

*Физика*

УДК 621.039

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

МЕТОД РАСЧЕТА ПОЛЯ НЕЙТРОНОВ В  
ЯДЕРНОМ РЕАКТОРЕ С ЗАДАНОЙ НОРМИРОВКОЙ  
ПОТОКА

Проводится описание метода использования показаний датчиков внутрореакторного контроля при расчете состояния и процесса выгорания в реакторе типа ВВЭР. Выполнен контрольный расчет для одномерной модели.

Существующие программы расчета состояний и процесса выгорания в ядерном реакторе дают определенное расхождение с реальным процессом, что обусловлено модельностью используемых методов. Для уточнения расчетных моделей можно использовать данные внутрореакторного контроля по ходу эксплуатации реактора. Ограниченность количества этих данных делает невозможным их прямое использование для восстановления поля с требуемой точностью. При этом существует целый ряд трудностей—таких, как калибровка показаний датчиков, надежная степень восстановления, скорость работы метода, масштабы используемой вычислительной техники и др.

Ниже приводится описание метода использования показаний датчиков внутрореакторного контроля при расчете состояния и процесса выгорания в реакторе типа ВВЭР.

Расчет состояния для этих реакторов ведется с помощью программы БИПР-5, которая построена на решении диффузионного уравнения конечно-разностным методом [1].

Идея метода заключается во включении в процесс счета данных реакторного контроля. Число этих данных порядка 300 для одного состояния при числе расчетных узлов 3490 для ВВЭР-440.

Первый этап счета—это расчет потока нейтронов при заданных свойствах среды. Он ведется итерационным методом (внутренние итерации). Конечно-разностная схема БИПР приводит к решению 3490 однородных алгебраических уравнений. Полученные решения используются для корректировки свойств среды, после чего циклически все это повторяется до схождения результатов с необходимой точностью. При этом для корректировки свойств среды каждый раз производится нормировка значений полей по мощности реактора. При учете данных контроля уже в блоке внутренних итераций необходимо заморозить значения потоков в точках контроля на измеряемых значениях. Это приводит к неоднородности системы уравнений, получающейся из конечно-разностной схемы. Система же неоднородных уравнений уже не решается с помощью итерационной схемы, использованной в БИПР. Поэтому необходимо произвести соответствующие изменения в блоке внут-

ренных итераций Кроме того, задание значений потока по показаниям датчиков в нескольких точках уже нормирует полученное решение, и поэтому при пересчете свойств среды во внешних итерациях не следует производить нормировку решений по мощности реактора.

В идеале мощность реактора после окончания всего счета должна соответствовать реальной, однако на деле может возникнуть расхождение, обусловленное, в первую очередь, неточностью калибровки показаний датчиков в контрольных точках, так как решение для всего реактора получится нормированным по этим точкам в силу неоднородности системы решаемых уравнений.

По мощности реактора можно произвести корректировку значений измеряемых потоков в контрольных точках. После такой корректировки весь процесс счета должен повториться, что приведет к третьей итерационной степени: кроме внутренних итераций, внешних итераций, и к пересчету по мощности.

Для решения системы уравнений типа  $\hat{A}x=b$  в блоке внутренних итераций можно применить как итерационный метод, так и метод вычисления обратной матрицы [2—4].

Рассмотрим сначала метод вычисления обратной матрицы.

В силу того, что ранг матрицы  $\sim 3000$ , применение точных методов обращения нецелесообразно. Одним из способов приближенного обращения является построение сходящейся последовательности.

Пусть имеем систему линейных уравнений

$$\hat{A}x=b. \quad (1)$$

Сделаем простые преобразования:

$$\hat{A}^{-1}\hat{A}x=\hat{A}^{-1}b, \quad (2)$$

$$\hat{E}x=\hat{A}^{-1}b \quad (3)$$

или

$$\hat{E}x=(\hat{E}-\hat{A}')^{-1}b, \quad (4)$$

где

$$\hat{A}'=\hat{E}-\hat{A}.$$

Далее,

$$(\hat{E}-\hat{A}')^{-1}\approx(\hat{E}+\hat{A}'+\hat{A}'^2+\dots+\hat{A}'^n) \quad (5)$$

при условии

$$\det\hat{A}'<1 \quad (6)$$

и окончательно

$$x\approx(\hat{E}+\hat{A}'+\hat{A}'^2+\dots+\hat{A}'^n)b. \quad (7)$$

При быстрой сходимости (7), а это зависит от степени условия (6), такой способ решения может себя оправдать, если возможна реализация его в памяти машины. Она затруднена тем, что при числе уз-

лов  $\sim 3490$  (для ВВЭР-440) матрица  $\hat{A}'$  занимает  $> 10^6$  единиц памяти.

Однако нет необходимости хранения матрицы  $\hat{A}'$  в оперативной памяти полностью, можно проводить вычисления элементов  $\hat{A}'^r$  последовательно с помощью одной строки  $\hat{A}'$  и одного столбца  $\hat{A}'^{r-1}$ .

Количество операций можно грубо оценить по степени  $r$ , оно больше

$$(n^2y + n^2c + nc)r, \quad (8)$$

где  $y$ —операция умножения;  $c$ —операция сложения.

Рассмотрим теперь вариант итерационного метода решения системы. Пусть мы имеем приближенное значение  $\hat{A}^{-1*}$  (что можно легко получить вышеуказанным методом), тогда

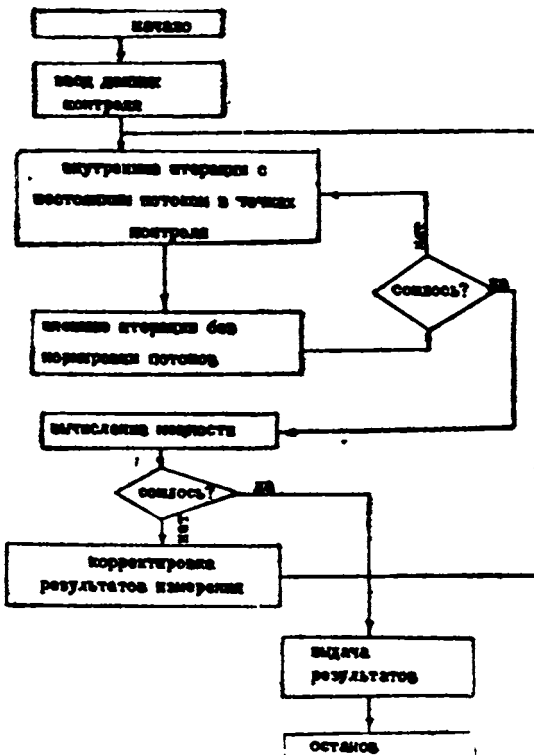
$$\hat{A}^{-1*} \hat{A} x = \hat{A}^{-1*} b, \quad (9)$$

отсюда следует, что

$$(\hat{A}^{-1*} \hat{A} - \hat{E} + \hat{E}) x = \hat{A}^{-1*} b \quad (10)$$

или

$$\hat{c}x + \hat{E}x = \hat{A}^{-1*} b, \quad (11)$$



Блок-схема восстановления потоков нейтронов по показаниям датчиков.

где

$$\hat{C} = (\hat{A}^{-1} * \hat{A} - \hat{E}), \quad (12)$$

и окончательно

$$x^{(q)} = \hat{A}^{-1} * b - \hat{C}x^{(q-1)}, \quad (13)$$

где  $q$  — номер итерации.

Число операций при счете по этой схеме можно оценить как

$$(2n^2y + 3n^2c)г. \quad (14)$$

Как видно из оценок, применение итерационной схемы сокращает объем вычислений, однако при этом увеличивается громоздкость программы, так как требуется также предварительное вычисление обратной матрицы.

С целью увеличения скорости счета целесообразно применение итерационного метода с предварительным вычислением обратной матрицы.

Блок-схема программы расчета состояния реактора с учетом показаний зонных датчиков приведена на рисунке.

По этой схеме проделан контрольный расчет для одномерной модели, для которой имелись также аналитические результаты.

ЕГУ, Арм. филиал ВНИИАЭС

Поступила 4.07.1986

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Петрунин Д. М., Белаева Е. Д., Киреева И. Л. Программа ВИПР-5, Препринт ИАЭ-2519, 1975.
2. Канторович Л. В., Крылов В. И. Приближенные методы высшего анализа. Физматгиз: 1962.
3. Вазов В., Форсайт Д. Разностные методы решения дифференциальных уравнений в частных производных. ИЛ: 1963.
4. Березин И. С., Жидков Н. П. Методы вычислений, т. 1, 2, М.: Наука, 1966.

#### Ա մ փ ո փ ու մ

Բերվում է ՋՋԷԻ տեսակի ռեակտորներում այրման պրոցեսի և վիճակի հաշվարկի համար նախատեսված ներռեակտորային հսկման տվիչների ցուցմունքների օգտագործման մեթոդի նկարագրությունը:

Միաչափ մոդելի համար կատարված է փորձնական հաշվարկ:

#### Summary

The method of using of counter readings for control inside the reactor at state calculation and at burning process in the VVER type reactor is described.

Control calculation has been carried out for one-dimensional model.