

**Физика**

УДК 621.039

А. Г. ГАЛСТЯН, А. В. ОВСЕПЯН, В. В. ПАПОЯН

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПОЛЯ НЕЙТРОНОВ С УЧЕТОМ  
ПОКАЗАНИЙ ДАТЧИКОВ ВНУТРИРЕАКТОРНОГО  
КОНТРОЛЯ**

Разработан метод восстановления полей энерговыделений по объему реактора с учетом дополнительных данных. Рассчитаны состояния активной зоны при различных нормировках показаний детекторов.

**Введение.** Процесс выгорания топлива в реакторах типа ВВЭР-440 рассчитывается по программе БИПР-5 [1], которая является модельной, т. е. не использует никаких конкретных данных, относящихся к данному моменту работы реактора.

Вследствие модельности, сколь бы хорошо ни была привязана программа к начальному состоянию кампании, в процессе работы должны возникнуть существенные расхождения между реальным состоянием реактора и расчетом.

Стыковка модельной программы с системой внутриреакторного контроля (ВК) позволяет иметь более точное представление о реальном состоянии реактора в данный момент.

Модель со стыковкой должна рассчитывать состояние реактора от начала загрузки до текущего момента с использованием данных ВК в течение всего периода.

Ввиду неполного описания реальной картины полей датчиками контроля можно ставить задачу только корректирования модели по показаниям датчиков. Здесь возникают два типа задач: 1—построение скорректированного поля, 2—определение границ возможных отклонений полей от модельных при заданных показаниях датчиков ВК.

Первая из двух задач сводится к уточнению модели и позволяет приблизить расчеты к действительности. Вторая задача относится к определению границ возможных значений коэффициентов неравномерности и допустимых значений энерговыделения в каждом конкретном состоянии.

Программы восстановления поля могут быть стыкованы с модельной программой (например, БИПР-5), могут также быть самостоятельными и служить элементом внутриреакторного контроля.

1. **Расчет поля нейтронов решением неоднородной системы уравнений.** В [2] описан один из методов восстановления полей энерговыделений с использованием показаний зонных детекторов в ВВЭР-440. Суть метода заключается в расчете поля нейтронов в диффузионном приближении с учетом показаний детекторов в качестве граничных усло-

вий в точках пространственного расположения детекторов в активной зоне реактора. Основное затруднение такого метода решения заключается в неоднородности системы линейных уравнений, получаемых при переходе в диффузионном уравнении к конечно-разностной форме. В [2] приведен итерационный метод решения системы, не зависящий от начального приближения в итерационном цикле. Обычно при решении неоднородных уравнений задаются по возможности более близкими к решению начальными значениями неизвестных с целью обеспечения нормировки решения и ускорения итерационного процесса. Однако само нахождение нулевого приближения представляется довольно трудным.

Метод, описанный в [2], свободен от этого недостатка, однако требует малости детерминанта матрицы системы по сравнению с единицей.

Проверка выполнения этого условия также является не простой процедурой, т. к. ранг матрицы порядка  $10 \times$  число кассет. Однако проверка вышеуказанного условия вовсе не обязательна, т. к. сходимость решения уже является признаком выполнения условия малости детерминанта.

Для решения системы неоднородных уравнений вычисляется следующая последовательность:

$$\varphi = (1 + \hat{A}' + \hat{A}'^2 + \hat{A}'^3 + \dots) \mathbf{b}, \quad (1.1)$$

где  $\hat{A}' = 1 - \hat{A}$ ,  $\hat{A}$  — матрица неоднородной системы,

$$\hat{A} \varphi = \mathbf{b}, \quad (1.2)$$

$\mathbf{b}$  — вектор, составленный из нулей и граничных условий.

Конкретный вид матрицы  $\hat{A}$  получается из диффузионного уравнения

$$\nabla^2 \varphi + \chi^2 \varphi = 0. \quad (1.3)$$

Конечно-разностная форма этого уравнения в треугольной сетке будет

$$\varphi_0 + \alpha \left[ \frac{2}{3h^2} \sum_{i=1}^6 \varphi_i + \frac{1}{h_z^2} (\varphi_7 + \varphi_8) + \beta \right], \quad (1.4)$$

где

$$\alpha = M^2 h^2 h_z^2 / (2(2h_z^2 + h^2)), \quad \beta = \frac{(k_{\infty} / k_0 \varphi - 1) \varphi_0}{M^2}.$$

$h$  — шаг треугольной сетки;  $h_z$  — шаг в вертикальной плоскости;  $M^2$  — площадь миграции (см. [2]).

В граничных точках вводятся фиктивные поля:

$$\varphi_{\text{фкт.}} = \frac{2d - h}{2d + h} \varphi_0. \quad (1.5)$$

В точках, где в качестве  $\varphi$  берется показание зонного детектора (переработанное соответствующим образом), уравнения не записываются. Значения этих точек фигурируют в правых частях соседних точек.

Матрица  $\hat{A}$  имеет блочную структуру, обусловленную геометрией активной зоны и разбиением ее для применения сеточного метода. При перемножении матрицы такая блочность сохраняется, что позволяет существенным образом облегчить алгоритм счета.

Алгоритм счета состоит в следующем:

а) формируется единичная матрица  $\hat{E}$  ранга  $10 \times N$ , где  $N$ —число расчетных узлов;

б) формируется матрица  $\hat{A}$ ;

в) формируется матрица  $\hat{A}' = \hat{E} - \hat{A}$ , при этом обе матрицы сохраняются. Поскольку число элементов матрицы больше  $10^6$ , то матрица  $\hat{E}$  формируется в виде строки из  $10N$  элементов, а  $\hat{A}$  и  $\hat{A}'$  реализуются последовательно в 10 этапов. Так как алгоритм формирования элементов при изменении  $z$ -координаты не меняется, то этим и обусловлены 10 этапов счета (при этом граничные слои рассчитываются отдельно);

г) сложение  $\hat{E} + \hat{A}'$ ;

д) вычисление степени  $\hat{A}'$  (при этом  $\hat{A}'$  сохраняется), суммирование  $\hat{E} + \hat{A}' + \hat{A}'^2 + \dots$ ;

е) после вычислений до  $\hat{A}'^4$  производится умножение:

$$(\hat{E} + \hat{A}' + \hat{A}'^2 + \hat{A}'^3 + \hat{A}'^4) \mathbf{b}.$$

Результат перемножения  $\Phi_4$  сохраняется и сравнивается с результатом  $\Phi_5$ , вычисляемым с учетом  $\hat{A}'^5$ .

Критерием сходимости является  $\Phi_4 \approx \Phi_5$ , т. е. поэлементно проверяется условие

$$\frac{|\Phi_{14} - \Phi_{15}|}{\Phi_{15}} < \epsilon.$$

В случае расходимости последовательности  $\hat{A}' + \dots + \hat{A}'^n$  или медленной сходимости можно произвести перенормировку переменных и умножением строк либо столбцов матрицы  $\hat{A}$  добиться выполнения условия  $\det \hat{A}' \ll 1$ .

Следует отметить, что такая перенормировка производится только один раз, т. к. численные значения элементов матрицы мало отличаются для разных состояний активной зоны.

**2. Восстановление поля нейтронов итерационным методом.** Поскольку решение системы неоднородных уравнений существенно затрудняет решение задачи нахождения поля нейтронов в тех случаях,

когда нарушено условие  $\det \hat{A}' \ll 1$ , то имеет смысл применить традиционный итерационный процесс решения однородной системы уравнений. Основное различие от известного решения конечно-разностных уравнений без заранее заданных известных точек и с известными точками состоит в нормировке полей после итераций. Известные значения

полей не должны подвергаться нормировке, тогда как значения, выработываемые при итерациях, подвергаются нормировочному условию

$$\int S dv = \text{const}, \quad (2.1)$$

где

$$S = (k_{\infty}/k_{\text{эф}} - 1) \varphi(x, y, z) / M^2.$$

Этого затруднения можно избежать, производя отдельную нормировку известных точек и расчетных точек.

Если условие

$$\int_v S dv = B$$

предусматривает интегрирование по всему объему реактора, то взамен необходимо ввести две отдельные нормировки:

$$\int_{v_i} S dv = \sum_{i=1}^{N-M} S_i \Delta V_i = \alpha B \quad (2.2)$$

и

$$\int_{v_r} S dv = \sum_{r=1}^M S_r \Delta V_r = (1 - \alpha) \beta \approx \beta B, \quad (2.3)$$

где  $\alpha$  или  $\beta$  описывает доленое участие в нормировке узлов с известными потоками (показаниями датчиков) и расчетными точками.

Такое отдельное нормирование возможно, поскольку число узлов, в которых известны значения потоков, относительно велико и при разных состояниях активной зоны их доленое участие практически мало меняется.

Для обоснования этого проделаны численные расчеты по известным состояниям активной зоны. Расчеты проделаны по результатам, полученным по программе БИПР-5.

При разных состояниях активной зоны производилась нормировка по мощности реактора точек, где расположены детекторы, и остальных точек отдельно. Усреднением по нескольким состояниям определялось доленое участие узлов, содержащих детекторы, в общей мощности реактора, т. е. определялось значение  $\beta$  и также  $\alpha$ .

Затем с использованием полученных  $\alpha$  и  $\beta$  производилась раздельная нормировка других состояний. Поля сравнивались с полями тех же состояний, полученными тотальной нормировкой. Приведены сравнительные данные этих расчетов.

Средние значения полей по 4 состояниям для 30 узлов:

I—28,77/30; II—30,10/30; III—29,28/30; IV—30,11/30.

Как видно из этих данных, расхождения в значениях полей составляют не более 1%.

3. Анализ возможных восстановлений. Описанные в пп 1—2 методы восстановлений полей нейтронов и энерговыделений в определенной степени сложны и требуют заметного машинного времени. Более простым кажется метод восстановления полей с использованием линейной суперпозиции. Сущность метода заключается в восстановлении локальных отклонений полей от среднего с помощью показаний датчиков и с учетом свойств среды.

Значение поля в искомой точке представляется в виде линейной формы, зависящей от известных значений полей в близлежащих точках и члена, учитывающего зависимость от локальных свойств среды.

$$\varphi_i = \sum_j c_{ij} \varphi_j + S_i. \quad (3.1)$$

Определение коэффициентов  $c_{ij}$  производится решением системы линейных уравнений, полученных из (3.1) для известных состояний, число которых больше количества уравнений. Вид  $S_i$  также линейризуется:

$$S_i = S_0 + S_1 k_i + S_1 k_i^2 + \dots, \quad (3.2)$$

где  $S_0$ —свободный член (фоновый),  $k_i$  описывает локальные размножающие свойства,  $S_1$ —неизвестные коэффициенты.

Общее число известных состояний должно быть равно или больше количества коэффициентов  $c_{ij}$  плюс число  $S_i$ .

Предпосылкой к такому методу восстановления служит то обстоятельство, что картина поля в ВВЭР-440 может быть представлена в виде некоторого фонового значения, на которое накладывается возмущение, вызванное отклонениями, носящими локальный характер.

По определенному количеству известных состояний определяется матрица  $c_{ij}$ —желательно методом Гаусса, т. е. чтобы число известных состояний превышало необходимый минимум. Матрица  $c_{ij}$  составляется один раз и используется для восстановления в различных состояниях.

Положения органов СУЗ, создающие сильные локальные возмущения, также описываются той же матрицей  $c_{ij}$ , для чего в число исходных вариантов, по которым строилась  $c_{ij}$ , необходимо включить такие, в которых имеются различные положения органов СУЗ.

Приведенный метод в сочетании с известным методом расчета выгорания может быть применен для расчета кампании. Основным преимуществом данного метода является возможность быстрого расчета поля отдельно в какой-либо области активной зоны без проведения расчетов по всей зоне, а при использовании только показаний близлежащих детекторов. При расчетах в масштабах всей зоны этот метод не дает существенного выигрыша во времени расчета, однако теряет в степени достоверности, т. к. аппроксимационный принцип, заложенный в нем, может порой приводить к заметным непрогнозируемым отклонениям.

**4. Результаты численных расчетов.** Применен традиционный итерационный процесс решения однородной системы уравнений. Основное различие от известной схемы решения конечно-разностных уравнений заключается в нормировке полей после итераций. В данном случае проводится раздельная нормировка известных точек (места расположения датчиков) и значений потоков, вырабатываемых при итерациях.

Такая отдельная нормировка разумна, т. к. число узлов, в которых известны значения потоков, относительно велико, и при разных состояниях активной зоны их доленое участие практически мало меняется.

Таким образом, используемый алгоритм счета сводится к следующим пунктам:

- а) нормировка полей, полученных по показаниям датчиков;
- б) решение итерационным методом системы уравнений, записанных в точках, кроме тех, в которых известны значения по показаниям датчиков;
- в) пересчет источников во всех точках и уточнение обеих нормировок (корректировка  $K_\infty$ );
- г) нормировка полученных по окончании итераций полей;
- д) внешние итерации обычным образом.

Что касается пункта в), то такой пересчет реализован в програм-

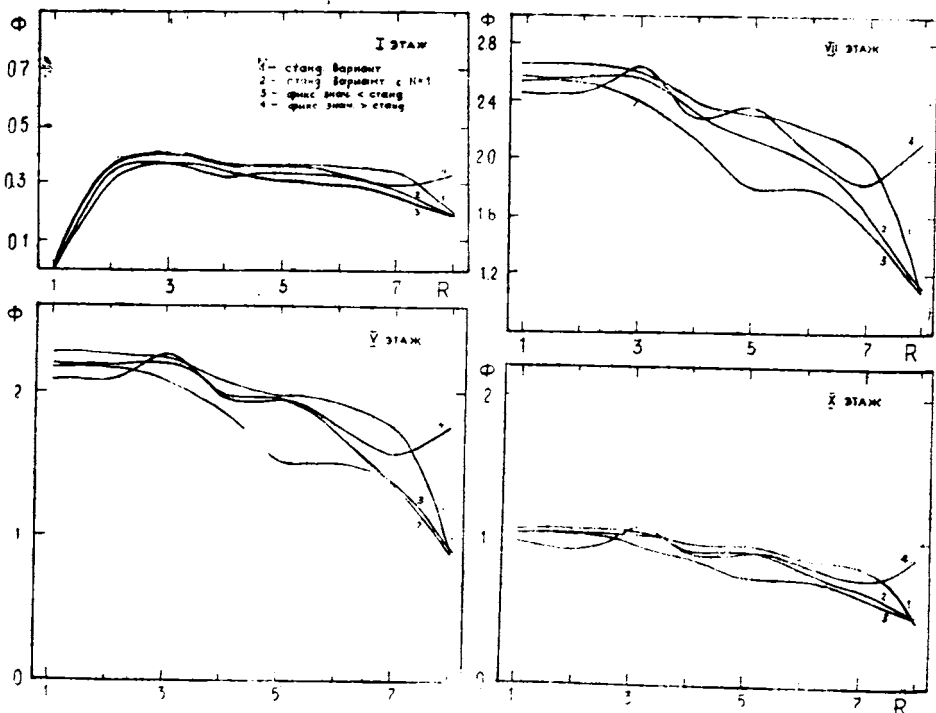
ме БИПР-5, где течение кампании определяется полностью теоретическим путем. При сопровождающих расчетах с использованием показаний зонных детекторов возможно более точное определение свойств среды. Выгорание топлива в кассетах, содержащих датчики, рассчитывается по показаниям датчиков с использованием тех же аппроксимаций, что и в БИПР-5, однако значение потока нейтронов формируется из показаний датчиков. Состояние в данной точке активной зоны определяется набором параметров, которые можно классифицировать по трем типам:

1) измеряемые (показания датчиков)  $I_i$ , 2) рассчитанные в прошлом состоянии  $P_i$  и 3) рассчитываемые в данном состоянии  $R_i$ .

Тогда можно записать, что  $R_i = R_i(R_{j \neq i}, P_i, I_i)$ . В исходном состоянии величины  $P_i = R_i$  и заданная зависимость  $R_i = R_i(R_{j \neq i}, P_i, I_i)$  включают в себя все основные эффекты—зашлаковывание, отравление, регулирование, мощностной эффект и пр. Все эти зависимости известны.

Особенностью в данном случае является введение различий между точками зоны, содержащими датчики и не содержащими их. В точках, содержащих датчики, производится пересчет свойств среды без корректировки значений поля, в остальных же—производится корректировка потока способом, реализуемом в БИПР-5. Расчет выгорания, производимый таким путем, позволяет также определить состояние топливных кассет в конце кампании, т. к. уточнение поля по показаниям датчиков косвенным образом влияет на весь расчет кампании.

Численные расчеты выполнены по известным состояниям активной зоны, при этом использованы результаты, полученные по программе БИПР-5. Вычисления выполнены для четырех случаев (см. рисунок): стандартный расчет по программе БИПР-5 (1-ая кривая); расчет того же состояния активной зоны, что и в первом случае, но с учетом показаний датчиков, расположенных в определенных точках активной зоны. Показания датчиков нормированы на единицу (2-ая кривая); тот же расчет, что и в предыдущем случае, но нормировка показаний



Распределение потока нейтронов по радиусу поперечного сечения активной зоны.

датчиков осуществлена числом, меньшим единицы (3-ая кривая); тот же расчет, что и в предыдущем случае, но с нормировкой на число, большее единицы (4-ая кривая).

Полученные результаты представлены на рисунке, где изображены зависимости потоков нейтронов от расстояния до центра активной зоны на разных уровнях (условно их будем называть этажами).

Как видно из рисунка, на всех этажах наблюдается одна и та же картина. Ближе к центру активной зоны наилучшая нормировка—тотальная (в нашем случае—единица), далее нормировка показаний датчиков должна быть больше единицы.

Значения радиусов, начиная с которых должна применяться вторая нормировка, приведены ниже (для некоторых этажей):

I этаж с  $R=6,0$ ; V этаж с  $R=5,5$ ; VII этаж с  $R=4,25$ ; X этаж с  $R=4,0$ .

Как видно из этих данных, указанные граничные значения радиуса монотонно меняются с высотой активной зоны реактора.

ЕГУ, Арм. филиал ВНИИАЭС

Поступила 24.12.1987

## ЛИТЕРАТУРА

1. Петрунина Д. М., Беляева Е. Д., Киреева И. М. Программа БИПР-5. Препринт ИЯЭ-2519, 1975.
2. Галстян А. Г., Овсепян А. В., Папоян В. В. Метод расчета поля нейтронов в ядерном реакторе с заданной нормировкой потока.—Уч. запис. ЕГУ, 1987, № 3.

## Ա մ փ ո փ ո լ մ

Մշակված է նեյտրոնների դաշտի վերականգնման մեթոդ, որը հաշվի է առնում ներոնակտորային հսկման դետեկտորների ցուցմունքները: Կազմված է ոնակտորի ակտիվ տիրույթի վիճակների հաշվման ծրագիր: Դետեկտորների ցուցմունքների տարբեր նորմավորումների համար հաշիվներ են կատարված:

## SUMMARY

A method of restoration of the neutron field with account of the readings of the interreactor check detector is elaborated. A programme is prepared for computation of the state of the active zone.

Calculations for different normalizations of detector readings are carried out.