



ИТЭФ — 34

ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

В.М.МАЛОФЕЕВ

АЛГОРИТМ И ПРОГРАММЫ  
ТРЕХМЕРНОГО РАСЧЕТА  
ГЕТЕРОГЕННОГО РЕАКТОРА  
(ПРОГРАММЫ TREC И TREC 6)

МОСКВА 1985

УДК 681.142.5:621.039.5

M-16

© Институт теоретической и экспериментальной физики, 1985

1. Название программ: TREC, TREC6

2. ЭВМ: БЭСМ-6

3. Постановка задачи. В рамках теории гетерогенного реактора проводится в монопольном приближении малогрупповой двух-трехмерный расчет реактора с каналами, имеющими многозонную по высоте структуру, размещенными в узлах квадратной (программа TREC ) или гексагональной (программа TREC6 ) решетки.

4. Метод решения. Используется разностное преобразование уравнений гетерогенной теории в сочетании с разложением аксиальной составляющей нейтронного потока в ряд Фурье по синусам и нелинейная итерационная процедура для определения  $K_{эф}$ .

5. Ограничения сложности задачи. Основным ограничением является:

$$3 \cdot NP + 2 \cdot NK \cdot (2 \cdot NH + 1) \leq 20000$$

(  $NP$  - число каналов,  $NK$  - число сортов каналов,  $NH$  - число аксиальных гармоник ).

6. Типичное время счета. Время расчета критического реактора с 1200 каналами в трехгрупповом приближении с точностью не хуже  $10^{-2}$  составляет 1 мин. для двумерного расчета (1 гармоника) и 10 мин. для 7 аксиальных гармоник.

7. Особенности программ. Высокая интегральная сходимость ряда Фурье обеспечивает эффективный расчет (с 2 + 3 гармониками)

интегральных параметров (вес регулятора и др.) и двумерных распределений потока в трехмерной задаче. Численный алгоритм позволяет в рамках модели глубоко учитывать сложную аксиальную геометрию каналов и ее изменение (перемещение регуляторов).

8. Вспомогательные и сопутствующие программы. Используются программы бесформатного ввода и программа **BESIK** из БСП БЭСМ-6. Обмен с внешней памятью осуществляется автокодной программой прямого доступа с компактной записью информации. Часть входной информации может считываться с внешнего файла с помощью программ прямого доступа из БСП БЭСМ-6.

9. Состояние программ. Используются в проектных расчетах.

10. Ссылки. См. в конце работы.

11. Требования к ЭЕМ. Программы используют до 73400 машинных слов оперативной памяти и до 300 слов на МБ или МД.

12. Язык программирования: ФОРТРАБ

13. Операционная система. Мониторная система "Дубна".

14. Дополнительная информация. Производится автоматическая организация обменов с внешней памятью, позволяющая эффективно решать задачи как малой, так и большой размерности. Объем оперативной памяти, занимаемый программами, легко уменьшить (увеличить), изменив размерность рабочего блока в головной подпрограмме и значенке размерности в операторе **DATA**, что приведет к автоматическому увеличению (уменьшению) количества обращений к внешним устройствам. При постановке программ на ЭЕМ серии ЭС потребуются изменения некоторых операторов, ответственных за ввод и печать информации, а также замена программы, осуществляющей обмен с внешней памятью.

15. Автор программ: В.М.Малофеев, ИТЭФ

16. Уменьшенные материалы. Программы в текстовом и оттранслированном виде.

## 17. Рубрики и ключевые слова. С

### I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОГРАММ

#### I.1 Постановка задачи и возможности программы

Программы TREC и TREC6 предназначены для двух-трехмерного физического расчета гетерогенных реакторов с квадратной и гексагональной решеткой. Программы TREC и TREC6 появились в результате усовершенствования численного алгоритма, реализованного в ранних версиях этих программ /1/, успешно эксплуатируемых с 1978 г. Усовершенствование алгоритма было направлено, в основном, на существенные сокращения времени счета и увеличение размерности решаемой задачи. В основе численного алгоритма, реализованного в трехмерных гетерогенных программах, лежит разностное преобразование уравнений теории гетерогенного реактора /2/ и разложение аксиальной составляющей нейтронного потока в ряд Фурье по синусам. Хотя формально расчет реактора проводится в рамках модели, описываемой гетерогенными уравнениями, выведенными для однородного замедлителя, допускается расчет реактора с каналами, размещенными в неоднородном замедлителе, который может содержать размножающие или поглощающие материалы. В этом случае граничные условия, характеризующие процессы в каналах, следует задавать на границах ячеек. Численный алгоритм усовершенствованных программ TREC и TREC6 построен на итерационной схеме, в которой все параметры, характеризующие свойства каналов и описывающие взаимосвязь аксиальных гармоник, заключены в правую часть, в источник. Такая итерационная схема сходится к собственному значению, отличному от  $K_{эф}$ , но при соответствующем преобразовании оператора перехода однозначно с ним связанному. Подобная итерационная процедура была предложена

С.С.Городковым /3/. Использование этой итерационной схемы в сочетании с аксиальным разложением потока в ряд Фурье позволяет разделить задачу с источником на этапе внутренних итераций на систему несвязанных двумерных задач, что допускает хранение в оперативной памяти только двумерной компоненты потока и проведение внутренних итераций по однородному замедлителю на двумерной разностной сетке.  $K_{\text{эф}}$  определяется в программах из внешнего нелинейного итерационного процесса.

Погрешность трехмерного расчета с 2 + 3 аксиальными гармониками составляет около 1% в поканальном распределении энерговыделения, при этом  $K_{\text{эф}}$  рассчитывается с точностью около 0,1%. Погрешность расчета с 7 гармониками составляет несколько процентов в аксиальном распределении энерговыделения.

Основным ограничением, накладываемым на входные параметры, является:

$$3 \cdot NP + 2 \cdot NK \cdot (2 \cdot NH + 1) \leq 20000. \quad (I.1)$$

Помимо основного ограничения, существует ряд дополнительных ограничений, связанных со статической загрузкой Фортрана, которые в случае необходимости легко изменить. Ниже приводится список ограничений для версий программы от 01.II.83, ориентированных на выполнение проектных расчетов.

$$NG \leq 6 \quad (I.2)$$

$$NK \leq 20 \quad (I.3)$$

$$NP \leq 2500 \quad (I.4)$$

$$NR \leq 60 \quad (I.5)$$

$$NZG \leq 100 \quad (I.6)$$

$$NG \cdot NH \leq 120 \quad (I.7)$$

$$NG \cdot NF \cdot NZP \leq 100 \quad (I.8)$$

$$\begin{aligned} NG \cdot NK \cdot NH &\leq 600 && (I.9) \\ NG \cdot (NK+1) \cdot NH &\leq 660 && (I.10) \\ NZP \cdot (NG^2 + 5 \cdot NG + 2) &\leq 4000 && (I.11) \\ NZP \cdot NG^2 &\leq 1600 && (I.12) \end{aligned}$$

Здесь  $NG$  - число энергетических групп,  $NK$  - число сортов каналов,  $NP$  - число расчетных точек (полное число каналов, включая фиктивные),  $NR$  - число рядов в картограмме загрузки,  $NZG$  - число аксиальных геометрических зон,  $NZP$  - число аксиальных физических зон с разными свойствами,  $NH$  - число гармоник,  $NF$  - число мощностей и активационных функционалов. Из представленных ограничений наиболее сильными являются (I.9) и (I.10). При большом числе сортов расширение соответствующих массивов может отразиться на справедливости основного ограничения (I.1). Если граничные условия для всех каналов задаются на равных радиусах (например, на границах ячеек), то, проведя небольшую модификацию программы, вместо ограничений (I.9) и (I.10) можно наложить более слабое ограничение:

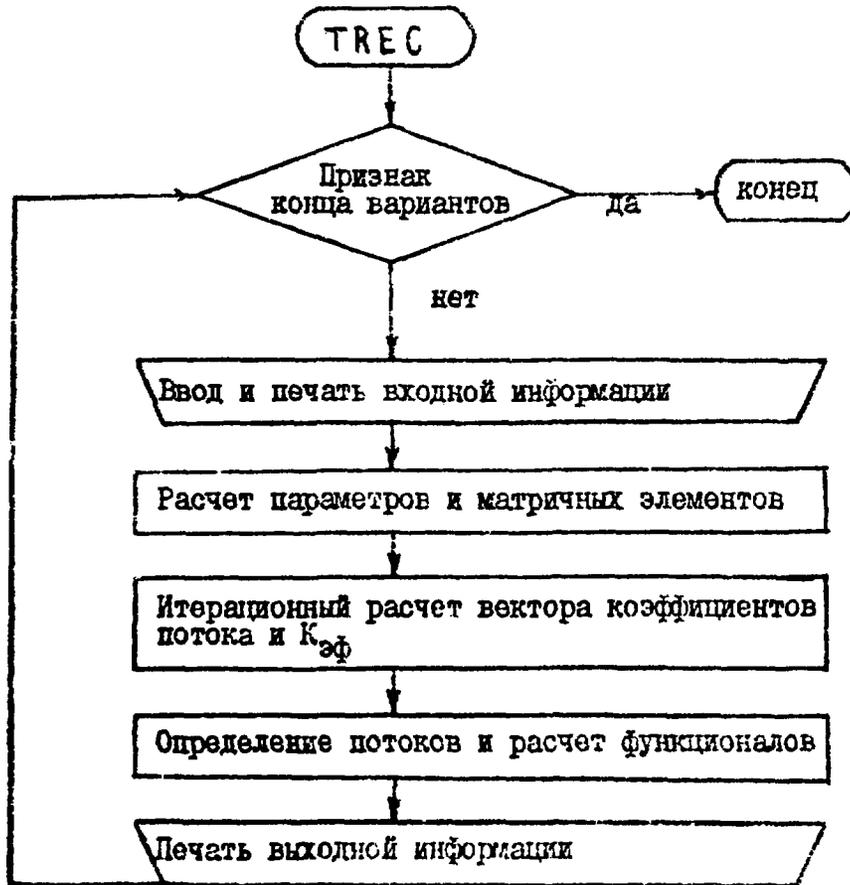
$$NG \cdot NK \leq 600 \quad . \quad \text{Емкость внешнего накопителя [D]}$$

должна удовлетворять условию:

$$2 \cdot NG [NH \cdot NP + NK \cdot NG \cdot (2 \cdot NH + 1)] + NG + 10600 \leq [D],$$

где  $ND$  определяется объемом выводимой на печать информации и составляет несколько тысяч слов.

## I.2 ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ БЛОК-СХЕМА ПРОГРАММ



Каждая из указанных частей программы загружается в оперативную память по LOADGO.

### 1.3 Требования к машинному оборудованию

Программы написаны на языке ФОРТРАН, ориентированном на использование транслятора "ФОРТРАН-ГДР" в рамках мониторной системы "Дубна". Текст программы занимает на МЛ 23 зоны, а персональная библиотека - 13 зон.

Счетное время (время центрального процессора) варианта с 1200 каналами в трехгрупповом приближении при 20 внешних итерациях составляет 1 мин. для двумерного расчета (1 гармоника), 3 мин. для 3 гармоник, 10 мин. для 7 гармоник и 17 мин. для 10 гармоник, при этом время, затрачиваемое на одну внешнюю итерацию, составляет соответственно 1,8, 7, 27 и 45 с. Время счета варианта с 2000 каналов в двухгрупповом приближении составляет около 9 мин. для 7 гармоник и 14 мин. для 10 гармоник. При небольшом числе гармоник (1 + 3) счетное время задачи растет линейно с увеличением числа групп, гармоник и каналов. При большом числе гармоник (10 и более) основные вычислительные затраты приходится на расчет источника для внутренних итераций, поэтому время счета задачи растет квадратично с увеличением числа групп и гармоник и линейно с увеличением числа каналов. При фиксированном значении  $K_{эф}$  точность в потоках не хуже  $10^{-3}$  достигается за 10+25 внешних итераций, а при расчете  $K_{эф}$  количество внешних итераций увеличивается в 1,3 + 3 раза, в зависимости от точности некоторой априорной информации (оценка  $K_{эф}$  и др.).

### 1.4 Программы с одинаковой и подобного рода постановкой задачи

Программа QUM-3-HER /4/ рассчитывает трехмерный или двумерный гетерогенный реактор с квадратной решеткой квазиальбедным методом в двухгрупповом приближении.

## 2. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

## 2.1 Постановка задачи

Рассчитывается реактор высоты  $H$  с каналами, имеющими многозонную по высоте структуру, размещенными в узлах  $\vec{k}$  квадратной или гексагональной решетки, с граничными условиями на их поверхностях:

$$dN(z) = \Lambda(z)N(z) - \Lambda_z(z) \frac{\partial^2 N(z)}{\partial z^2}; \quad d \equiv \rho \frac{\partial}{\partial r} \Big|_{r=\rho}, \quad (2.1)$$

где  $N(z)$  - вектор экстраполированных из замедлителя аксиальных распределений диффузионных групповых потоков, размерности  $G \times K$ ;  $G$  - число энергетических групп;  $K$  - число каналов;  $\Lambda$  и  $\Lambda_z$  - диагональные по  $\vec{k}$  матрицы, состоящие из  $G \times G$  эффективных матриц для каналов каждого сорта;  $\rho$  - матрица из радиусов каналов. Второй член в правой части (2.1) приближенно описывает утечку нейтронов в каналах. Для аксиальной зоны  $\zeta$   $\Lambda$ -матрица задается в виде/5/:

$$\Lambda^{\zeta}(K_{\zeta\phi}) = \Lambda_0 [1 - (N_0 \circ \varphi_0) \Lambda_0 / (K_{\zeta\phi} - \nu)], \quad (2.2)$$

$\nu = K_0 - \varphi_0 \Lambda_0 N_0$

где  $K_0, \varphi_0, N_0, \Lambda_0$  - характеристики зоны  $\zeta$ , вычисляемые программой TRIFON /6/ ( $K_0$  - коэффициент размножения,  $\varphi_0$  и  $N_0$  - групповые векторы источника и потока,  $\Lambda_0$  - треугольная матрица поглощения и утечки);  $N_0 \circ \varphi_0$  - матрица с элементами  $N_{0i} \varphi_{0i}$ .

$$\Lambda_z^{\zeta}(K_{\zeta\phi}) = \sum_i \frac{\partial \Lambda^{\zeta}(K_{\zeta\phi})}{\partial f_i} \cdot \frac{\partial f_i}{\partial \alpha^2}; \quad (2.3)$$

$f_i = K_0, \varphi_0, N_0, \Lambda_0$ ;  $\alpha^2$  - аксиальный лапласиан ( $\alpha = \pi/H$ ).

Характеристики  $\partial f_i / \partial \alpha^2$  также вычисляются программой TRIFON по методике /7/. Выражения (2.2) и (2.3) содержат параметр  $K_{эф}$ , пропорциональный числу вторичных нейтронов на деление и определяемый из глобального пространственного расчета. Предполагается, что групповые потоки в замедлителе удовлетворяют системе уравнений:

$$-\Delta N^g(\vec{r}, z) + \xi_g N^g(\vec{r}, z) = \xi_{g-1} N^{g-1}(\vec{r}, z); \quad g = 1, \dots, G, \quad (2.4)$$

где  $\xi_g = 1/\tau_g$ ;  $\xi_G = 1/L^2$ ;  $\tau_g, L^2$  - квадраты длины замедления и диффузии нейтронов в замедлителе.

Требуется найти положительный вектор аксиальных распределений диффузионных групповых потоков на поверхностях каналов  $N(z)$  и эффективный коэффициент размножения  $K_{эф}$ , являющиеся решением задачи (2.1) - (2.4), а также мощностные и активационные функционалы вида:

$$W = \sum_g S^g(z) N^g(z), \quad (2.5)$$

где  $S^g(z)$  - диагональная матрица, элементы которой могут быть определены с помощью программы TRIFON.

## 2.2 Метод решения

2.2.1 Аксиальная аппроксимация. Представляя  $N^g(\vec{r}, z)$  разложением:

$$N^g(\vec{r}, z) = \sum_{m=1}^M N_m^g(\vec{r}) \sin \alpha_m z$$

и интегрируя (2.1) и (2.4) с весом  $\sin \alpha_m z$ , получим систему уравнений, по форме совпадающую с двумерной:

$$-\Delta N_m^g(\vec{r}) + (\xi_g + \alpha^2 m^2) N_m^g(\vec{r}) = \xi_{g-1} N_m^{g-1}(\vec{r}); \quad (2.6)$$

$$g = 1, \dots, G; \quad m = 1, \dots, M$$

с граничным уровнем

$$dN = \Lambda N, \quad (2.7)$$

где  $N$  - вектор размерности  $G \times M \times K$ ;  $\Lambda$  - диагональная по  $\vec{k}$  матрица порядка  $K \times G \times M$

$$\Lambda_{k,mn}^* = \frac{2\alpha}{\pi} \int_0^{\pi/\alpha} (\Lambda_{\vec{k}}(z) + \alpha^2 n^2 \Lambda_{\vec{k}}(z)) \sin \alpha m z \sin \alpha n z dz.$$

Последнее выражение можно преобразовать к виду:

$$\Lambda_{k,mn}^* = (\Lambda_{\vec{k},m-n}^c \Lambda_{\vec{k},m+n}^c) + \alpha^2 n^2 (\Lambda_{\vec{k},m-n}^c \Lambda_{\vec{k},m+n}^c);$$

$$\Lambda_{\vec{k},i}^c = \frac{\alpha}{\pi} \int_0^{\pi/\alpha} \Lambda_{\vec{k}}(z) \cos \alpha i z dz; \quad \Lambda_{\vec{k},i}^s = \frac{\alpha}{\pi} \int_0^{\pi/\alpha} \Lambda_{\vec{k}}(z) \sin \alpha i z dz. \quad (2.8)$$

Отметим, что в силу представления (2.8) объем информации для хранения элементов матрицы в (2.7) растет линейно с числом аксиальных гармоник. Если каналы имеют многозонную по высоте структуру, то

$$\Lambda_{\vec{k},i}^c = \sum_{l=1}^{L_{\vec{k}}} \Lambda_{\vec{k}}^l [J_i(\alpha z_l) - J_i(\alpha z_{l-1})];$$

$$\Lambda_{\vec{k},i}^s = \sum_{l=1}^{L_{\vec{k}}} \Lambda_{\vec{k}}^l [J_i(\alpha z_l) - J_i(\alpha z_{l-1})]; \quad (2.9)$$

$$J_i(x) = \begin{cases} \frac{x}{\pi}, & i=0 \\ \frac{\sin ix}{\pi i}, & i>0. \end{cases}$$

Здесь  $L_{\vec{k}}$  - число аксиальных зон канала,  $z_l$  - границы зон ( $z_0 = 0, z_{L_{\vec{k}}} = H$ ).

По аналогии с /2/ решение системы (2.6) - (2.7) представим в виде:

$$N = C \bar{F} \chi(K_{op}) N. \quad (2.10)$$

Здесь  $C$  - не зависящая от  $\vec{k}$  и  $m$  треугольная матрица с элементами

$$C_{g,g} = 1; C_{g,g'} = U_{g,g'} C_{g-1,g'}; U_{g,g'} = \xi_{g-1} / (\xi_g - \xi_{g'}) \quad (g > g');$$

матрица  $\bar{F}$  имеет вид

$$\bar{F} = K_0 + I_0 F,$$

причем  $K_0$  и  $I_0$  диагональны по  $g, m$  и  $\vec{k}$  и состоят из элементов

$$K_0(\alpha_m^g \rho_{\vec{k}}), I_0(\alpha_m^g \rho_{\vec{k}}); \alpha_m^g = \xi_g + \alpha^2 m^2,$$

а элементы диагональной по  $g$  и  $m$  матрицы  $F$  равны:

$$F_{m, \vec{k} \vec{l}}^g = K_0(\alpha_m^g |\vec{k} - \vec{l}|) (1 - \delta_{\vec{k} \vec{l}}).$$

Диагональная по  $\vec{k}$  матрица  $\chi$  связана с  $\Lambda$ -матрицей линейным преобразованием:

$$\chi = -I_0 C^{-1} \Lambda + d I_0 C^{-1} \quad (2.11)$$

**2.2.2 Разностное преобразование.** Для получения разностного аналога уравнения (2.10) преобразуем его к форме, в которой в явном виде выделена "геометрическая" матрица  $F$  и введена произвольная диагональная матрица  $D$  :

$$I_0^{-1} C^{-1} N = [(I_0^{-1} K_0 - D) + (F + D)] \chi(K_{op}) N. \quad (2.12)$$

Введем разностные операторы  $P$  и  $R$ , диагональные по  $q$  и  $m$ , связывающие соседние каналы таким образом, чтобы

$$P(\beta)(F+D) \approx R(\beta, D), \quad (2.13)$$

Параметры  $\beta = \{\beta_n^q\}$  будем выбирать из условия наилучшего выполнения равенства (2.13), а не зависящую от  $\vec{K}$  диагональную матрицу  $D$  выберем так, чтобы оператор  $R$  имел более простую структуру (см. ниже). Действуя на обе части уравнения (2.12) оператором  $P$ , переопределяя  $\tilde{N}$  и  $\tilde{Y}$  учитывая (2.13), получим:

$$\begin{aligned} P\tilde{N} &= QY(K_{xx})\tilde{N}; \quad Q = P(I_0^{-1}K_0 - D) + R; \\ \tilde{N} &= UN; \quad \tilde{Y} = YU^{-1}; \quad U = I_0^{-1}C^{-1}. \end{aligned} \quad (2.14)$$

В отличие от уравнения (2.10), уравнение (2.14) имеет локальную по пространству структуру, аналогичную конечно-разностным уравнениям диффузии для "гомогенной" задачи.

**2.2.3 Выбор параметров разностного преобразования.** В программе **TRECS** для гексагональной решетки использована 7-точечная разностная схема, использованная ранее в программе **MASARE** [8]. Диагональные элементы матрицы  $P$  имеют вид (индекс опущен)

$$P_0 = 6 + \beta z^2; \quad z = \alpha e_0$$

( $\alpha$  - шаг решетки). Нondiagonальные элементы,  $P_1$ , характеризующие связь с ближайшими шестью каналами равны  $-1$ . Условие наилучшего асимптотического затухания пренебрегаемых в  $R$

компонент приводит к выражению:

$$\beta = \frac{6(I_0(z) - 1)}{z^2}$$

или

$$P_0 = 6 I_0(z). \quad (2.15)$$

Умножая матрицу  $P$  на матрицу  $F + D$ , считая решетку бесконечной, можно получить для диагональных и недиагональных элементов матрицы  $R$  следующие выражения:

$$R_0 = P_0 D - 6 K_0(z); \quad (2.16)$$

$$R_1 = (P_0 - 2) K_0(z) - 2 K_0(\sqrt{3}z) - K_0(2z) - D.$$

Выберем  $D$  так, чтобы элементы  $R_1$  обратились в нуль, т.е. преобразуем матрицу  $R$  в диагональную. Из последнего соотношения следует:

$$D = (P_0 - 2) K_0(z) - 2 K_0(\sqrt{3}z) - K_0(2z). \quad (2.17)$$

В программе **MACAR** /8/ для квадратной решетки использовалась 9-точечная разностная схема, позволяющая рассчитывать распределения нейтронов с точностью  $\sim 10^{-3}$ . В программе **TREC** реализована смешанная 5-9-точечная схема. Оператор  $P$  связывает 5 соседних каналов, а в операторе  $R$  пренебрегается влиянием каналов, расположенных за пределами 9-точечной локальной области. Такая схема несколько уступает по точности 9-точечной, однако, благодаря более простой структуре оператора  $P$  приводит к существенно меньшим вычислительным затратам на внутренние итерации. Диагональные элементы матрицы  $P$  для квадратной решетки имеют вид:

$$P_0 = 4 + \beta z^2.$$

Практика расчетов показала, что использование асимптотического критерия выбора параметра  $\beta$  в смешанной схеме при малых  $Z$  приводит к заметной погрешности в  $K_{эф}$  (-0,5%), связанной с нарушением условия баланса из-за низкой степени симметрии квадратной решетки. Более предпочтительным для квадратной решетки оказался балансный критерий, по которому параметр  $\beta$  вычисляется из условия равенства нулю суммы пренебрегаемых в  $R$  компонент. В этом случае для  $P_0$  можно вывести соотношение:

$$P_0 = \frac{4[\Sigma_0 - 3K_0(z) - K_0(2z) - 2(K_0(\sqrt{2}z) + K_0(\sqrt{5}z))]}{\Sigma_0 - 4(K_0(z) + K_0(\sqrt{2}z))}, \quad (2.18)$$

где

$$\Sigma_0 = \sum_{\substack{k_1, k_2 = -\infty \\ k_1^2 + k_2^2 \neq 0}}^{\infty} K_0(z\sqrt{k_1^2 + k_2^2}).$$

Для  $\Sigma$  в /9/ получена следующая формула, справедливая при небольших  $Z$  :

$$\Sigma_0 = \frac{2\sqrt{e}}{Z^2} - \ln \frac{1}{2} \sqrt{\frac{4\sqrt{e}}{Z^2}} - 0,73815 - 0,96 \frac{Z^2}{4\pi^2}; \quad (2.19)$$

$$\gamma = 1,781072418\dots$$

При больших значениях  $Z$  вместо балансного критерия можно использовать более простой критерий, аннулирующий сумму пренебрегаемых компонент в  $R$ , соответствующих 16 каналам, расположенным в ближайшей окрестности 9-точечной локальной области. Этот критерий приводит к следующему выражению для  $P_0$  :

$$P_0 = [K_0(z) + 2(K_0(\sqrt{2}z) + K_0(2z) + 2K_0(\sqrt{5}z) + K_0(\sqrt{8}z) + K_0(3z) + 2(K_0(\sqrt{10}z) + K_0(\sqrt{13}z)))] / (K_0(2z) + 2K_0(\sqrt{5}z) + K_0(\sqrt{8}z)). \quad (2.20)$$

При  $z \sim 1,5$  значения  $P_0$ , рассчитанные по формулам (2.18) и (2.20), совпадают, поэтому в программе TREC при  $z < 1,5$  используются формулы (2.18) - (2.19), а при  $z \gg 1,5$  - формула (2.20).

Соответствующие выражения для элементов матрицы  $R$  имеют вид:

$$R_0 = P_0 D - 4 K_0(z); \quad (2.21)$$

$$R_1 = P K_0(z) - 2 K_0(\sqrt{2}z) - K_0(2z) - D;$$

$$R_2 = P K_0(\sqrt{2}z) - 2(K_0(z) + K_0(\sqrt{5}z)). \quad (2.22)$$

Здесь  $R_1$  относится к ближайшим четырем соседям рассматриваемого канала, а  $R_2$  - к каналам, расположенным в углах 9-точечной локальной квадратной области. Полагая  $R_1 = 0$ , получим

$$D = P_0 K_0(z) - 2 K_0(\sqrt{2}z) - K_0(2z). \quad (2.23)$$

Таким образом, за счет выбора матрицы  $D$  оператор  $R$  из 9-точечного преобразовался в 5-точечный с шаблоном, смещенным относительно шаблона оператора  $P$  на угол в  $45^\circ$ .

Уравнение гетерогенного реактора (2.10) сформулировано для бесконечного замедлителя, а выражения для элементов различных операторов выведены для бесконечной решетки. Конечный размер реактора в радиальном направлении можно приближенно учесть

следующим образом. Дополним реактор фиктивными каналами (нулевого радиуса и с нулевым значением физических характеристик), сохраняя регулярность решетки, так чтобы граница полученной расчетной области (ломаная линия) приблизительно описывала форму внешней границы. Пусть  $\bar{K}_i$  - один из ближайших к границе узлов решетки, а  $\bar{K}_i + \vec{r}$  - соседние с  $\bar{K}_i$  узлы, расположенные за пределом расчетной области. Введем краевое условие вида:

$$N_{\bar{K}_i + \vec{r}} = \beta N_{\bar{K}_i} \quad (2.24)$$

Условие обращения потока в нуль на расстоянии  $h$  от последнего ряда каналов можно приближенно моделировать с помощью соотношения (2.24), полагая

$$\beta = 1 - \frac{Q}{h}$$

### 2.3 Численный алгоритм

Для численного решения уравнения (2.14) используется нелинейный итерационный процесс, в котором значение  $K_{эф}$  уточняется через заданное число внешних итераций на главное собственное значение. Итерационная схема такого процесса имеет вид:

$$(P \cdot S) \bar{N}^{n+1} = Q \delta \bar{N}^{n+1} + \frac{1}{\lambda^{n+1}} \{ Q [V(K_{эф}^{n+1}) - \delta \bar{r}] + S \} \bar{N}^{n+1} \quad (2.25)$$

$$\lambda^{n+1} \longrightarrow \lambda^n \quad \bar{N}^{n+1} \longrightarrow \bar{N}^n$$

$$K_{эф}^{n+1} = K_{эф}^n + (\lambda^n - 1) / \frac{\partial \lambda^n}{\partial K} \quad \frac{\partial \lambda^n}{\partial K} = - \frac{\lambda^n - \lambda^{n+1}}{K_{эф}^n - K_{эф}^{n+1}} \quad (2.26)$$

$$K_{эф}^n \longrightarrow K_{эф}^{n+1} \quad \bar{N}^n \longrightarrow \bar{N}^{n+1}$$

Здесь  $n$  - номер цикла внешних итераций;  $\Omega$  - номер внешней итерации в цикле;  $\lambda^{n+1}$  - текущее значение главного собственного значения, вычисляемого по схеме (2.25) с фиксиро-

ваным значением  $K_{эф}$ ; не зависящая от  $\bar{K}$  диагональная матрица  $S$  введена для дополнительного ускорения внешних итераций, а матрица  $\delta Y$  - для выделения устойчивого решения уравнения (2.14).

$$\delta Y = -I_0 C^{-1} \delta \Lambda C I_0,$$

где  $\delta \Lambda$  - не зависящая от  $\bar{K}$  и  $m$  нижняя треугольная матрица с нулевыми элементами на главной диагонали.

**2.3.1 Уточнение  $K_{эф}$  и условие окончания расчета.** Уточнение  $K_{эф}$  проводится исходя из условия равенства единице главного собственного значения через заданное число  $n_0$  внешних итераций, которое выбирается в соответствии с длиной цикла чебышевского ускорения. Обычно  $n_0$  полагается равным 6. Число итераций в первом цикле, как правило, увеличивается за счет нескольких дополнительных простых итераций без чебышевского ускорения. Кроме  $n_0$  в программах задаются начальные значения  $K_{эф}$  и  $\partial \lambda^* / \partial K$ , а также  $\partial \lambda / \partial K_{min}$  - минимально допустимое значение  $\partial \lambda^i / \partial K$  и некоторые параметры, характеризующие точность расчета ( $\epsilon$ ,  $\epsilon_0$  и  $\epsilon_F$ ). В первых двух циклах за  $\partial \lambda^i / \partial K$  принимается  $\partial \lambda^* / \partial K$ . Если по окончании цикла из  $n = n_0$  итераций не выполняются заданные условия по точности расчета потока, то  $K_{эф}$  не уточняется и итерации на главное собственное значение продолжаютсЯ дальше до тех пор, пока  $n$  не станет равным  $2n_0$  и т.д. Условием пересчета  $K_{эф}$  является выполнение следующего неравенства:

$$\Delta N^{i,n} \leq \epsilon_F (1 + |\lambda^{i,n} - 1| C \lambda). \quad (2.27)$$

Допустимая погрешность потока при пересчете  $K_{эф}$  предполагается

зависящей от близости  $\lambda^j$  к единице. Степень этой зависимости определяется коэффициентом  $C_\lambda$ , который из опыта расчетов принят равным 10. Погрешность потока определяется из двух последовательных внешних итераций и вычисляется по формуле:

$$\Delta N^{j,n} = \frac{1}{K} \sum_k \sum_m \frac{1}{m} \left| \bar{N}_{Gmk}^{j,n} - \bar{N}_{Gmk}^{j,n-1} \right|. \quad (2.28)$$

Здесь  $\bar{N}_{Gmk}$  - перераспределенный коэффициент Фурье для гармоники  $m$  теплового потока на канале  $k$ .

Для уменьшения колебания уточняемых значений  $K_{эф}$ , обусловленного погрешностью расчета и нелинейными эффектами, предусмотрена возможность ограничения минимально допустимых значений  $\partial \lambda^j / \partial K$ . Если рассчитанное по формулам (2.26) значение  $\partial \lambda^j / \partial K$  оказывается меньше, чем  $\partial \lambda / \partial K_{min}$ , то  $\partial \lambda^j / \partial K$  замещается на  $\partial \lambda / \partial K_{min}$ .

Условием окончания расчета является выполнение неравенств:

$$|\lambda^{j,n} - 1| \leq \varepsilon_k; \quad \Delta N^{j,n} < \varepsilon. \quad (2.29)$$

**2.3.2 Выделение устойчивого решения.** Введение матрицы в уравнение (2.25) обусловлено возможностью существования двух положительных решений уравнения (2.25) с различными положительными собственными значениями при фиксированном  $K_{эф}$ . При этом собственное значение, соответствующее ложному решению, может оказаться по модулю больше собственного значения, соответствующего "истинному" решению. Под "истинным" решением уравнения (2.25) понимается собственный вектор, определяющий положительное решение  $N(z)$ , собственное число которого может приниматься

значение, равное 1 при соответствующем выборе  $K_{эф}$ . Наличие доминирующего ложного решения приводит к заикливанию итерационного процесса (2.25) - (2.26). Аналитические исследования простейшей модели и численные эксперименты показали, что существование двух решений уравнения (2.25) обусловлено не пространственными, а спектральными эффектами и отражает возможность существования у реактора с фиксированной геометрией двух критических загрузок с разной плотностью делящегося вещества (персифенная решетка). Установлено, что с увеличением замедления внутри каналов значение "ложного" собственного числа уменьшается, поэтому реализованная в программах процедура преобразования спектра оператора перехода итерационного процесса (2.25) соответствует искусственному введению в каналы замедлителя. Структура матрицы  $\delta \Lambda$  обеспечивает преобразование спектра без существенного увеличения счетного времени задачи.

Во всех рассмотренных вариантах выделение устойчивого решения достигалось выбором единственного ненулевого элемента в левом нижнем углу матрицы  $\delta \Lambda$ . Этот элемент имеет положительное значение и подбирается эмпирически. Слишком большое значение элемента приводит к расширению спектра оператора перехода в отрицательную область и замедлению сходимости внешних итераций. Если граничные условия (2.1) формулируются не на поверхности каналов, а на границах ячеек или если каналы обладают высокой замедляющей способностью, то решение уравнения (2.14) по схеме (2.25) - (2.26), как правило, устойчиво и преобразования спектра не требуются.

2.3.3 Внешние итерации. Схему итерационного процесса (2.25) для определения главного собственного значения  $\lambda$  и собственной функции  $\tilde{N}$  (индекс  $j$  опущен) перейдем в сле-

дующем виде:

$$\begin{aligned} \tilde{N}^{n+1} &= \frac{1}{\lambda^{n+1}} H \tilde{N}^n; \quad H = (P + S - Q\delta\gamma)^{-1} [Q(\tilde{v}(K_{n+1}) - \delta\gamma) + S] \\ \lambda^{n+1} &= \frac{\ell(H \tilde{N}^n)}{\ell(\tilde{N}^n)} \longrightarrow \lambda; \quad \tilde{N}^n \longrightarrow \tilde{N}. \end{aligned} \quad (2.30)$$

Здесь  $\ell(\psi)$  - линейный функционал нормировки, определяемый по формуле:

$$\ell(\psi) = \frac{1}{K} \sum_K \sum_{n=1}^{\lfloor \frac{M+1}{2} \rfloor} \frac{1}{2^{m-1}} \psi_{G, 2^{m-1}, \vec{k}}. \quad (2.31)$$

Для ускорения внешних итераций (2.30) используется чебышевский метод, итерационная схема которого имеет вид /10/:

$$\begin{aligned} \psi^{n+1} &= H \tilde{N}^n - (\tau_{n+1} - \delta) \tilde{N}^n; \\ \tilde{N}^{n+1} &= \psi^{n+1} / \ell(\psi^{n+1}); \\ \lambda^{n+1} &= \ell(\psi^{n+1}) + \tau_{n+1} - \delta. \end{aligned} \quad (2.32)$$

Здесь  $\delta$  - величина сдвига спектра, а  $\tau_n$  - итерационный параметр, определяемый по формуле:

$$\tau_n = \frac{(\lambda_1 + \delta)}{2} (1 + \cos \pi \theta_n), \quad (2.33)$$

где  $\lambda_1$  - оцененное значение второго собственного числа;

$\theta_n$  - распределенная на  $[0, 1]$  числовая последовательность. В программах используется шрилическая последовательность

$$\theta = 3/4, 1/4, 7/12, \dots, 5/36,$$

состоящая из 18 элементов, оптимальная при  $n = 2, 6, 18$ .

Спектр оператора перехода  $H$  содержит как положительные, так

и отрицательные элементы, причем максимальное по модулю собственное значение обычно бывает отрицательным. Сдвиг спектра в правую полуплоскость, гарантирующий сходимость итерационного процесса (2.32) к положительному собственному значению (2.32), достигается введением параметра  $\delta$ , значение которого, как правило, задается в пределах  $2 + 4$ . Завышенное значение  $\delta$  приводит к замедлению сходимости процесса (2.32), а заниженное — к отсутствию сходимости к положительному собственному значению.

Скорость сходимости итерационных процессов (2.30) и (2.32) определяется близостью значений  $\lambda$  и  $\lambda_2$ . Введение в оператор  $H$  отрицательных элементов  $S_q$  ( $q = 1, \dots, G$ ) матрицы  $S$  приводит к увеличению интервала между главным и вторым собственными значениями и, следовательно, дополнительному ускорению внешних итераций. Дополнительное ускорение внешних итераций достигается ценой увеличения числа внутренних итераций, затрачиваемых на обращение оператора левой части уравнения (2.25). Однако, поскольку внешние итерации значительно более трудоемкие, чем внутренние, суммарный эффект остается положительным. Для обеспечения гарантированной сходимости внутренних итераций элементы матрицы  $S$  должны удовлетворять условию:

$$S_q \geq a \lambda_q.$$

Следует иметь в виду, что такое преобразование оператора приводит к расширению спектра в область отрицательных значений и требует увеличения параметра сдвига спектра  $\delta$ .

**2.3.4 Внутренние итерации.** Обращение оператора левой части уравнения (2.25) на каждой внешней итерации сходится к последовательному решению для каждой группы и гармоники системы неоднородных уравнений в двумерной области относительно одногруппового

вектора  $\Psi_{gm}$  :

$$A_{gm} \Psi_{gm} = Q_{gm}, \quad g = 1, \dots, G, \quad m = 1, \dots, M;$$

$$A_{gm} = P_{gm} + S_g; \quad (2.34)$$

$$Q_{gm} = Q_{gm} \left\{ \sum_{g'=1}^G \sum_{m'=1}^M [\delta(K_{\phi}) - \delta\gamma]_{mm'}^{gg'} \tilde{N}_{g'm'}^{n-1} + \sum_{g'=1}^{g-1} \delta\gamma_m^{g'g} \varphi_{g'm} \tilde{N}_{g'm}^{n-1} \right\}.$$

В первых версиях трехмерных программ /Г/ для численного решения уравнения (2.34) с несимметричной матрицей  $A$  использовался итерационный двухчленный чебышевский метод. В усовершенствованных программах TREC и TREC6 матрица  $A$  имеет простую симметричную структуру, и для ее численного обращения более эффективным оказался метод последовательной верхней релаксации /Ю/. В программах реализован метод последовательной верхней релаксации с чередованием направления итерирования. Для реактора с каналами, размещенными в узлах  $(i, j)$  квадратной решетки итерационная схема такого метода имеет вид (индексы  $i$  и  $j$  опущены):

$$\begin{aligned} \Psi_{i,j}^{k+1} &= (1-\omega) \Psi_{i,j}^{k+1/2} + \frac{\omega}{P} (\Psi_{i+1,j}^k + \Psi_{i-1,j}^k + \Psi_{i,j+1}^k + \Psi_{i,j-1}^k + Q(i)); \\ i &= 1, 2, \dots, I; \quad j = 1, 2, \dots, J; \\ \Psi_{i,j}^{k+1/2} &= (1-\omega) \Psi_{i,j}^k + \frac{\omega}{P} (\Psi_{i+1,j}^{k+1/2} + \Psi_{i-1,j}^{k+1/2} + \Psi_{i,j+1}^k + \Psi_{i,j-1}^k + Q(i)); \\ i &= I, I-1, \dots, 1; \quad j = J, J-1, \dots, 1. \end{aligned} \quad (2.35)$$

Здесь  $k$  - номер внутренней итерации;  $P$  - диагональный элемент матрицы  $A$  ( $P = P_0 + S$ );  $\omega$  - итерационный параметр. Аналогичную схему имеет метод релаксации для реактора с гексагональной решеткой. Параметр  $\omega$  выбирается оптимальным для релаксации без чередования направлений и вычисляется по

формуле:

$$\omega = \frac{2}{1 + \sqrt{1 - \mu^2}}, \quad (2.36)$$

где  $\mu$  — спектральный радиус матрицы, образуемой из матрицы  $A$  путем деления строк на диагональные элементы. Учитывая структуру матрицы  $A$  по аналогии с тем, как это сделано в /10/, можно получить следующие аналитические оценки спектрального радиуса  $\mu$  для квадратной и гексагональной решеток:

$$\mu_{\text{кв.}} = \frac{4}{P_0 + S} \left( 1 - \sin^2 \frac{\sqrt{b}}{2(N_x + 1/(1-b))} - \sin^2 \frac{\sqrt{b}}{2(N_y + 1/(1-b))} \right); \quad (2.37)$$

$$\mu_{\text{гекс.}} = \frac{6}{P_0 + S} \left( 1 - 2 \sin^2 \frac{\sqrt{b}}{2(N_x + 1/(1-b))} \right),$$

где  $N_x$  и  $N_y$  — максимальное число каналов в двух взаимно-перпендикулярных направлениях.

Асимптотическая скорость сходимости метода релаксации с чередованием направлений ниже, чем у традиционного метода релаксации. Однако, при малых значениях  $a^2/L^2$  традиционный метод релаксации приводит к увеличению начальной ошибки на первых итерациях, а асимптотическая скорость сходимости достигается при большом числе итераций. Чередование направлений в методе релаксации обеспечивает равномерное подавление ошибки в течение всего итерационного процесса и при невысоком требовании к точности обращения матрицы  $A$  дает заметный выигрыш в числе итераций. Число внутренних итераций на каждую внешнюю итерацию сохраняется постоянным и вычисляется по формуле:

$$N_{\text{ит}} = C_{\text{ин}} \ln \frac{1}{\epsilon_{\text{ин}}} / \ln \frac{1}{\omega - 1}, \quad (2.38)$$

где  $\epsilon_{in}$  - заданная точность внутренних итераций;  $C_{in}$  - поправочный коэффициент, который по результатам численных экспериментов был принят равным 2.

#### 2.4 Таблица использованных обозначений с пояснениями

Таблица использованных обозначений не приводится. Все массивы и переменные подробно комментируются в фортранных текстах программ.

### 3. ВХОДНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

#### 3.1 Список входной информации и строение носителей информации

Носителем входной информации для программ являются перфокарты и, если необходимо, МЛ или МД. Чтение с перфокарт осуществляется с помощью подпрограмм бесформатного ввода, позволяющих располагать вводимые массивы и переменные в произвольном порядке и набивать данные в практически произвольном формате. Каждая вводимая переменная или массив снабжается именем, пробиваемым в первой карте массива с первой позиции. Числовая информация на карте с именем набивается с позиции, номер которой больше 6. Элементы массива разделяются запятыми. Повторяющиеся группы чисел можно заключить в скобки, помещая перед ними число повторений. Каждый вариант заканчивается текстовой картой, на которой с первой позиции пробивается **FINISH**. Ниже приводится список имен вводимых переменных и массивов. В скобках указана последовательность набивки элементов массивов.

NGR	Число энергетических групп.
NEF	Эффективная высота реактора.
PITCH	Шаг решетки
BC	Значение параметра $\beta$ , определяющего крайное

- условие (2.24).
- NKIND** Число сортов каналов.
- NRBW** Число рядов в картограмме загрузки.
- NCAR** Массив числа каналов в ряду (по рядам).
- LBAD** Массив картограммы загрузки (по каналам в ряду и по рядам). Элементами массива являются номера сортов, задаваемые в соответствии с их размещением на картограмме.
- LDCOR** Массив поправок к картограмме загрузки. (I-й элемент массива - число исправляемых каналов  $N_{кор}$ . Затем следует  $N_{кор}$  шестизначных целых чисел, определяющих замену сортов в картограмме). Каждое шестизначное число состоит из трех упакованных двухзначных чисел: номер ряда в картограмме, порядковый номер заменяемого канала в ряду и номер сорта канала, на который производится замена. Первые два двухзначных числа определяют координаты заменяемого канала.
- NRPHZ** Число аксиальных физических зон с разными свойствами
- NZONE** Массив числа аксиальных геометрических зон каналов (по сортам каналов).
- LAXLBD** Массив соответствия физических зон геометрическим (по геометрическим зонам сорта и по сортам). Элементами массива являются номера физических зон, порядковый номер элемента соответствует номеру геометрической зоны.
- DZONE** Массив размеров аксиальных геометрических зон (последовательность набивки аналогична массиву **LAXLBD** .

- TAU** Массив возрастов нейтронов (по энергетическим группам). Последним элементом массива является квадрат длины диффузии.
- RØ** Массив радиусов каналов (по сортам).
- RNYCH** Массив физических характеристик аксиальных физических зон каналов (по набору характеристик и по физическим зонам). Для каждой физической зоны сначала вводятся следующие 4 характеристики: 1) коэффициент размножения; 2) вектор источника длиной  $NGR$ ; 3) вектор потока длиной  $NGR$ ; 4) массив элементов треугольной матрицы поглощения и увода длиной  $NGR(1+NGR)/2$ . Затем вводятся те же характеристики, описывающие аксиальную утечку.
- NPACT** Число мощностных и активационных функционалов
- PAC** Массив коэффициентов мощностных и активационных функционалов (по энергетическим группам, по аксиальным физическим зонам и по числу функционалов).
- NDL** Массив, определяющий формирование массивов **TAU**, **RNYCH** и **PAC** из информации, содержащейся во внешнем файле. (I-й элемент массива - число формируемых физических зон  $N_{z,p}$ . Затем следует  $N_{z,p}$  целых чисел). Каждое число состоит из двузначных чисел, упакованных в следующей последовательности: номер аксиальной физической зоны, номер физического типа в файле, номер типа функционала в файле для функционала, объявленного в программе первым, вторым и т.д.

- NHARM** Число аксиальных гармоник.
- NORM** Координаты нормированного канала (номер ряда, номер канала в ряду).
- NSELEC** Число каналов, для которых печатаются аксиальные распределения. Если **NSELEC** не вводится - аксиальные распределения не печатаются.
- LØCRØD** Массив координат каналов, для которых печатаются аксиальные распределения (по 2 числа (номер ряда, номер канала в ряду) и по выбранным каналам).
- NPZ** Число точек по высоте, в которых печатаются аксиальные распределения.
- NKIM** Число сортов каналов, для которых проводится усреднение функционалов и (или) потоков по  $Z$  и по сортам. Усреднение проводится по каналам сорта для первых **NKIM** сортов. Если **NKIM** не вводится - функционалы и потоки по сортам не усредняются.
- NKIMZ** Число сортов каналов, для которых проводится усреднение аксиальных распределений по сортам. Усреднение проводится по каналам сорта для первых **NKIMZ** сортов. Если **NKIMZ** не вводится - аксиальные распределения по сортам не усредняются.
- NSYMB** Количество символов, используемых при печати видеограммы усредненных по  $Z$  функционалов. Если **NSYMB** не вводится - видеограмма не печатается.

- DSYMB** Массив внутренних границ относительных значений интервалов изменения функционалов (по числу символов без I в возрастающей последовательности).
- ISYMB** Массив символов, используемых при печати видеограммы (по числу символов в возрастающей последовательности изменения функционалов).
- HCORE** Высота активной зоны. Если **HCORE** не вводится – при усреднении функционалов по  $Z$  нормировка производится на всю высоту реактора.
- LNWR** Логический номер периферийного устройства, на которое производится запись текущей информации (двузначное десятичное число).
- SHIFT** Значение  $\delta$ -сдвига спектра оператора перехода внешних итераций.
- DLAM** Массив элементов матрицы преобразования спектра  $\delta A$  (построчно по элементам ниже главной диагонали).
- SDOP** Массив элементов диагональной матрицы  $S$  – сдвига спектра разностного оператора (по энергетическим группам).
- EPS** Точность расчета потока ( $\epsilon$ ).
- EPSK** Точность отгошки на единицу главного собственного числа при определении  $K_{эфф}(\epsilon_k)$ . Если **EPSK** не вводится –  $K_{эфф}$  не вычисляется.

EFKIN	Начальное значение $K_{эф}$ ( $K_{эф}^0$ ).
DERIN	Начальное значение производной ( $\partial \lambda^0 / \partial K$ ).
DERMIN	Минимальное значение производной ( $\partial \lambda / \partial K_{min}$ ).
EPSF	Точность стабилизации потока при вычислении $K_{эф}$ ( $\epsilon_F$ ).
LCYCL	Число линейных внешних итераций в цикле
NORD	Число простых внешних итераций, проводимых до ускорения сходимости. Если внешние итерации не ускоряются, то $NORD \geq NOUTM$
NOUTM	Максимально допустимое число итераций.
NITER	Массив числа внутренних итераций (по числу энергетических групп).
EPSIN	Точность внутренних итераций ( $\epsilon_{in}$ ).
EV2	Оцененное значение второго собственного числа ( $\lambda_2$ ).
FLUX	Печать усредненных по $Z$ групповых потоков (вводится только имя без чисел). Если <b>FLUX</b> не вводится - потоки не печатаются.
LADI	Печать протокола итерационного процесса (без чисел).
PRIPHY	Печать массива PHYCN при чтении с внешнего файла (без чисел).
NORPAC	Нормировка функционалов по аналогии с нормировкой теплового потока (без чисел).
END	Блокировка перехода к следующему варианту (без чисел). Карта <b>END</b> вводится в последний вариант.

### 3.2 Дополнительные замечания к входной информации

1) Если переменная или массив содержит только нулевые значения, то соответствующие имена можно не вводить. По умолчанию задаются следующие величины:  $NHARM=1$ ;  $LNWR=03$  (MB);  $EPS=10^{-4}$ ;  $EPSIN=0,2$ ;  $EPSK=0,01$ ;  $LCYCL=6$ ;  $NORD=1$ ;  $NOUTM=100$ ;  $EFKIN=1$ ;  $DERMIN=100$ ;  $EPSF=0,001$ ;  $NPZ=21$ .

2) Если в узел решетки попадает чистый замедлитель (отсутствует канал), то при вводе картограммы загрузки в соответствующем месте пробивается 0. "Нулевой" сорт канала не учитывается в  $NKIND$ .

3) Число элементов массива  $LDCOR$  не должно превышать 100. Если число заменяемых каналов больше, чем 99, то тогда можно вводить подряд несколько массивов  $LDCOR$ . Массив  $LDCOR$  вводится после ввода картограммы.

4) Физические характеристики каналов и активационные коэффициенты можно вводить частично с перфокарт, а частично с внешнего файла. В этом случае сначала следует вводить информацию с перфокарт, заменяя характеристики, считываемые через  $NDL$  нулями. Внешний файл должен иметь математический номер 45. Число элементов массива  $NDL$  не должно превышать 100. Если это условие нарушается, можно вводить несколько массивов  $NDL$ . Массив  $NDL$  вводится после ввода  $NGR$  и  $NPYZ$ .

5) Массив  $NORM$  задает координаты канала, для которого усредненный по высоте тепловой поток нормируется на единицу. Если  $NORM$  не вводится, то нормировка осуществляется на усредненный по всем каналам тепловой поток (включая "нулевые" каналы). При вводе имени  $NORPAC$  аналогично нормируются функционалы. Если  $NORPAC$  не вводится - функционалы рассчитываются без

нормировки в соответствии с нормированным потоком.

6) Массив NITER задается только для низших аксиальных гармоник. Для остальных гармоник  $N_{ит}$  рассчитывается по аналогии с формулой (2.37) с поправкой на введенное число итераций для низших гармоник. Расчет числа внутренних итераций по формуле (2.37) при заданной точности  $\xi_n$  проводится только в том случае, если массив NITER не вводится.

### 3.3 Изменение входной информации

По окончании расчета варианта входная информация полностью сохраняется. Поэтому для следующего варианта можно вводить только те переменные и массивы, которые изменились.

## 4. ВЫХОДНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

### 4.1 Список выходной информации и строение носителей информации

Входная информация и результаты расчета выводятся на АЦПУ. Кроме того, почти вся выходная информация по окончании расчета варианта содержится на обменном файле и при необходимости может быть использована другими программами. Помимо входных данных на печать выводится следующая информация: протокол итерационного процесса;  $K_{эф}$ ; усредненные по  $Z$  двумерные распределения скоростей процессов и групповых диффузионных потоков на каналах; усредненные по  $Z$  и по сортам значения скоростей процессов и потоков; видеогаммы двумерных распределений скоростей процессов; аксиальные распределения скоростей процессов и групповых потоков для заданных каналов; усредненные по сортам аксиальные распределения скоростей процессов и групповых потоков; вычисленное значение производной  $\partial \lambda / \partial K$ , главное собственное число и количество внешних итераций. Вся выводимая на печать информация снабжена комментариями.

#### 4.2 Дополнительные замечания к выходной информации

1) Выходная информация может печататься лишь частично. Количество рассчитываемых и печатаемых данных определяется входными данными.

2) В стандартном режиме работы программ физические характеристики аксиальных физических зон печатаются лишь тогда, когда вводится только с перфокарт. Печать физических характеристик при считывании их с внешнего файла устанавливается картой с именем **PRTRNY** .

3) Если массив **NITER** не вводится, то программы печатают массив числа внутренних итераций, рассчитанный по заданной точности внутренних итераций.

4) Если скорости процессов принимают нулевые или отрицательные значения, то на видеограмме в соответствующих местах печатаются нули. После печати видеограммы печатается таблица соответствия символов абсолютным интервалам изменения скоростей процессов. Символы могут быть любыми и определяются вводом. Максимальное количество символов не должно превышать 20.

5) Аксиальные распределения печатаются для первых девяти функционалов. Если число функционалов не больше двух, то печатаются аксиальные распределения групповых потоков. Точки, в которых печатаются аксиальные распределения, выбираются равномерно по всей высоте реактора.

6) Количество каналов, для которых рассчитываются аксиальные распределения, не должно превышать 20. Число сортов каналов, по которым усредняются двумерные распределения, должно удовлетворять условию  $NKIM \cdot NРАСТ \leq 20$  , если двумерные распределения потоков не рассчитываются, и условию  $NKIM \cdot (NРАСТ + NGR) \leq 20$  ,

если введено имя FLUX .

## 5. ИНСТРУКЦИЯ ДЛЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ

### 5.1 Рабочее состояние машины и ее периферийных устройств

Работа программ обеспечивается стандартным состоянием машины и ее периферийных устройств.

### 5.2 Рабочие указания

Эффективность расчетов по программам зависит от выбора параметров, влияющих на сходимость итерационных процессов. При неудачном выборе этих параметров сходимость задачи может существенно замедлиться или даже отсутствовать. В последнем случае выход из итерационного расчета осуществляется по максимально допустимому числу внешних итераций. Если нет ошибок во входных данных, отсутствие сходимости может возникнуть по следующим причинам.

1) Завышено или сильно занижено оцененное начальное значение  $K_{эф}$ . Завышение ожидаемого  $K_{эф}$  может привести к отсутствию сходимости в рамках линейного итерационного процесса (без пересчета  $K_{эф}$ ). В этом случае в распечатке протокола итерационного процесса для ряда итераций наблюдаются отрицательные значения главного собственного числа  $\lambda$  или значений, меньше заданного  $\lambda_1$ . Такое явление завывшение  $K_{эф}$  определяется большой утечкой нейтронов. Чем больше реактор, тем меньше допустимое завывшение. Для больших реакторов допускается завывшение  $K_{эф}$  на величину  $\sim 1\%$ . Занижение  $K_{эф}$  не приводит к отсутствию сходимости линейных внешних итераций. Однако, при большом занижении  $K_{эф}$  (10% и более) из-за нелинейности итераций, уточняющих  $K_{эф}$ , в следующем внешнем цикле может возникнуть слишком заниженное  $K_{эф}$ , что повлечет отсутствие сходимости. Это также легко определить по протоколу итераций.

2) Задано слишком маленькое значение производной  $\partial \lambda^* / \partial K$ . В этом случае во втором цикле уточнения текущее значение  $K_{эф}$  может попасть в "запрещенную" область, что приведет к описанным выше последствиям. Завышение начального значения производной позволяет существенно занижать оценку  $K_{эф}$ , при этом счетное время задачи несколько увеличивается.

3) Задана слишком грубая точность стабилизации потока при уточнении  $K_{эф}$ . В этом случае наблюдаются большие колебания текущих значений  $K_{эф}$  или они попадают в "запрещенную" область. Колебания  $K_{эф}$  можно ограничить, введя минимально допустимое значение производной. Завышение минимально допустимого значения производной приводит к замедлению сходимости задачи.

4) Занижена величина сдвига спектра оператора перехода.

5) Не введена матрица преобразования спектра  $\delta \Lambda$ , когда граничные условия определяются на поверхностях каналов со слабым внутренним замедлением. В этом случае при  $K_{эф}^i \leq K_{эф}$  линейные итерации сходятся к главному собственному числу, превышающему единицу, а при достаточно больших  $K_{эф}$  линейные итерации зацикливаются. Если при неустойчивом решении линейные итерации сходятся, то значение главного числа всегда больше единицы. При расчетах большого реактора может возникнуть неустойчивое решение уравнения (2.14) даже тогда, когда граничные условия определяются на границах ячеек. В последнем случае для выделения устойчивого решения достаточно задать первый элемент в последней строке матрицы  $\delta \Lambda$  масштаба  $10^{-2}$ , а остальные элементы положить равными нулю.

6) Задана слишком грубая точность внутренних итераций. Точность  $\sim 0,1$  достаточна для всех практических задач.

Если быстро не удалось установить причину медленной сходимости или отсутствия сходимости задачи, следует провести расчет без уточнения  $K_{эф}$ , положив  $\epsilon_k$  равным нулю. Если и в этом случае сходимости к положительному решению не возникла, то либо имеются ошибки во входных данных, либо завышено оцененное значение  $K_{эф}$ , либо занижена величина сдвига спектра  $\delta$ . При сильно заниженном  $\delta$  наблюдается сходимости к отрицательному собственному значению.

Значения переменных, заданные в программах по умолчанию, ориентированы на расчеты больших реакторов и обеспечивают надежную сходимости итераций для любых реакторов, если оцененное значение  $K_{эф}$  лежит в допустимых пределах. Меняя эти параметры, можно сократить время счета задачи. Если проводится серия расчетов однотипных вариантов, то, ввиду быстрой интегральной сходимости разложения потока в ряд Фурье, рекомендуется провести подбор оптимальных параметров, используя быстрые расчеты с небольшим числом гармоник ( $I + 3$ ). При выборе начального значения  $K_{эф}$  следует иметь в виду, что его недооценка лучше переоценки. Оптимальное значение производной практически не меняется при расчете близких вариантов, и за начальное значение производной можно принять рассчитанное программой значение для одного из вариантов. Если ожидаемое значение  $K_{эф}$  известно плохо, то эту производную следует несколько увеличить. Для устранения колебаний текущих значений  $K_{эф}$  за минимально допустимое значение производной следует принять значение чуть меньшее или равное оптимальному. Оптимальное значение второго собственного числа для больших реакторов, как правило, равно  $0,5 + 0,7$ . Для небольших реакторов и сборок хорошие результаты получаются если положить  $\lambda_2 = 0$ .

Отметим, что сходимость задачи очень чувствительна к ошибкам во входных данных. Так, например, если площадь ячейки с заданным радиусом хотя бы ненамного превосходит истинную площадь ячейки, определяемую шагом решетки, может возникнуть отсутствие сходимости.

## 6. ОПИСАНИЕ ПРОГРАММ И ИХ БЛОК-СХЕМА

В программах `TREC` и `TREC6` производится автоматическая организация обменов с внешней памятью (МБ, МД, МЛ). Если размерность задачи невелика (двумерный расчет или трехмерный расчет с небольшим числом каналов), обмен с внешней памятью производится только при уточнении  $K_{эф}$  и при обработке входной и выходной информации. В зависимости от размерности решаемой задачи и выделенного объема оперативной памяти, который определяется заданной размерности рабочего блока в головной подпрограмме, программами устанавливается один из следующих режимов обмена с внешними накопителями на каждой внешней итерации: 1) отсутствие обмена; 2) обмен только  $\gamma$ -матриц; 3) обмен только потоков; 4) обмен потоков и  $\gamma$ -матриц. При этом сегментация (разбивка на отдельные единицы записи) массивов потоков и  $\gamma$ -матриц проводится таким образом, чтобы количество обращений к внешним устройствам было минимальным. Для обмена с внешней памятью используется программа прямого доступа `GWRITE` с компактной записью информации на внешнем устройстве, написанная на автокоде В.Л.Бугаенко.

В программах предусмотрена возможность ввода физических характеристик каналов непосредственно с внешнего устройства, на которое они записываются программой `TRIFON` в процессе их расчета.

Фортранные тексты программ снабжены комментариями. Поясняются имена и структуры всех массивов и имена основных переменных при первом обращении к ним, а также функциональные назначения всех блоков подпрограмм и отдельных групп операторов. Каждая подпрограмма снабжена общим комментарием, содержащим пояснение функционального назначения подпрограммы и список входных и выходных переменных в алфавитном порядке. Общий комментарий размещается после имени подпрограммы и выделяется пунктиром. Описание входных данных содержится в комментарии к подпрограмме `INFE`. Структура внешнего файла, содержащего физические характеристики каналов, поясняется в комментарии к подпрограмме `RFILE`. Описание структуры внутреннего обменного файла содержится в подпрограмме `DIVREC`.

### 6.1 Основная программа

Программы `TREC` и `TREC6` состоят из пяти сегментов (подпрограммы `SEG M1`, `SEG M2`, `OUTPUT`, `SEG M4` и `OUTPUT`), каждый из которых динамически загружается в оперативную память по `LOADGD`. Головные подпрограммы `TREC` и `TREC6` осуществляют последовательный вызов пяти сегментов. На рис.1 приведена блок-схема программы `TREC`. Программа `TREC6` имеет такую же блок-схему. Программы различаются некоторыми блоками, содержащимися в подпрограммах `DIFOP`, `IPAC`, `SOURCE`, `MULT` и `INIT`.

### 6.2 Подпрограммы

Ниже приводится список подпрограмм, входящих в программы `TREC` и `TREC6`, и их функциональные назначения.

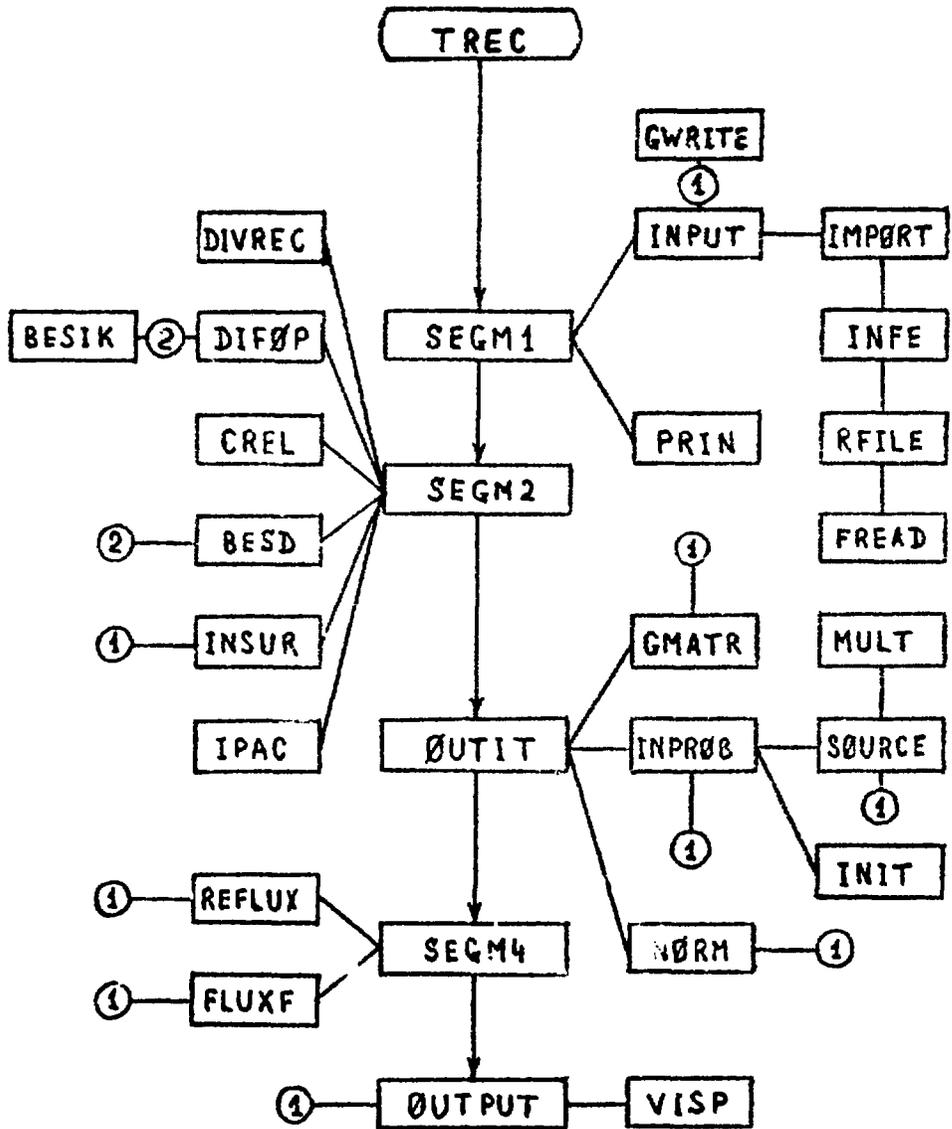


Рис. I. Блок-схема программы TREC.

- SEGM1** Вызывает две подпрограммы первого сегмента.
- INPUT** Осуществляет ввод исходных данных.
- GWRITE** Проводит обмен с внутренним обменным файлом; имеет ряд входов, среди которых в программах используется **GREAD** , **SETBUF** и **BUFCLN** . Подпрограмма написана на автокоде.
- IMPORT** Осуществляет бесформатный ввод (содержится в БСП БЭСМ-6).
- INFE** Осуществляет бесформатный ввод; вызывает ряд подпрограмм бесформатного ввода из БСП БЭСМ-6.
- RFILE** Читает и обрабатывает информацию с внешнего файла, формирует массивы **RHUSN** , **PAC** и **TAU** .
- FREAD** Подпрограмма прямого доступа из БСП БЭСМ-6, питающая информацию с внешнего файла с помощью подпрограмм **FCOLD** и **FCNTR** .
- PRIN** Печатают исходные данные.
- SEGM2** Вызывает 6 подпрограмм второго сегмента.
- DIVREC** Определяет сегментацию массивов для организации обменов; устанавливает режим обмена с внешней памятью; вычисляет число расчетных точек.
- DIFOP** Вычисляет элементы разностных операторов по формулам (2.15) - (2.23) и аксиальный лапласиан.
- BESIK** Рассчитывает модифицированные функции Бесселя дугевого  $\mu$  первого порядка (из БСП БЭСМ-6);

- используются входы **BESKO** , **BESIO**  
и **BESI1**.
- CREL** Вычисляет элементы матрицы  $C$  , пере-  
определенных  $\Lambda$  -матриц для аксиальных  
физических зон и матрицы преобразования  
спектра  $\delta\gamma$  .
- BESD** Вычисляет элементы диагональных матриц  $I_1$  ,  
 $dI_1$  и  $I_1'K_0-D$  .
- INSUR** Записывает физические характеристики кана-  
лов и начальные значения потоков на внутрен-  
ний обменный файл.
- IPAC** Определяет итерационные параметры внутрен-  
них итераций по формулам (2.36) - (2.37) и  
число итераций по формуле (2.38).
- OUTIT** Организует нелинейный итерационный процесс  
(2.25) - (2.26) с чебышевским ускорением  
(2.32); вычисляет  $K_{эф}$ .
- GMATR** Вычисляет элементы матрицы  $\tilde{G}$  ( $K_{эф}$ ).
- INPRVB** Организует решение задачи с источником.
- SOURCE** Вычисляет правую часть уравнения (2.25) или  
(2.34).
- MULT** Проводит разностное преобразование источника.
- INIT** Проводит внутренние итерации по схеме (2.35).
- NORM** Определяет нормированный поток по чебышев-  
ской схеме (2.32); вычисляет погрешность  
потока по формуле (2.28).
- SEG4** Вызывает две подпрограммы четвертого сегмента.
- REFLUX** Восстанавливает вектор коэффициентов потока  
 $N$  по рассчитанному вектору  $\tilde{N}$  .

- FLUXF** Рассчитывает мощностные и активационные функционалы, усредненные по высоте, и аксиальные распределения.
- OUTPUT** Печатает выходную информацию.
- VISP** Печатает видеограмму двумерных распределений скоростей активаций.

### 7. ТЕКСТ ПРОГРАММЫ

Текст программы не приводится.

### 8. КОНТРОЛЬНАЯ ТЕСТОВАЯ ЗАДАЧА

Контрольная тестовая задача не приводится.

### 9. АПРОБИРОВАНИЕ ПРОГРАММЫ

Двумерные расчеты тяжеловодных реакторов и сборок по программам **TREC** и **TREC6** (I гармоника) сравнивались с расчетами по двумерным разностным программам **MACAR** и **MACAR6** /8/ и монопольными расчетами по прямой двумерной гетерогенной программе **DISHER** /II/. Трехмерные расчеты по программе **TREC6** сравнивались с результатами расчетов по ранней версии этой программы /I/. Исследовалась также сходимость рассчитанных по программам **TREC** и **TREC6** аксиальных распределений энерговыделения и потоков с увеличением числа аксиальных гармоник.

Погрешность двумерных расчетов по программам **TREC** и **TREC6** по сравнению с точным решением гетерогенных уравнений по программе **DISHER** составляет  $\sim 0,1\%$  в  $K_{эф}$  и около  $1\%$  в поканальном распределении энерговыделения. Усредненные по высоте каналов распределения потоков и скоростей активаций (энерговыделения) в трехмерных реакторах быстро сходятся с

увеличением числа аксиальных гармоник. Погрешность расчета двумерных распределений в трехмерных задачах при 2 + 3 аксиальных гармониках практически не превышает погрешности расчетов двумерных реакторов, связанной с разностным преобразованием. Погрешность расчета трехмерных распределений с 7 + 10 гармониками составляет несколько процентов.

Преимущество программ **TREC** и **TREC6** перед квазиальбердовой программой /4/ и "чисто" разностными программами может проявиться при расчете трехмерных реакторов с большой аксиальной утечкой нейтронов, а также при расчете интегральных характеристик и двумерных распределений в трехмерных задачах. Особенности программ позволяют получить наибольшее быстродействие при расчетах серии близких задач (вариантные расчеты реактора; использование программ в качестве модуля в оптимизационных и нестационарных задачах).

Автор выражает благодарность Б.П.Кочурову за обсуждения и замечания; В.Л.Бугаенко - за помощь в организации обменов программ с внешними устройствами.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Кочуров Б.П., Малофеев В.М. О трехмерных расчетах гетерогенного реактора. - Атомная энергия, 1980, т.48, вып.6, с.387-388.
2. Кочуров Б.П., Малофеев В.М. Разностный подход к решению уравнений гетерогенного реактора. - Атомная энергия, 1977, т.42, вып.2, с.87-90.
3. Городков С.С. Дальнейшее развитие квазиальбердного метода расчета гетерогенных реакторов: Препринт ИАЭ - 2502. М., 1975.
4. Городков С.С., Гуревич М.И., Поздняков Н.Е. Инструкция по пользованию программой расчета трехмерного или двумерного гетерогенного реактора QUM-3-HER : Препринт ИАЭ - 2794. М., 1977.
5. Кочуров Б.П. Развитие численных методов в теории гетерогенного реактора: Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. М., 1981.
6. Бурмистров А.Я., Кочуров Б.П. Пространственно-энергетическое распределение нейтронов в цилиндрической ячейке реактора (программа TRIFON ): Препринт ИТЭФ - 106, М., 1976.
7. Кварацхелия А.Ю., Кочуров Б.П. Метод расчета аксиальной составляющей матрицы эффективных граничных условий на поверхности цилиндрической ячейки реактора. М., Препринт ИТЭФ. 1983, № 98.
8. Кочуров Б.П., Малофеев В.М. Метод решения разностных уравнений гетерогенных реактора. М., Препринт ИТЭФ.

1977, № 74.

9. Г а л а н и н А.Д. Теория гетерогенного реактора. М.: Атомиздат, 1971.
10. Ш и ш к о в Л.К. Методы решения диффузионных уравнений двумерного ядерного реактора. М.: Атомиздат, 1976.
11. К о ч у р о в Б.П. О расчетах гетерогенного реактора в дипольном приближении. М., Препринт ИТЭФ, 1976, № 76.

В.М. Малофеев

Алгоритм и программы трехмерного расчета гетерогенного реактора (программы TR3C и TR3C6).

Редактор И.Н. Ломакина

Корректор С.Ю. Ольховникова

Работа поступила в ОНТИ 12.11.84

---

Подписано к печати 24.01.85      ТО1347      Формат 60x90 1/16  
С/сетн. печ. Усл.-печ. л. 2,75.      Уч.-изд. л. 2,0.      Тираж 200 экз.  
Заказ 34      Индекс 3624      Цена 30 коп.

---

Отпечатано в ИТЭФ, 117259, Москва, Б. Черемушкинская, 25

30 коп

ИНДЕКС 3624

М., ПРЕПРИНТ ИТЭФ, 1985, № 34, с.1-44