВОДЯНЫХ  
 ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ НА МАЛОЙ ЭВМ

Работа посвящена расчету выгорания ядерного энергетического реактора на малой ЭВМ. С целью уменьшения объема вычислений применен анализ критичности состояния по выполнению стандартных требований, налагаемых на поток нейтронов. Для ускорения поиска критичности построен функционал, позволяющий сразу очень близко подойти к критическому состоянию.

Существующие точные методы и программы расчета состояний активной зоны энергетических ядерных реакторов позволяют производить самые разнообразные вычисления как при их проектировании, так и при эксплуатации. Однако большинство этих программ реализуется на самых больших ЭВМ и с точки зрения оперативности мало удобны.

В данной работе сделана попытка получить достаточное приближение к реальному состоянию активной зоны путем расчетов на малых ЭВМ. Использование малой машины накладывает определенные ограничения на применяемую математическую модель и методы расчетов [1, 2].

Для водородных цилиндрических энергетических реакторов существует хорошо разработанная модель одногруппового расчета состояния [3]. Взяв за основу эту модель (константы) и приняв реактор цилиндрически симметричным, а также предполагая, что свойства вещества усреднены по высоте реактора, можем прийти к системе конечно-разностных уравнений, записанных в диффузионном приближении

$$R_{i-1} \left( \frac{1}{\Delta r^2} + \frac{1}{2r\Delta r} \right) + R_i \left( k_i - \beta^2 - \frac{2}{\Delta r^2} \right) + R_{i+1} \left( \frac{1}{\Delta r^2} - \frac{1}{2\Delta r r} \right) = 0, \quad (1)$$

где  $R$  — радиальная часть потока нейтронов  $\phi(r, z) = R(r)Z(z)$ ,  
 $\Delta r$  — радиальный шаг конечно-разностной сетки,  $k_i(r)$  — коэффициент размножения бесконечной решетки  $k_\infty$  в точке  $r_i$ ,

$i$  — номер цилиндрического слоя, а  $\beta^2 = 1 + \alpha^2 M^2$ , где  $\alpha = \frac{\pi}{\tilde{H}}$ ,

$\tilde{H}$  — экстраполированная высота,  $M^2$  — площадь миграции.

Для граничного слоя

$$R_1 \left[ A \left( \frac{1}{\Delta r^2} - \frac{1}{2r\Delta r} \right) + \left( k_1 - \beta^2 - \frac{2}{\Delta r^2} \right) \right] + R_2 \left( \frac{1}{\Delta r^2} - \frac{1}{2r\Delta r} \right) = 0, \quad (2)$$

где  $A = \frac{2d - \Delta r}{2d + \Delta r}$ , если последняя точка разбиения на цилиндрические

слои попадает на границу реактора; и  $A = \frac{d - \Delta r}{d}$ , если эта точка

попадает на расстояние  $\Delta r/2$  от границы реактора,  $d$  — длина экстраполяции на границе. Центральная  $N$ -ая точка должна удовлетворять условию симметрии радиальной части потока.

С целью уменьшения объема вычислений в отличие от [3] применен анализ критичности по выполнению всех стандартных условий, налагаемых на поток нейтронов. Так, если поток всюду положителен, а на границе удовлетворяет поставленному условию, то условие симметрии в центре будет критерием критичности.

Приняв значение  $R_N$  в центре за 1, получим неоднородную систему  $(N-1)$  уравнений с  $(N-1)$  неизвестным, где не использовано условие симметрии в центре. Решая эту систему, из условия симметрии в центре вычисляем теперь  $R_N$ :

$$R_N = - \frac{R_{N-1} \frac{4}{\Delta r^2}}{K_N - \beta^2 - \frac{4}{\Delta r^2}}. \quad (3)$$

Если это значение с заданной точностью равно предположенной заранее 1, то состояние критическое; если оно  $> 1$  или если среди  $R_i$  есть отрицательные, то реактор надкритичен; если  $R_N < 1$  и все  $R_i > 0$ , то реактор подкритичен.

Для облегчения поиска критичности применено условие постоянства следующего функционала:

$$\sum_{i=1}^N k_i S_i = \text{const}, \quad (4)$$

где  $S_i$  — площадь  $i$ -ого кольца с веществом, имеющим коэффициент размножения  $k_i$ . Это условие по существу есть условие постоянства мощности реактора, где все потоки приняты равными единице. Это сделано по той причине, что в процессе поиска получаются как положительные, так и отрицательные значения потока, и применение точного условия невозможно. Применение приближенного условия возможно по той причине, что потоки заранее нормированы ( $R_N = 1$ ). Поэтому же для решения системы линейных уравнений можно применять итерационные схемы.

Поиск критичности ведется умножением константы в условии (4) (т. е. всех  $k_i$ ) на множитель, который описывает регулирование борным поглотителем. После нахождения критического состояния, как и в [3], производится правка коэффициентов размножения  $k_i$ , где учитываются мощностной эффект, зашлаковывание, отравления самарием и ксеноном.

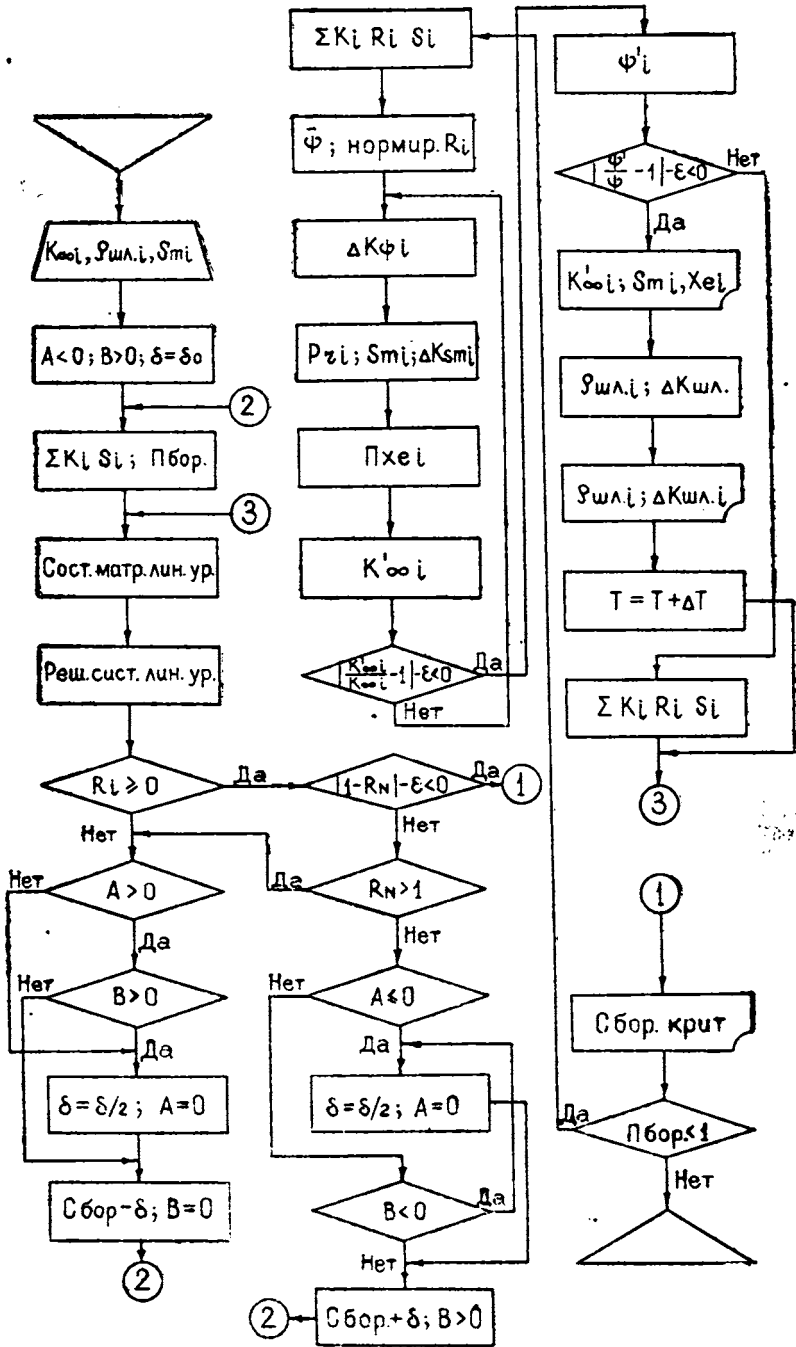


Рис. 1. Блок-схема программы расчета выгорания:  $K_{\infty i}$  — коэффициент размножения  $i$ -ого цилиндрического слоя;  $\rho_{шл}$  — плотность шлаков в цилиндрическом слое;  $S_{mi}$  — концентрация ядер самария в слое;  $A$  и  $B$  — счетчики-признаки;  $\delta$  — шаг изменения концентрации борного поглотителя  $C_{бор}$ ;  $P_{бор}$ ,  $P_{хе}$  — множители для  $K_{\infty}$ , учитывающие влияния бора и ксепона;  $\Delta K_{шл}$ ,  $\Delta K_{sm}$ ,  $\Delta K_{\phi}$  — поправочные слагаемые к  $K_{\infty}$ , обусловленные шлаками, самарием и мощностным эффектом;  $\phi$  — энерговыделение.

Подробно схема расчета приведена на рис. 1. Следует отметить, что после блока правки коэффициентов при новом поиске критичности вместо условия (4) можно применить более точное условие

$$\sum k_i R_i S_i = \text{const}, \quad (5)$$

т. к. потоки  $R_i$  уже все положительны. Численные расчеты показали, что применение указанного способа анализа и поиска критичности значительно сокращает число расчетных циклов и позволяет на малой ЭВМ получить быстрый расчет выгорания. Кроме выгорания, определяются коэффициент неравномерности, количество шлаков и концентрация борного поглотителя.

По этой программе с небольшими изменениями можно решать также задачу нахождения обогащений цилиндрических слоев, удовлетворяющих заранее поставленным условиям. Так, если задаются определенные коэффициенты неравномерности энерговыделений между цилиндрическими слоями, то можно определить те начальные  $k_i$ , которые смогут обеспечить заданные значения коэффициентов неравномерности. Для этого применяется теория возмущений. Сначала решается задача с заданным распределением  $k_i$ , затем ищутся такие поправки  $\delta_i$  к  $k_i$ , при которых энерговыделение

$$\psi_i = (k_{\infty i} + \delta_i)(R_i + \theta_i) \approx k_i R_i + k_i \theta_i + \delta_i R_i$$

было бы равно заданному значению, где  $\theta_i$  — добавка к невозмущенному решению  $R_i$ . Применение теории возмущений позволяет линеаризовать уравнения и применять ту же схему расчетов.

Поскольку в блоке правки коэффициентов размножения отдельно получаются все поправочные члены, то после нахождения критического состояния можно найти те начальные  $k_i$ , которые обеспечивают заданные коэффициенты неравномерности.

По блок-схеме рис. 1 создана программа для расчета выгорания ВВЭР-440 для машины «Наири-2». Сопоставления с расчетами по [3] показали, что сделанные приближения позволяют с достаточной точностью производить расчеты и программу можно рекомендовать для оперативных расчетов в процессе эксплуатации на АЭС.

Авторы благодарят проф. Ю. Л. Вартаняна, а также сотрудников кафедры за полезные обсуждения.

*Кафедра ядерной физики*

*Поступила 13.07.1977*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вазов В., Форсайт Дж., Разностные методы решения дифференциальных уравнений в частных производных, изд. ИЛ, 1963.
2. Шишков Л. К., Методы решения диффузионных уравнений двумерного ядерного реактора, М., 1976.
3. Препринт ИАЭ — 2093, М., 1971.

Ա. Վ. ՀՈՎՍԵՓՅԱՆ, Ի. Ն. ՀԱՅՐԱՊԵՏՅԱՆ

**ԳԼԱՆԱՅԻՆ ՌԵԱԿՏՈՐՆԵՐԻ ՎԱՌԵԼԻՔԻ ԱՅՐՄԱՆ ՀԱՇՎԱՐԿԸ  
ՓՈՔՐ ԷՀՄ-ՈՎ**

**Ա մ փ ո փ ու մ**

*Առաջարկված է գլանային ռեակտորների վառելիքի այրման հաշվարկի սխեմա, որը իրագործվել է փոքր էՀՄ-ով:*

*Կրիտիկականության որոշման համար օգտագործված է այնպիսի մեթոդ, որը թույլ է տալիս զգալիորեն կրճատել հաշվարկային ժամանակը: Մեթոդը կարելի է կիրառել օպերատիվ հաշվարկների և մոդելավորման համար:*