

ФИЗИКА
ЯДЕРНЫХ
РЕАКТОРОВ

М. Н. ЗИЗИН, Л. К. ШИШКОВ,
Л. Н. ЯРОСЛАВЦЕВА

ТЕСТОВЫЕ
НЕЙТРОННО-
ФИЗИЧЕСКИЕ
РАСЧЕТЫ
ЯДЕРНЫХ
РЕАКТОРОВ

М. Н. ЗИЗИН, Л. К. ШИШКОВ, Л. Н. ЯРОСЛАВЦЕВА

ТЕСТОВЫЕ
НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ
РАСЧЕТЫ
ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ



МОСКВА АТОМИЗДАТ 1980

УДК 621.039.051.17

Зинин М. Н., Шишков Л. К., Ярославцева Л. Н. Тестовые нейтронно-физические расчеты ядерных реакторов. — М.: Атомиздат, 1980 — 88 с.

Описаны тестовые задачи, а также все необходимые исходные данные и результаты решения этих задач по известным программам. Тесты предназначены в основном для проверки программ нейтронно-физических расчетов в одно-, двух- и трехмерной геометрии в диффузионном приближении. Число энергетических групп в тестах от 1 до 6. Приведены также тест для двухмерного гетерогенного расчета методом Галанина — Фейнберга, задачи по оптимизации ксеноновых переходных процессов в реакторе, задачи на поиск максимума мощности реактора и получения максимального количества определенного изотопа за счет варьирования режима облучения.

Для разработчиков программ, физиков и инженеров-физиков, использующих программы для расчета ядерных реакторов.

Табл. 59. Ил. 21. Библиогр. 45.

Серия «Физика ядерных реакторов», № 18.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Введение	4
ТРЕХМЕРНЫЕ ТЕСТОВЫЕ ЗАДАЧИ	
§ 1. Реактор на быстрых нейтронах типа SNR-300 в треугольной и прямоугольной геометриях	12
§ 2. Легководный реактор PWR в прямоугольной геометрии (тест МАГАТЭ 3D)	17
§ 3. Модель реактора ВВЭР-440	27
ДВУХМЕРНЫЕ ТЕСТОВЫЕ ЗАДАЧИ	
§ 4. Реактор на быстрых нейтронах типа SNR-300 в треугольной и прямоугольной геометриях	36
§ 5. Легководный реактор PWR в прямоугольной геометрии (тест МАГАТЭ 2D)	40
§ 6. Большой реактор на быстрых нейтронах в R, Z-геометрии	44
§ 7. Сборка кассет реактора ВВЭР-440 в гексагональной геометрии	58
§ 8. Модель ячейки реактора в X, Y-геометрии с неразделяющимися переменными	66
§ 9. Гетерогенный реактор на тепловых нейтронах	70
ОДНОМЕРНЫЕ ТЕСТОВЫЕ ЗАДАЧИ	
§ 10. Три тестовые задачи в сферической и цилиндрической геометриях	73
§ 11. Ячейка хранилища кассет реактора типа ВВЭР	79
ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ ТЕСТОВЫЕ ЗАДАЧИ	
§ 12. Задача о максимуме мощности (одномерная плоская геометрия)	80
§ 13. Задача о максимуме мощности (одномерная цилиндрическая геометрия)	81
§ 14. Оптимизация ксенонового переходного процесса	82
§ 15. Получение максимального количества нуклида	84
Список литературы	86

ИБ № 883

**Михаил Николаевич Зизин,
Лев Константинович Шишков,
Ленина Николаевна Ярославцева**

ТЕСТОВЫЕ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

Редактор Г. В. Чернышова
Художественный редактор А. Т. Кирьянов
Обложка художника А. К. Шаварда
Технический редактор Л. Ф. Шкилевич
Корректор М. В. Косарева

Сдано в набор 26.03.80. Подписано к печати 02.06.80. Т-11904.
Формат 60×90¹/₁₆. Бумага тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая
Усл. печ. л. 5,5. Уч.-изд. л. 6,6. Тираж 1100 экз. Зак. тип. 1323.
Зак. изд. 77126. Цена 1 руб.

Атомиздат, 103031 Москва К-31, ул. Жданова, 5

Московская типография № 6 Союзполиграфпрома при Государственном
комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
109088 Москва Ж-88, Южнопортовая ул., 24.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Широкое внедрение ЭВМ в практику реакторных расчетов повлекло за собой почти неконтролируемый рост числа программ, предназначенных для расчета реакторов. Необходимость проверки работоспособности и эффективности этих программ вызвала к жизни появление системы тестовых задач, целью которых является:

- 1) помощь в апробации отдельных программ, оценка их работоспособности и эффективности;
- 2) сравнение прохождения задач на различных ЭВМ;
- 3) помощь при внедрении программ, созданных в других организациях;
- 4) детальный анализ погрешностей вычислительных методов;
- 5) исследование алгоритмов и программ ускорения сходимости итерационных процессов.

Кроме того, тестовые задачи широко используются для сравнения различных систем констант и методов подготовки сечений, применяемых в разных странах и организациях. Однако литературы по тестовым задачам явно недостаточно, и настоящая книга предназначена частично восполнить этот пробел. Идея издания книги родилась при обсуждении этой проблемы с А. К. Кругловым, А. П. Рудиком, Я. В. Шевелевым. Авторы признательны П. А. Болобову, А. И. Воловику, А. С. Герасимову, В. С. Ионову, Б. П. Кочурову, А. М. Павловичеву, А. П. Рудику за предоставленные материалы по тестовым задачам; З. И. Баскаковой, Е. К. Волковой, Б. С. Голомысову, Н. А. Петушковой, Р. П. Петрушенко, В. И. Носову, Н. Ф. Хамьяновой за помощь при проведении расчетов; Е. К. Анисочкиной, Т. М. Кругловой, Т. В. Тугарёвой за помощь при оформлении работы.

ВВЕДЕНИЕ

Тесты, собранные в этой работе, предназначены в первую очередь для сравнения методов и программ решения уравнения переноса нейтронов в диффузионном приближении. В соответствии с особенностями применения тестов они могут быть классифицированы по типам реакторов, на основе которых создаются тесты, либо по специфике решаемой задачи (геометрия, граничные условия, приближение для уравнения переноса и т. д.).

В настоящей работе авторы придерживались второго подхода, хотя там, где это возможно, прототип рассматриваемого реактора оговаривается.

По определению, данному в работах [1—4], вычислительный тест — это математически строго определенная задача, для которой известно аналитическое или очень точное приближенное решение. Требование, чтобы задача была математически строго определена, направлено на ограничение различных математических формулировок проблемы. Например, многогрупповое диффузионное уравнение, записанное в матричной форме, может иметь или полную матрицу коэффициентов диффузии, или, в абсолютном большинстве случаев, только ее диагональ.

Обычно для тестовых задач описывается прототип теста, определяется сама задача и приводится ее решение, причем последнее должно быть получено, как правило, по двум или более различным программам. В описании прототипа теста приводится физическая проблема, на основе которой получена тестовая задача. В определении тестовой задачи даются ее математическое описание, включая уравнения, которые должны быть решены, коэффициенты этого уравнения, геометрия, начальные и (или) граничные условия.

Решение задачи приводится в аналитическом или в численном виде. Оно может включать результаты, показывающие, как точность решения зависит от некоторых незафиксированных параметров — числа узлов, точности итерационных процессов и т. д. В пределах этих требований, предъявляемых к тестовой задаче, допускается значительная гибкость при условии, что не будет потеряна основная цель — возможность повторения описываемых расчетов.

Для всех тестов дается формулировка задачи и ее решение. В некоторых случаях приводится несколько решений. Там, где это представлялось возможным и целесообразным, авторы повторяли

тестовые расчеты сами. В ряде случаев результаты расчетов несколько сокращены (например, нейтронные поля приводятся только в отдельных, представительных точках).

При описании тестов принималась во внимание форма, предложенная в работе [1], но с укрупнением «позиций», при этом авторы старались не упустить никакой информации, существенной для тестовой задачи.

Форма описания тестовой задачи и результатов ее решения еще не канонизирована. В публикациях последовательных версий отчета ANL=7416 [2, 3] эта форма постоянно изменяется и в последней редакции [3] выглядит следующим образом.

1. Идентификация тестовой задачи

- Номер
- Дата приемки
- Кем представлена
- Описательный заголовок

2. Теория

- Описание уравнений
- Ограничения
- Граничные условия
- Приближения и упрощения

3. Конфигурация

- Описание
- Приближения, сделанные по отношению к исходной задаче

4. Данные

5. Специальные проблемы, представляющие интерес

- Исходная проблема
- Другие проблемы

6. Ожидаемые результаты

- Основные результаты
- Вспомогательные результаты

7. Сводка доступных решений

- Наиболее точное известное решение с оцененной точностью
- Другие решения

8. Документация решения

- Литература
- Достаточные данные о том, как и откуда могут быть получены результаты и дополнительная информация

9. Характеристики ЭВМ

- Конфигурация, объем памяти
- Особенности программного обеспечения
- Детали решения (объем требуемой оперативной памяти, время центрального процессора и т. д.)

В работе [1] описание тестовой задачи и результаты решения даны отдельно. Решения приводятся в соответствии с требованиями, определенными в описании тестовой задачи.

Определение основных уравнений. Для обеспечения единой основы при задании исходных данных и описании тестовых задач приведем многогрупповые уравнения переноса в диффузионном и P_1 -приближениях. Уравнения дадим в плоской геометрии, так как основная цель их записи — правильная однозначная интерпретация задаваемых сечений.

P_1 -приближение. Если анизотропия потоков и сечений учтена в P_1 -приближении, то перенос нейтронов описывается системой уравнений, которая для группы g выглядит следующим образом:

$$\frac{d\Phi_{1,g}(x)}{dx} + \Sigma_{cfd}^g \Phi_{0,g}(x) = \sum_{l=1}^{g-1} \Sigma_s^{l \rightarrow g} \Phi_{0,l}(x) + \frac{\chi_g Q_f(x)}{k_{эф}}; \quad (B.1a)$$

$$\frac{d\Phi_{0,g}(x)}{dx} + 3\Sigma_{tr}^g \Phi_{1,g}(x) = 3 \sum_{l=1}^{g-1} \Sigma_{s1}^{l \rightarrow g} \Phi_{1,l}(x). \quad (B.16)$$

Здесь Σ_{cfd}^g — сечение увода из группы g за счет процессов деления, захвата и рассеяния; $\Sigma_s^{l \rightarrow g}$ — сечение перехода нейтронов из группы l в группу g вследствие упругого и неупругого рассеяния; $\Sigma_{s1}^{l \rightarrow g}$ — первая гармоника в разложении сечения рассеяния из группы l в группу g по полиномам Лежандра; Σ_{tr} — транспортное сечение в группе g ; χ_g — доля спектра нейтронов в группе g ; $\Phi_{0,g}(x)$, $\Phi_{1,g}(x)$ — нулевая и первая гармоники в разложении плотности потоков нейтронов по полиномам Лежандра; $k_{эф}$ — эффективный коэффициент размножения;

$$Q_f(x) = \sum_{l=1}^N \nu \Sigma_f^l \Phi_{0,l}(x),$$

где $\nu \Sigma_f^l$ — сечение размножения нейтронов в группе l .

Диффузионное приближение. Положим в уравнении (B.16) величину

$$\Sigma_{s1}^{l \rightarrow g} = 0,$$

т. е. предположим, что неупругое рассеяние изотропно, так же как и упругое замедление, приводящее к переходу в соседнюю группу. Тогда уравнения (B.1a) и (B.16) можно свести к одному

$$\nabla D_g \nabla \Phi_g(x) + \Sigma_{cfd}^g \Phi_g(x) = \sum_{l=1}^{g-1} \Sigma_s^{l \rightarrow g} \Phi_l(x) + \frac{\chi_g Q_f(x)}{k_{эф}}, \quad (B.2)$$

являющемуся уравнением диффузии. Здесь

$$D_g = 1/3\Sigma_{tr}^g$$

и индекс «0» у $\Phi_{0,g}$ опущен.

Следует отметить, что при изотропии всех переходов, упругих и неупругих ($\Sigma_{s1}=0$), диффузионное и P_1 -приближения становятся абсолютно эквивалентными.

Тестовые задачи. В данной работе описано 15 тестовых задач, каждой из которых посвящен отдельный параграф (см. § 1—15).

Задача 1. Трехмерная четырехгрупповая модель реактора на быстрых нейтронах типа SNR-300 мощностью 300 МВт (эл.) в треугольной и прямоугольной геометриях с управляющими стержнями.

Задача 2. Трехмерная двухгрупповая модель реактора с водой под давлением PWR с зонами двух обогачений и управляющими стержнями (модель МАГАТЭ 3D IAEA).

Задача 3. Разработана для советского реактора ВВЭР-440. Она содержит исходные данные и результаты расчета поля нейтронов, поля энерговыделения и $k_{эф}$.

Задача 4. Двухмерная четырехгрупповая модель реактора на быстрых нейтронах типа SNR-300. Рассматриваются треугольная и прямоугольная геометрии для верхнего и нижнего разреза активной зоны.

Задача 5. Двухмерная двухгрупповая модель реактора типа PWR (двухмерная модель МАГАТЭ 2D IAEA).

Задача 6. Двухмерная шестигрупповая модель большого реактора на быстрых нейтронах мощностью ~ 1500 МВт (эл.) в R, Z -геометрии. Активная зона содержит топливо двух обогачений. Управляющие стержни в расчете не учитываются. Количество продуктов деления соответствует $\sim 4\%$ -ному выгоранию топлива.

Задача 7. Модель сборки кассет реактора ВВЭР-440 в двухмерной гексагональной геометрии, в которой представлены шесть кассет для сектора в 30° с граничными условиями отражения на всех границах, кроме внешней, на которой заданы граничные условия первого рода. Каждая кассета содержит 169 твэлов. Приведены четырехгрупповые макросечения.

Задача 8. Шестизонная модель ячейки реактора в двухмерной прямоугольной геометрии с неразделяющимися переменными. Приведены четырехгрупповые макросечения и составы зон.

Задача 9. Трехгрупповая двухмерная модель гетерогенного реактора на тепловых нейтронах, в котором цилиндр из однородного замедлителя содержит цилиндрические блоки неоднородностей — твэлы и регулирующие стержни. Тест рассчитан на при-

менение метода Галанина — Фейнберга для расчета гетерогенных реакторов.

Задача 10. Три четырехгрупповые модели двух реакторов на быстрых нейтронах с объемом активной зоны 2500 и 10000 л в цилиндрической и сферической геометрии.

Задача 11. Одномерная цилиндрическая двухгрупповая модель ячейки хранилища кассет реактора типа ВВЭР-440.

Несколько особняком стоят четыре оптимизационные тестовые задачи.

Задача 12. Поиск максимума мощности реактора на тепловых нейтронах в одномерной плоской геометрии. Максимизация мощности осуществляется с помощью размещения поглотителя в объеме реактора.

Задача 13. То же, что и задача 12, но в цилиндрической геометрии.

Задача 14. Оптимизация ксенонового переходного процесса, когда требуется остановить реактор на тепловых нейтронах после длительной работы на мощности, варьируя мощность так, чтобы выделенная за заданный отрезок времени энергия была минимальна и отрицательная реактивность, связанная с образованием ксенона, не превосходила заданного значения.

Задача 15. Получение максимального количества определенного нуклида за счет варьирования режима облучения с помощью изменения энергетического спектра нейтронов. Рассматривается облучение потоком нейтронов ^{237}Np для получения ^{238}Pu .

Программы расчета. Описанные тестовые задачи решались с помощью различных программ, краткое описание которых приводится ниже.

ANANUSO и ARIENA — программы, составленные в СССР, основаны на методе Галеркина. В программе ANANUSO используются различные системы координатных функций в отдельных группах нейтронов и в аксиальных слоях реактора. В осевом направлении решение получается конечно-разностным методом.

CITATION [6] решает многогрупповое диффузионное трехмерное уравнение конечно-разностным методом итерации источника для разных геометрий расчетной ячейки. Расчетные ячейки в плане могут иметь форму правильного шестигранника или правильного треугольника, могут быть также использованы X , Y , Z - и R , Θ , Z -геометрии. Расчетные узлы расположены в центре расчетной ячейки. Программу можно применять для двухмерных расчетов. Внешние итерации ускоряются с помощью метода экстраполяции.

DIPOL-2 [7] рассчитывает групповые потоки в центрах ячеек координатной сетки в двухмерной R, Z - и X, Y -геометриях. Программа DIPOL-2 входит в стандартную ветвь PATH1 модульной системы PHUBER.

DIXY [8] решает конечно-разностное уравнение диффузии с

помощью обычной пятиточечной схемы с точками на краю интервала в X, Y -, R, Z - и R, Θ -геометриях методом итерации источника. Внутренние итерации ускоряются методом четырехлинейной блочной верхней релаксации.

D3D [8] использует для решения трехмерного уравнения диффузии семиточечную схему с точками на краю интервала. Решение находится методом итерации источника. Внутренние итерации организованы методом блочной верхней релаксации.

D3E [8] решает трехмерное конечно-разностное девятиточечное уравнение диффузии с использованием для ускорения внутренних итераций метода точечной верхней релаксации. Расчетная точка лежит на краю интервала.

HEXAGA-II [9] производит многогрупповой двухмерный нейтронно-физический расчет в диффузионном конечно-разностном приближении с использованием внутренних итераций AGA-метода [9]. При расчете используются правильные шестигранные, треугольные и ромбовидные ячейки. Расчетные точки лежат в узлах расчетных ячеек.

FD-1D [10] предназначена для решения одномерного уравнения переноса в P_1 -приближении и диффузионного уравнения конечно-разностным методом. Расчетная точка лежит на краю интервала.

FE-1D [10]. В программе реализован метод конечных элементов для решения уравнения переноса в P_1 -приближении и диффузионного уравнения в одномерной геометрии.

HEXAGA-III подобно программе D3E решает многогрупповое девятиточечное трехмерное конечно-разностное уравнение диффузии с использованием AGA-метода [9]. Расчетные точки лежат на краю расчетных интервалов.

JAR [11] * решает многогрупповое диффузионное уравнение конечно-разностным методом. Для процесса внутренних итераций реализовано несколько методов. Расчет можно производить в двух- или трехмерной геометрии, а элементарная расчетная ячейка в плане может иметь форму правильного шестигранника, квадрата или равностороннего треугольника. Расчетные узлы расположены в центре расчетной ячейки.

MCT и MCTB. Программа MCT [12] рассчитывает групповые потоки в узловых точках ячеек координатной сетки. Программа MCTB определяет групповые потоки в серединах расчетных интервалов. Программы MCT и MCTB являются процедурами системы программ для расчета реакторов RHEIN [12].

TRIBU [8] решает такое же двухмерное семиточечное конечно-разностное диффузионное уравнение, что и HEXAGA-II. Во внутренних итерациях используется обычный метод точечной верхней релаксации (SOR). Точки лежат в узлах расчетных ячеек.

* Программа разработана Л. Н. Ярославцевой в НПО «Энергия» Минэнерго СССР.

VENTURE [13] создана на основе программы CITATION [6] и по сравнимым в данной работе характеристикам существенно от нее не отличается.

V2DR [14] решает задачу диффузионного многогруппового расчета нейтронного поля реактора для двухмерной геометрии. Число групп не превышает 26. Решение находится в виде разложения по собственным функциям оператора Лапласа при краевом условии равенства нулю потоков на внешней границе реактора. Программа V2DR включена в автоматизированную систему для реакторных расчетов ФИХАР [15].

Б И П Р - 5 [5] предназначена для расчета создаваемых в Советском Союзе реакторов ВВЭР. Это — рабочая программа для выполнения проектных и эксплуатационных расчетов; с ее помощью имитируются все основные состояния активной зоны, включая поддержание критичности стержнями или жидким поглотителем при выгорании топлива или в переходных процессах, вызванных изменением концентраций ксенона и самария. Учитываются обратные связи по температуре и мощности. Программа решает трехмерное одnogрупповое диффузионное уравнение. Конечно-разностная сетка содержит одну точку на кассету в плане и десять точек по высоте. Организован процесс внешних и внутренних итераций. Внутренние итерации реализованы по методу точечной верхней релаксации. Для ускорения внешних итераций использован сдвиг спектра (перенос всего поглощения или его части в правую часть уравнения).

ДИГГЕР [31] предназначена для гетерогенного расчета цилиндрических реакторов конечного радиуса с произвольной расстановкой блоков в узлах квадратной или шестигранной решетки. Допускается любая симметрия, свойственная этим типам решеток. Блоки могут быть различного радиуса и содержать замедлитель. Граничные условия на их поверхностях задаются эффективными матрицами, учитывающими эффект утечки.

НИ-7000* решает двухмерное четырехгрупповое диффузионное уравнение методом точечной верхней релаксации. Для ускорения процесса внутренних итераций предусмотрена Чебышевская экстраполяция. Учитывается рассеяние нейтронов только в соседнюю энергетическую группу с меньшей энергией нейтронов; процесс сходимости внешних итераций ускоряется с помощью чебышевской экстраполяции.

Расчетные узлы расположены в центре расчетной ячейки, которая имеет форму правильного шестигранника с постоянными размерами по всему расчетному сечению реактора, расчетным сечением реактора является его угол симметрии 30° . Максимальное число расчетных узлов около 7000.

На внешней границе реактора задаются граничные условия третьего рода.

* Программа разработана В. С. Ионовым в Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова.

ПОЛЕ* решает многогрупповое диффузионное уравнение методом точечной верхней релаксации. Учитывается рассеяние нейтронов только в соседние энергетические группы с меньшей энергией нейтронов. Процесс внешних итераций ускоряется с помощью метода чебышевской экстраполяции. Расчет можно производить в одной из геометрий: X, Y, R, Z или R, Θ . Узлы сетки расположены на границе расчетных интервалов. Особенность программы — возможность введения локальных учащений сетки [17].

2D [18] предназначена для решения многогрупповых уравнений переноса нейтронов в диффузионном приближении в двухмерной геометрии конечно-разностным методом. Число групп не превышает 26. Используется равномерная в каждом направлении по каждой зоне реактора координатная сетка, для которой границы зон попадают на узлы разбиения.

9M [19] решает одномерное диффузионное уравнение и уравнение переноса в P_1 -приближении в цилиндрической, сферической и плоской геометрии. Уравнение решается конечно-разностным методом. Расчетные точки лежат на краю интервалов.

* Программа разработана П. А. Болобовым и Л. Қ. Шишковым в НПС «Энергия» Минэнерго СССР.

ТРЕХМЕРНЫЕ ТЕСТОВЫЕ ЗАДАЧИ

§ 1. Реактор на быстрых нейтронах типа SNR-300 в треугольной и прямоугольной геометриях

1.1. Прототип теста. Тест, взятый из работы [8], представляет собой трехмерную модель реактора-размножителя на быстрых нейтронах типа SNR-300 [20] с начальной загрузкой (рис. 1.1). Активная зона реактора состоит из двух зон с плутониевым топливом разного обогащения и содержит 18 регулирующих стержней. Часть стержней выведена и находится в верхнем торцевом экране над первой активной зоной.

1.2. Тестовая задача. Решается трехмерный аналог диффузионного уравнения (В.2). Четырехгрупповые макросечения (табл. 1.1 и 1.2) получены из 26-групповой системы констант KFK INR [21] с весом плотности потоков нейтронов из одномерных расчетов. Для их расчета использовался состав реактора, приведенный в табл. 1.3.

На рис. 1.1 и 1.2 приведены данные о конфигурации, размерах и граничных условиях для модели в треугольной и X, Y, Z -геометриях. Горизонтальный разрез «треугольной» модели (см. рис. 1.2) представляет собой сектор 120° . Однако имеющаяся симметрия позволяет проводить расчет и для секторов 60° и 30° . Непрерывные полужирные линии отделяют первую зону от второй и вторую от третьей. Выделенные шестигранные кассеты — проекции регулирующих стержней — имеют состав зоны 5 или 6.

Горизонтальный разрез прямоугольной модели представляет собой сектор 90° , и имеющаяся симметрия позволяет использовать для расчета сектор 45° . Эта модель является модификацией исходной «треугольной» модели. Стержни, расположенные во второй активной зоне, погружены на половину ее высоты. Рассчитывается максимальное собственное значение ($k_{эф}$) как функция интервала.

Геометрические характеристики вычислительных моделей при изменении интервала приведены в табл. 1.4. Модель В1 соответствует размерам ячеек, приведенных на рис. 1.2. Модели В2, В3 и В4 получаются из модели В1 делением размера стороны ячейки соответственно на 2, 3, 4. При расчетах использованы следующие критерии: для максимального относительного изменения плотности потока во внешних итерациях взята точность 10^{-4} , а для относительного изменения $k_{эф}$ 10^{-5} .

1.3. Решения. Расчеты данного теста проводились по нескольким программам, которые различаются только принятой численной схемой (точка в центре интервала — CITATION, JAR; точка

Таблица 1.1

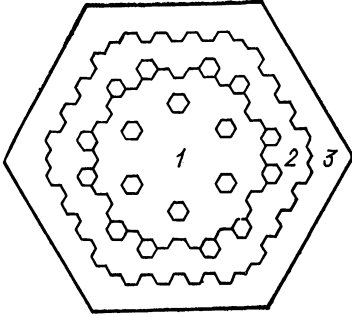
Четырехгрупповые макросечения тестовой задачи 1

Зона	Группа 1	Группа 2	Группа 3	Группа 4	Сечения рассеяния $\Sigma_s^{i \rightarrow j}$, см ⁻¹		
					$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$
Сечение размножения $\nu \Sigma_f$, см ⁻¹							
1	0, 11878 · 10 ⁻¹	0, 53252 · 10 ⁻²	0, 10471 · 10 ⁻¹	0, 26611 · 10 ⁻¹	0, 23597 · 10 ⁻¹	—	—
2	0, 14943 · 10 ⁻¹	0, 76887 · 10 ⁻²	0, 14809 · 10 ⁻¹	0, 38159 · 10 ⁻¹	0, 23262 · 10 ⁻¹	—	—
3	0, 77427 · 10 ⁻²	0, 10825 · 10 ⁻³	0, 29742 · 10 ⁻³	0, 84687 · 10 ⁻³	0, 32071 · 10 ⁻¹	—	—
4	0, 54279 · 10 ⁻²	0, 75857 · 10 ⁻⁴	0, 21218 · 10 ⁻³	0, 57592 · 10 ⁻³	0, 26322 · 10 ⁻¹	—	—
5	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0	0, 22946 · 10 ⁻¹	—	—
6	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0	0, 12942 · 10 ⁻¹	—	—
Сечение увода Σ_{ef} , см ⁻¹							
1	0, 28204 · 10 ⁻¹	0, 52747 · 10 ⁻²	0, 17612 · 10 ⁻¹	0, 26546 · 10 ⁻¹	0, 40791 · 10 ⁻⁵	0, 16153 · 10 ⁻²	—
2	0, 28782 · 10 ⁻¹	0, 60491 · 10 ⁻²	0, 19510 · 10 ⁻¹	0, 33714 · 10 ⁻¹	0, 46451 · 10 ⁻⁵	0, 15718 · 10 ⁻²	—
3	0, 35959 · 10 ⁻¹	0, 58855 · 10 ⁻²	0, 16041 · 10 ⁻¹	0, 13349 · 10 ⁻¹	0, 38880 · 10 ⁻⁵	0, 27776 · 10 ⁻²	—
4	0, 29093 · 10 ⁻¹	0, 44909 · 10 ⁻²	0, 13082 · 10 ⁻¹	0, 99562 · 10 ⁻¹	0, 28907 · 10 ⁻⁵	0, 22889 · 10 ⁻²	—
5	0, 24814 · 10 ⁻¹	0, 16412 · 10 ⁻¹	0, 72122 · 10 ⁻¹	0, 16868	0, 10320 · 10 ⁻⁵	0, 37687 · 10 ⁻²	—
6	0, 13159 · 10 ⁻¹	0, 14559 · 10 ⁻²	0, 46001 · 10 ⁻²	0, 78660 · 10 ⁻³	0, 68780 · 10 ⁻⁵	0, 12871 · 10 ⁻²	—
Коэффициент диффузии D , см							
1	2, 87679	1, 57085	0, 722486	0, 964199	0, 44493 · 10 ⁻⁷	0, 42309 · 10 ⁻⁷	0, 46838 · 10 ⁻²
2	2, 87654	1, 57136	0, 712708	0, 942978	0, 49968 · 10 ⁻⁷	0, 40724 · 10 ⁻⁷	0, 43414 · 10 ⁻²
3	2, 28561	1, 17193	0, 632475	0, 818357	0, 45039 · 10 ⁻⁷	0, 90018 · 10 ⁻⁷	0, 58971 · 10 ⁻²
4	2, 71665	1, 44094	0, 720346	0, 987683	0, 33248 · 10 ⁻⁷	0, 62133 · 10 ⁻⁷	0, 53536 · 10 ⁻²
5	2, 50307	1, 31468	0, 574277	0, 615369	0, 10489 · 10 ⁻⁷	0, 70361 · 10 ⁻¹¹	0, 86815 · 10 ⁻²
6	4, 61642	2, 90183	1, 02118	1, 72963	0, 69903 · 10 ⁻⁸	0, 43633 · 10 ⁻¹¹	0, 34533 · 10 ⁻²
Спектр нейтронов деления χ							
1-6	0, 768	0, 232	0, 0	0, 0	—	—	—

Таблица 1.2

Границы четырехгруппового разбиения
в тестовой задаче 1

Группа	Энергия, кэВ	Группы БНАБ-26 [23]
1	10500—800	1—5
2	800—10	6—11
3	10—1	12—14
4	1	15—26



4	4	5	4	5	4	5	4	4
	5						5	
3	2	1	1	1	1	1	2	3
		6	6	6	6	6		
	6						6	
4	4	4	4	4	4	4	4	4

Рис. 1.1. Геометрическая модель реактора типа SNR-300 (цифры на рисунке — номера физических зон)

Таблица 1.3

Состав реактора SNR-300, использованный в тестовой задаче 1
(концентрации, 10^{24} ядер/см³)

Состав	Зона 1	Состав	Зона 2	Состав	Зона 3
⁵² Cr	$0,334470 \cdot 10^{-2}$	⁵² Cr	$0,334470 \cdot 10^{-2}$	⁵² Cr	$0,382146 \cdot 10^{-2}$
⁵⁶ Fe	$0,110890 \cdot 10^{-1}$	⁵⁶ Fe	$0,110890 \cdot 10^{-1}$	⁵⁶ Fe	$0,123953 \cdot 10^{-1}$
⁹⁶ Mo	$0,156334 \cdot 10^{-3}$	⁹⁶ Mo	$0,156334 \cdot 10^{-3}$	⁹⁶ Mo	$0,207136 \cdot 10^{-3}$
²³ Na	$0,103501 \cdot 10^{-1}$	²³ Na	$0,103501 \cdot 10^{-1}$	²³ Na	$0,699362 \cdot 10^{-2}$
⁹³ Nb	$0,104014 \cdot 10^{-3}$	⁹³ Nb	$0,104014 \cdot 10^{-3}$	⁹³ Nb	$0,118841 \cdot 10^{-3}$
⁵⁹ Ni	$0,247123 \cdot 10^{-2}$	⁵⁹ Ni	$0,247123 \cdot 10^{-2}$	⁵⁹ Ni	$0,310313 \cdot 10^{-2}$
¹⁶ O	$0,124809 \cdot 10^{-1}$	¹⁶ O	$0,125310 \cdot 10^{-1}$	¹⁶ O	$0,196203 \cdot 10^{-1}$
²⁴⁰ Pu	$0,305554 \cdot 10^{-3}$	²⁴⁰ Pu	$0,443006 \cdot 10^{-3}$	²³⁵ U	$0,245254 \cdot 10^{-4}$
²⁴¹ Pu	$0,347220 \cdot 10^{-4}$	²⁴¹ Pu	$0,503416 \cdot 10^{-4}$	²³⁸ U	$0,978563 \cdot 10^{-2}$
²⁴² Pu	$0,694441 \cdot 10^{-5}$	²⁴² Pu	$0,100683 \cdot 10^{-4}$		
²³⁹ Pu	$0,104166 \cdot 10^{-2}$	²³⁹ Pu	$0,151025 \cdot 10^{-2}$		
²³⁵ U	$0,121290 \cdot 10^{-4}$	²³⁵ U	$0,106296 \cdot 10^{-4}$		
²³⁸ U	$0,483946 \cdot 10^{-2}$	²³⁸ U	$0,424120 \cdot 10^{-2}$		
⁵¹ V	$0,658087 \cdot 10^{-4}$	⁵¹ V	$0,658087 \cdot 10^{-4}$		

Состав	Зона 4	Состав	Зона 5	Состав	Зона 6
^{52}Cr	$0,336830 \cdot 10^{-2}$	^{10}B	$0,604851 \cdot 10^{-2}$	^{52}Cr	$0,260524 \cdot 10^{-2}$
^{56}Fe	$0,111654 \cdot 10^{-1}$	^{11}B	$0,247954 \cdot 10^{-1}$	^{56}Fe	$0,845038 \cdot 10^{-2}$
^{98}Mo	$0,157626 \cdot 10^{-3}$	^{12}C	$0,771097 \cdot 10^{-2}$	^{98}Mo	$0,141213 \cdot 10^{-3}$
^{23}Na	$0,995783 \cdot 10^{-2}$	^{52}Cr	$0,410375 \cdot 10^{-2}$	^{23}Na	$0,189532 \cdot 10^{-1}$
^{93}Nb	$0,104749 \cdot 10^{-3}$	^{56}Fe	$0,133110 \cdot 10^{-1}$	^{93}Nb	$0,810186 \cdot 10^{-4}$
^{58}Ni	$0,249052 \cdot 10^{-2}$	^{96}Mo	$0,222437 \cdot 10^{-3}$	^{58}Ni	$0,211552 \cdot 10^{-2}$
^{16}O	$0,138479 \cdot 10^{-1}$	^{23}Na	$0,958653 \cdot 10^{-2}$		
^{235}U	$0,173099 \cdot 10^{-4}$	^{93}Nb	$0,127620 \cdot 10^{-3}$		
^{238}U	$0,690663 \cdot 10^{-2}$	^{58}Ni	$0,333236 \cdot 10^{-2}$		
^{51}V	$0,657752 \cdot 10^{-4}$				

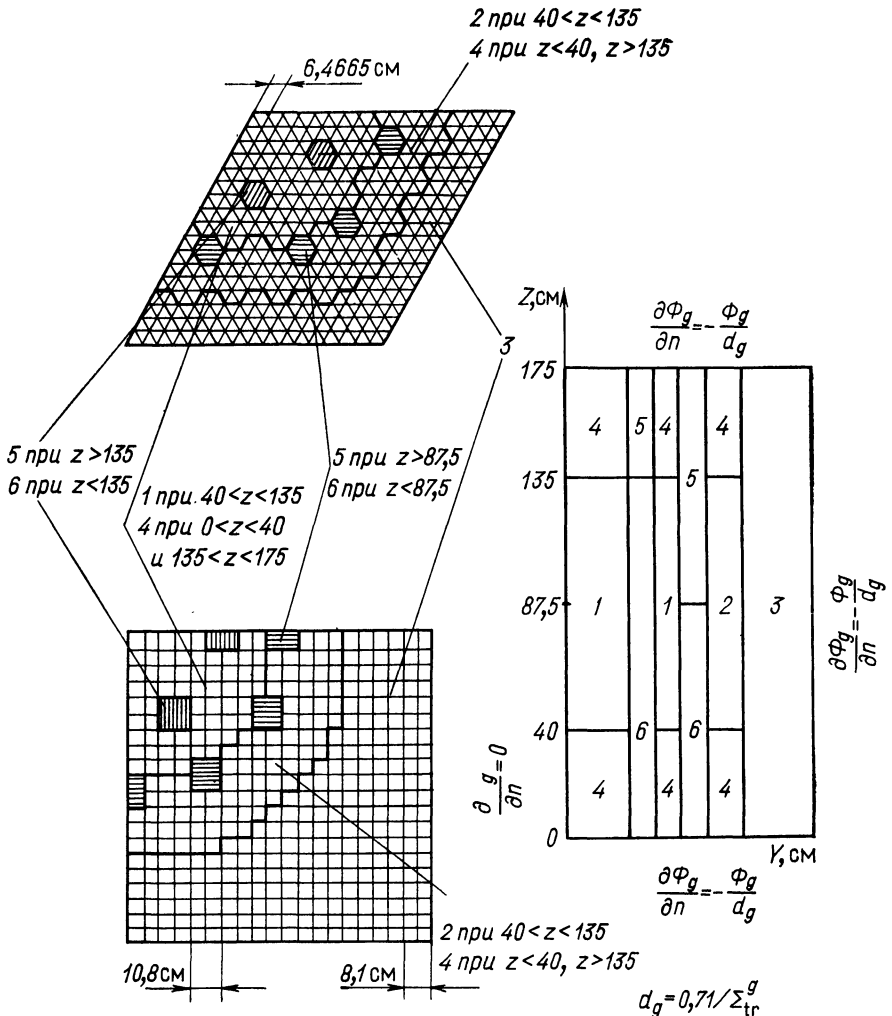


Рис. 1.2. Расчетная модель тестовой задачи 1 в Δ , Z- и X, Y, Z-геометриях

Таблица 1.4

Вычислительные модели, использованные в тестовой задаче 1

Модель	Геометрия ^а	Число расчетных точек по высоте		Сторона ячейки, см	Шаг решетки, см	Площадь на одну расчетную точку, см ²	
		КРТК ^б	КРТЦ ^б			КРТК	КРТЦ
B1	△	19	18	6,46650	3,73333	32,30	18,11
	□	19	18	5,4	5,4	27,72	27,72
B2	△	37	36	3,23325	1,86667	8,55	4,53
	□	37	36	2,7	2,7	6,93	7,29
B3	△	55	54	2,15550	1,24444	3,87	2,01
	□	55	54	1,8	1,8	3,08	3,19
B4	△	73	72	1,61662	0,93333	2,20	1,13
	□	73	72	1,35	1,35	1,73	1,78

^а △ — треугольная геометрия; □ — X, Y-геометрия.

^б КРТК, КРТЦ — обозначение конечно-разностного (КР) метода, реализованного в программах (ТК — точка на краю, ТЦ — точка в центре ячейки).

на краю интервала — HEXAGA-III, D3E, D3D). Все результаты (табл. 1.5, рис. 1.3), кроме расчетов по программе JAR, выпол-

Таблица 1.5

Расчеты $k_{эф}$ в трехмерной геометрии тестовой задачи 1, выполненные по разным программам

Модель	△-Z				XYZ		
	CITATION	JAR	D3E	HEXAGA-III	CITATION	JAR	D3D
B1	1,014344	1,01414	1,007353	1,007901	1,0192461	1,01905	1,008466
B2	S ^а	—	1,010481	1,010916	S ^а	—	1,012151
B3	S ^а	—	1,011139	—	S ^а	—	1,012776

^а Требуется слишком большая оперативная память (более 32 800 К байтов).

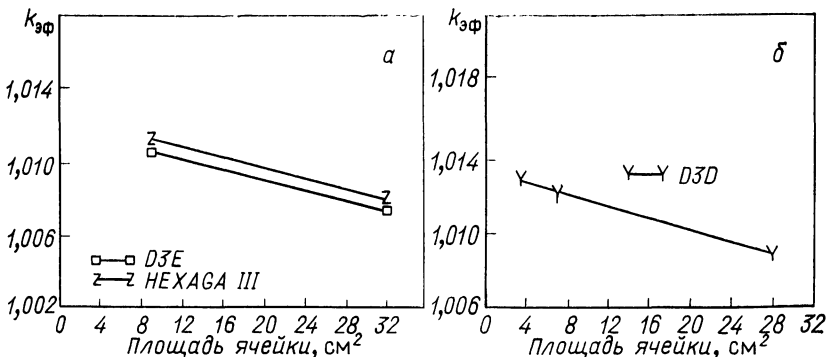


Рис. 1.3. $k_{эф}$ как функция площади ячейки (тестовая задача 1):
а — трехмерная $\Delta-Z$ -геометрия; б — трехмерная X, Y, Z-геометрия

ненных специально для данной работы, взяты из [8]. Там же для некоторых программ дополнительно приведены время расчета и требуемая память ЭВМ. Во всех программах при расчетах использована точность для $k_{эф}$ 10^{-5} . Во всех программах, кроме JAR, при оценке максимального изменения плотности потока нейтронов во внешних итерациях использована точность 10^{-4} . В JAR во внутренних итерациях для относительного изменения плотности потока нейтронов взята точность 10^{-5} .

§ 2. Легководный реактор PWR в прямоугольной геометрии (тест МАГАТЭ 3D)

2.1. Прототип теста. Трехмерный тест МАГАТЭ, впервые рассмотренный в 1971 г. на семинаре по физике выгорания, представляет собой упрощенную двухгрупповую модель легководного реактора в прямоугольной геометрии. Модель описывает 1/4 часть реактора PWR (легководный реактор с водой под давлением) среднего размера с двумя зонами разного обогащения по радиусу, содержащего во всей активной зоне 177 топливных кассет (рис. 2.1).

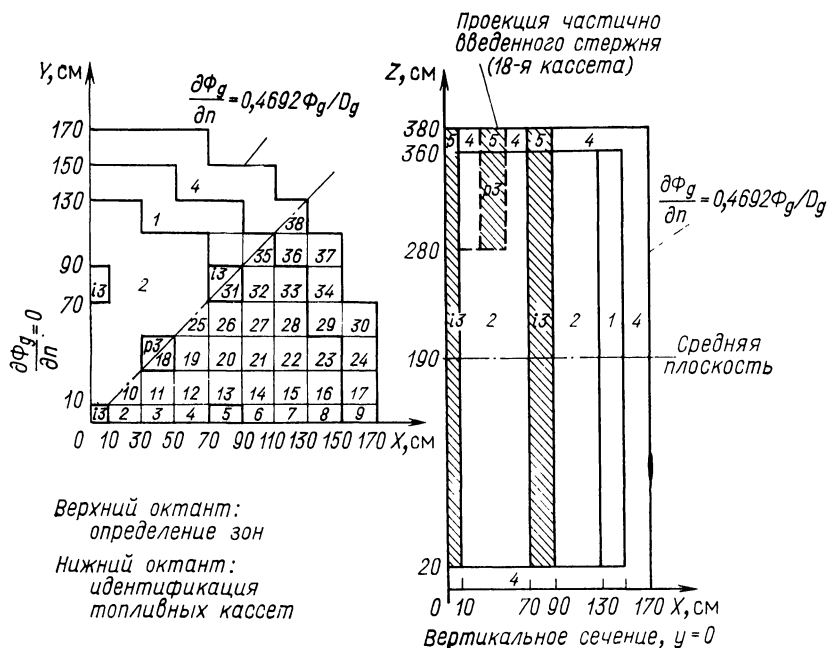


Рис. 2.1. Геометрическая модель тестовой задачи 2

Активная зона окружена чистой водой без стального экрана. Управляющие стержни, введенные как частично, так и полностью, представлены в виде поглотителя, добавленного в определенные

кассеты, что сильно деформирует поле тепловыделения. Кроме того, существование большого всплеска тепловых нейтронов в отражателе затрудняет процесс нахождения решения. Двухгрупповые сечения даны для чистой, невыгоревшей, активной зоны без учета эффектов обратной связи. Состав кассет не приводится.

2.2. Тестовая задача. Решается трехмерный аналог диффузионного уравнения (В.2). Вся необходимая для расчета информа-

Таблица 2.1

Групповые константы для тестовой задачи 2 (МАГАТЭЗД)

$$(\nu\Sigma_f^1 = 0; \chi_1 = 1; \chi_2 = 0)$$

Зона	D_1 , см	D_2 , см	$\Sigma_s^{1 \rightarrow 2}$, см ⁻¹	Σ_{cfd}^1 , см ⁻¹	Σ_{cfd}^2 , см ⁻¹	$\nu\Sigma_f^2$, см ⁻¹	Состав
1	1,5	0,4	0,02	0,03	0,08	0,135	Топливо 1
2	1,5	0,4	0,02	0,03	0,085	0,135	Топливо 2
3	1,5	0,4	0,02	0,03	0,13	0,135	Топливо 2+ + стержень
4	2,0	0,3	0,04	0,04	0,01	0	Отражатель
5	2,0	0,3	0,04	0,04	0,055	0	Отражатель+ + стержень

ция содержится в табл. 2.1 и рис. 2.1. Рассчитываются и приводятся в решении следующие величины.

1. Эффективный коэффициент размножения $k_{эф}$ как функция расчетного интервала.

2. Плотности потоков нейтронов, усредненные по объемам блоков размером $20 \times 20 \times 20$ см. Эти величины приводятся для кассет 1, 5, 11, 18, 22, 29, 37, и в каждой из этих кассет берутся блоки с координатами центра блока по высоте Z , равными 10, 110, 210, 290, 310 и 370 см (см. рис. 2.1). Плотности потоков нейтронов нормируются так, что

$$\frac{1}{V_{a.z}} \int_{V_{a.z}} \sum_g \nu \Sigma_f^g \Phi_g dV = 1,$$

где $V_{a.z}$ — объем активной зоны.

Внимание! При нормировке потоков кассеты с составом 3 не учитываются (хотя в них $\nu\Sigma_f \neq 0$). Отнормированные плотности потоков интегрируются по объему блока и делятся на его объем.

3. Максимум энерговыделения и его местоположение. Величина

$$q_{\max} = \nu \Sigma_f^{(2)} \Phi_{2, \max} \quad (2.1)$$

соответствует максимуму плотности потока нейтронов тепловой группы в активной зоне.

4. Средние мощности кассет (тепловыделение)

$$P_k = \frac{1}{V_k} \int_{V_k} \sum_g v \Sigma_f^g \Phi_g dV,$$

где V_k — объем k -й кассеты (см. рис. 2.1).

5. Число неизвестных в задаче (число расчетных узлов, умноженное на число групп). Число итераций (полное) и число внешних итераций.

6. Тип и численные значения критериев сходимости.

7. Зависимость рассчитанных характеристик от числа пространственных точек.

2.3. Решения. Результаты расчета тестовой задачи 2 приведены в табл. 2.2—2.6. Данные получены по программам VENTURE и JAR.

Таблица 2.2

Результаты расчета тестовой задачи 2 (тест МАГАТЭ 3D)

Число интервалов	Число неизвестных	$k_{эф}$		Максимум тепловыделения q_{\max}	Время счета центрального процессора, мин
		SITATION	JAR	SITATION	SITATION; IBM 360/91 (или 195)
9×9×10	1 620	1,03176	—	2,3765	0,3—1
17×17×19	10 982	1,02913	1,02820	2,5672	1,6—5
34×34×38	87 856	1,02864	—	2,5035	49
68×68×76	702 848	1,02887	—	2,4081	192
102×102×114	2 372 112	1,02896	—	2,3780	360(195)
Экстраполяция	—	1,02903	—	2,354	—

Результаты расчетов по первой программе взяты из работы [3]. В обеих программах конечно-разностная схема реализована для точки, находящейся в центре расчетного интервала. При расчетах по программе VENTURE максимальное относительное изменение плотности потоков во внешних итерациях принималось равным 10^{-5} , что превышает обычно используемую точность. В программе JAR используются две точности — для оценки изменения плотности потоков во внутренних итерациях и для оценки изменения $k_{эф}$ во внешних итерациях. В наших расчетах обе точности принимались равными 10^{-5} . В программе JAR задача решалась методом верхней точечной релаксации без ускорения сходимости внешних итераций.

Результаты расчета $k_{эф}$ приведены в табл. 2.2. Там же даны оценки максимума тепловыделения [см. формулу (2.1)].

Тепловыделения по отдельным кассетам (см. табл. 2.3) оценивались только по программе VENTURE. Они получены умножением плотности потока нейтронов тепловой группы на 0,135 и приведены также для кассет, где нет делящихся материалов (номера таких кассет взяты в скобки). Для 18-й кассеты резуль-

таты даны как для всей кассеты, так и отдельно для ее стержневой (18*) и бесстержневой (18**) частей.

Таблица 2.3

Усредненное по оси Z тепловыделение в кассетах тестовой задачи 2.
Программа VENTURE

Номер кассеты	Число точек				Экстраполяция
	17×17×19	34×34×39	68×68×76	102×102×114	
1	0,7656	0,7500	0,7367	0,7325	0,729
2	1,4485	1,3780	1,3138	1,2957	1,281
3	1,5651	1,5080	1,4508	1,4347	1,422
4	1,3178	1,2657	1,2181	1,2044	1,193
5	0,5802	0,6058	0,6092	0,6098	0,610
6	0,9707	0,9631	0,9569	0,9548	0,953
7	0,9101	0,9317	0,9500	0,9551	0,959
8	0,6574	0,7056	0,7522	0,7659	0,777
(9)	0,9134	1,0125	1,0775	1,0954	1,110
10	1,5604	1,4903	1,4278	1,4109	1,397
11	1,5742	1,5158	1,4595	1,4441	1,432
12	1,4045	1,3557	1,3121	1,3002	1,291
13	1,1406	1,1119	1,0852	1,0779	1,072
14	1,0619	1,0575	1,0555	1,0553	1,055
15	0,9537	0,9438	0,9643	0,9707	0,976
16	0,6366	0,6850	0,7318	0,7460	0,757
(17)	0,8650	0,9595	1,0230	1,0413	1,056
18	1,4797	1,4369	1,3914	1,3786	1,368
19	1,4030	1,3657	1,3292	1,3192	1,311
20	1,2226	1,2067	1,1894	1,1847	1,181
21	1,0755	1,0810	1,0859	1,0877	1,089
22	0,9420	0,9602	0,9855	0,9935	1,000
23	0,5459	0,6138	0,6761	0,6953	0,711
(24)	0,6494	0,7255	0,7825	0,7993	0,813
25	1,2480	1,2180	1,1913	1,1841	1,178
26	1,0083	1,0252	0,9790	0,9753	0,972
27	0,8970	0,9062	0,9168	0,9204	0,923
28	0,7383	0,7898	0,8390	0,8541	0,866
(29)	1,4827	1,6009	1,6807	1,7039	1,722
(30)	0,2759	0,3289	0,3683	0,3802	0,390
31	0,4244	0,4542	0,4685	0,4727	0,476
32	0,6720	0,6783	0,6924	0,6969	0,700
33	0,4725	0,5284	0,5812	0,5976	0,611
(34)	0,6681	0,7462	0,8046	0,8220	0,836
35	0,4717	0,5210	0,5699	0,5852	0,597
(36)	0,9891	1,0610	1,1196	1,1373	1,151
(37)	0,2180	0,2599	0,2917	0,3017	0,309
(38)	0,2560	0,2996	0,3344	0,3451	0,345
18* (стержневая часть)	0,3042	0,3106	0,3095	0,3094	0,309
18** (бесстержневая часть)	1,8414	1,7834	1,7242	1,7076	1,694

Таблица 2.4
 Плотность потоков нейтронов первой группы, усредненная по объемам блоков $20 \times 20 \times 20$ см. Задача 2 (тест МАГАТЭ 3D).
 Программа VENTURE

Номер кассеты	Координаты центральной точки блока см						
	x, y	$z=10$	$z=110$	$z=210$	$z=290$	$z=310$	$z=370$
1	0; 0	0,491809	31,956508	53,121790	37,075704	29,209624	1,009072
		0,581252	31,809071	53,561368	37,168147	29,139970	1,255014
		0,649134	30,540113	51,640925	36,013788	28,326066	1,479058
		0,680524	30,127386	50,985732	35,650542	28,098573	1,583564
		0,705636	29,797182	50,461542	35,359919	27,916550	1,667168
5	80; 0	0,446127	25,961447	41,234147	28,704355	12,611087	0,780977
		0,550602	26,590854	42,502183	29,402919	13,047059	0,992144
		0,639062	26,223190	41,894611	29,114232	22,892669	1,194446
		0,677828	26,065277	41,615938	28,994515	22,845432	1,286432
		0,708841	25,938928	41,392969	28,698720	22,807626	1,360019
11	40; 20	0,568600	47,048406	79,615783	55,529646	43,746315	1,309604
		0,669316	44,809402	77,212984	53,537208	41,973249	1,603843
		0,770187	42,822543	74,214947	51,708317	40,666575	1,910802
		0,818119	42,255025	73,316367	51,215985	40,362947	2,056046
		0,856468	41,800981	72,597452	50,822082	40,120016	2,172241

Координаты центральной точки блока, см

Номер кассеты	x, y	Координаты центральной точки блока, см						
		z=10	z=110	z=210	z=290	z=310	z=370	
18	30; 30	0,462309	45,277808	78,297979	54,587618	43,002997	1,286779	
		0,555361	43,052014	76,246544	52,841891	41,423420	1,581828	
		0,630505	41,169672	73,574749	51,232734	40,290352	1,891479	
		0,664297	40,631224	72,761714	50,798656	40,031774	2,037355	
		0,691330	40,200436	72,111234	50,451357	39,824883	2,154057	
22	120; 40	0,460142	28,504175	43,060691	29,901957	23,552370	0,682350	
		0,595724	29,089679	43,998947	30,350424	23,784358	0,880098	
		0,751906	29,792924	44,921530	31,116318	24,457686	1,111142	
		0,821690	29,999004	45,163620	31,361645	24,699955	1,215613	
		0,877516	30,163846	45,357260	31,557885	24,893752	1,299190	
29	140; 60	0,109184	3,884538	5,834089	4,050017	3,190168	0,159082	
		0,167344	4,979320	7,481450	5,158662	4,042612	0,227838	
		0,203544	5,774875	8,646719	5,986654	4,705198	0,294470	
		0,221676	6,008543	8,982030	6,234157	4,909401	0,320937	
		0,236181	6,195473	9,250276	6,432154	5,072760	0,342111	
37	140; 100	0,072370	2,602432	3,928199	2,727919	2,148913	0,107143	
		0,102866	3,298589	4,982505	3,436938	2,693614	0,152056	
		0,133076	3,839640	5,778844	4,002635	3,146080	0,197069	
		0,144975	4,002296	6,013660	4,175522	3,288398	0,215018	
		0,154494	4,132418	6,201508	4,313829	3,402249	0,229377	

Плотность потоков нейтронов второй группы, проинтегрированная по объемам блоков $20 \times 20 \times 20$ см.
Задача 2 (тест МАГАТЭ 3D). Программа VENTURE

Номер кассеты	Координаты центральной точки блока, см						
	x, y	$z=10$	$z=110$	$z=210$	$z=290$	$z=310$	$z=370$
1	0; 0	0,489074	5,187528	8,623846	6,018895	4,741911	3,621994
		0,598900	5,256816	8,852372	6,142962	4,816104	3,977359
		0,650410	5,131679	8,678104	6,051990	4,760094	4,041360
		0,665694	5,092102	8,618440	6,026220	4,749665	4,067709
		0,677921	5,060437	8,570702	6,005600	4,741319	4,088784
		0,444362	4 214361	6,693975	4,859882	3,670699	2,803161
		0,568363	4,394492	7,024539	4,859562	3,809098	3,144.40
		0,641590	4,406364	7,040233	4,892539	3,847028	3,263493
		0,664428	4,405604	7,034584	4,901115	3,861698	3,304265
		0,682698	4,404993	7,030060	4,907973	3,873432	3,336879
11	40; 20	1,851758	11,042186	18,686847	13,033518	10,267824	4,489504
		1,918753	10,514643	18,122127	12,565352	9,850551	4,914110
		1,9086.6	10,046019	17,418820	12,136344	9,544762	5,084412
		1,910755	9,911549	17,208017	12,020872	9,473564	5,160401
		1,912464	9,803966	17,039936	11,928487	9,416598	5,221188

Номер кассеты	Координаты центральной точки блока, см									
	x, y	z=10	z=110	z=210	z=290	z=310	z=370			
18	30; 30	0,459863	10,610146	18,377556	12,812423	10,093366	4,409653			
		0,572516	10,069660	17,895778	12,402175	9,722215	4,845202			
		0,632135	9,603498	17,268563	12,024723	9,456460	5,031638			
	120; 40	0,650258	9,462125	17,077845	11,922929	9,395840	5,112116			
		0,664755	9,349020	16,925260	11,841485	9,347336	5,176490			
		1,554313	7,061811	10,667870	7,407909	5,834866	2,311972			
22	120; 40	1,805690	7,215840	10,913619	7,528182	5,699522	2,674956			
		1,983126	7,397035	11,152413	7,725041	6,071943	2,938253			
		2,045233	7,449259	11,214051	7,787014	6,132928	3,033758			
	140; 60	2,094912	7,491032	11,263353	7,836588	6,181712	3,110160			
		0,522691	11,158905	16,746573	11,624982	9,157071	0,761922			
		0,670813	12,092477	18,155047	12,517825	9,809688	0,971634			
37	140; 100	0,790957	12,694579	18,992543	13,149009	10,334337	1,144387			
		0,835956	12,862636	19,212666	13,334226	10,500553	1,210321			
		0,871955	12,997073	19,388750	13,482391	10,633518	1,263067			
	140; 100	0,346653	7,420699	11,191407	7,771507	6,122118	0,514145			
		0,440264	7,987387	12,053949	8,314438	6,516269	0,651562			
		0,519539	8,429346	12,674627	8,778419	6,899800	0,769865			
		0,549282	8,558141	12,846810	8,919556	7,024424	0,815073			
		0,573076	8,661171	12,984547	9,032458	7,124118	0,851239			

Тепловыделение, усредненное по объемам блоков $20 \times 20 \times 20$ см (тест МАГАТЭ 3D). Программа VENTURE

Номер кассеты	Координаты центральной точки блока, см						
	x, y	$z=10$	$z=110$	$z=210$	$z=290$	$z=310$	$z=370$
1	0; 0	0,066025	0,700316	1,164219	0,812551	0,640158	0,488969
		0,080852	0,709670	1,195070	0,829300	0,650174	0,536943
		0,087805	0,692777	1,171544	0,817019	0,642613	0,545584
		0,089868	0,687434	1,163489	0,813540	0,641205	0,549141
5	80; 0	0,091519	0,683159	1,157045	0,810756	0,640078	0,551986
		0,059989	0,568939	0,903687	0,629084	0,495544	0,378427
		0,076729	0,593256	0,948318	0,656041	0,514228	0,424459
		0,086615	0,594859	0,950431	0,660493	0,519349	0,440572
11	40; 20	0,089698	0,594757	0,949669	0,661651	0,521329	0,446076
		0,092166	0,594674	0,949058	0,662576	0,522913	0,450479
		0,249987	1,490695	2,522724	1,759525	1,386156	0,606083
		0,259032	1,419477	2,446487	1,696322	1,329824	0,663405
		0,257663	1,356212	2,351541	1,638406	1,288543	0,686396
		0,257952	1,338059	2,323082	1,622818	1,278931	0,696654
		0,258183	1,323535	2,300314	1,610346	1,271241	0,704860

Координаты центральной точки блока, см

Номер кассеты	x, y	Координаты центральной точки блока, см						
		z=10	z=110	z=210	z=290	z=310	z=370	
18	30; 30	0,062082	1,432370	2,280970	1,729677	1,362604	0,595303	
		0,077290	1,359404	2,415930	1,674292	1,312499	0,654102	
		0,085338	1,296462	2,331256	1,623337	1,276622	0,679271	
		0,087785	1,277387	2,305509	1,609595	1,268438	0,690136	
		0,089742	1,262118	2,284910	1,598600	1,261890	0,698827	
		0,209832	0,953344	1,440162	1,000068	0,787707	0,312116	
22	120; 40	0,243768	0,974138	1,473339	1,016305	0,796435	0,361119	
		0,267722	0,998600	1,505576	1,042880	0,819712	0,396664	
		0,276106	1,005650	1,513897	1,051247	0,827945	0,409557	
		0,282814	1,011289	1,520553	1,057939	0,834531	0,419872	
		0,070563	1,506452	2,260787	1,569372	1,236205	0,102859	
		0,090560	1,632484	2,450931	1,689906	1,324308	0,131171	
29	140; 60	0,106779	1,713768	2,563993	1,775116	1,395135	0,154492	
		0,112854	1,736456	2,593710	1,800120	1,417575	0,163393	
		0,117714	1,754605	2,617481	1,820123	1,834531	0,170514	
		0,046798	1,001794	1,510840	1,049153	0,826486	0,069410	
		0,059436	1,078297	1,627283	1,122449	0,879696	0,087961	
		0,070138	1,137962	1,711075	1,185087	0,931473	0,103932	
37	140; 100	0,074153	1,155349	1,734319	1,204140	0,948297	0,110035	
		0,077365	1,169258	1,752914	1,219382	0,961756	0,114917	

В табл. 2.4—2.6 приведены результаты расчетов плотности потоков нейтронов и тепловыделения в отдельных блоках размером $20 \times 20 \times 20$ см (даны средние для блоков значения). Для программы VENTURE результаты представлены как функции расчетного интервала вместе с экстраполированным результатом (экстраполяция проводилась на основе зависимости погрешности от квадрата интервала). Пять чисел в группе для каждого блока приводятся в следующем порядке:

Строка	Число точек ($x \times y \times z$)
1	$17 \times 17 \times 19$
2	$34 \times 34 \times 38$
3	$68 \times 68 \times 76$
4	$102 \times 102 \times 114$
5	Экстраполяция на бесконечное число точек

Плотности потоков и тепловыделение даются для некоторых представительных блоков.

§ 3. Модель реактора ВВЭР-440

3.1. Прототип теста. Рассматривается трехмерная модель начальной загрузки реактора ВВЭР-440 с симметрией 30° для рабочего состояния реактора на номинальной мощности при стационарном отравлении ксеноном. Реактор находится в критическом состоянии.

В реакторе ВВЭР-440 имеется два типа кассет: рабочие кассеты (длина топливной части 250 см) и кассеты регулирования (СУЗ) двойной длины, т. е. 500 см. Нижняя часть кассеты СУЗ аналогична топливной кассете, верхняя представляет собой «нейтронную ловушку». В рассматриваемой модели поглощающие части кассет СУЗ выведены из активной зоны, за исключением рабочей группы (семь кассет). Поглощающая часть этих кассет находится на расстоянии $H=175$ см от нижнего торца активной зоны.

3.2. Тестовая задача. Тест содержит исходные данные и результаты расчета упомянутой выше модели по программе БИПР-5 [5]. Программа БИПР-5 — одна из версий программ БИПР, широко используемых для проектных и эксплуатационных расчетов реакторов ВВЭР. Расчетная модель представляет собой набор правильных шестигранных призм высотой 250 см и размером под ключ 14,7 см. Каждая такая призма имитирует кассету реактора с включением половины межкассетного зазора. Начальная загрузка содержит кассеты трех типов, отличающиеся обогащением топлива (1,6; 2,4 и 3,6%).

При расчете рабочего состояния реактора учитывается изменение его нейтронно-физических свойств (по высоте кассеты), обусловленное подогревом теплоносителя и мощностными эффектами. На внешней границе реактора (торцы и соответствующие боковые

грани крайних кассет и поверхности, примыкающие к регулирующим кассетам) заданы значения логарифмических производных.

В плане модель изображена на рис. 3.1 и 3.2. На рис. 3.1 представлен сектор симметрии в 30° , на рис. 3.2 сектор симметрии в 120° ; некоторые характерные кассеты пронумерованы, причем номера одинаковых кассет (одинаковый тип и одинаковые усло-

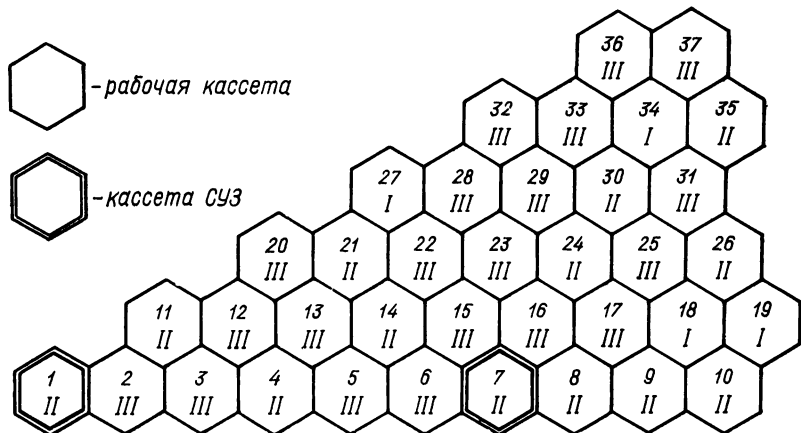


Рис. 3.1. Расчетная модель тестовой задачи 3 в плане (сектор симметрии 30°). Арабскими цифрами обозначены номера кассет, римскими — обогащение:

I — обогащение 3,6%; II — 2,4%; III — 1,6%

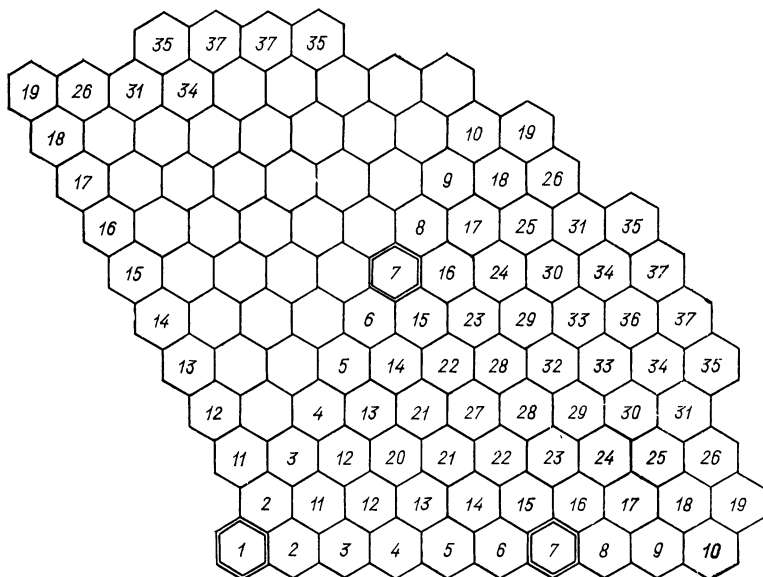


Рис. 3.2. Расчетная модель тестовой задачи 3 (сектор 120°)

вия) совпадают. Сектор в 120° включает четыре сектора симметрии в 30° . Вертикальный разрез представлен на рис. 3.3.

Для данной модели распределение замедляющихся нейтронов описывается с помощью одноруппового диффузионного уравнения в трехмерной геометрии

$$\Delta\Phi + \frac{(k_\Phi/k_{\Phi 0} - 1)}{M_{\text{ср}}^2} \Phi = 0. \quad (3.1)$$

На внешней границе реактора и на границе регулирующих кассет задано значение логарифмических производных. В уравнении (3.1) $M_{\text{ср}}^2$ — средний по зоне (одинаковый для всех кассет) квадрат длины миграции. $k_\Phi = k_\Phi(r)$ — фиктивный коэффициент размножения кассеты, учитывающий отличие квадрата длины миграции кассеты от его среднего значения:

$$k_\Phi = (k_\infty - 1) \frac{M_{\text{ср}}^2}{M^2} - 1,$$

где $M^2 = M^2(r)$ — квадрат длины миграции для кассеты. k_Φ определяется типом кассеты, выгоранием, количеством шлаков, температурой теплоносителя, содержанием бора в воде, концентрацией нуклидов Xe и Sm. Таким образом, уравнение (3.1) нелинейно в том смысле, что $k_\Phi = k_\Phi(\Phi)$.

Уравнение (3.1) решается конечно-разностным методом. Для аппроксимации используется конечно-разностная сетка с одной точкой на кассету (в плане) и 10 точками по высоте.

В результате решения уравнения (3.1) получаются значения $\Phi_{m,n}$ — плотность потоков замедляющихся нейтронов в точках m, n , где n — номер кассеты ($n=1, 2, \dots, n_0$), а m — номер точки по высоте активной зоны ($m=1, 2, \dots, m_0$). Для элемента кассеты m, n (рис. 3.4) соответствующее конечно-разностное уравнение имеет вид

$$\sum_{i=1}^6 \frac{\Phi_i - \Phi_0}{h_r} \frac{h_r \sqrt{3}}{3} h_z + \sum_{i=7}^8 \frac{\Phi_i - \Phi_0}{h_z} \frac{h_r^2 \sqrt{3}}{2} + \frac{h_r^2 \sqrt{3}}{2} h_z \frac{k_\Phi/k_{\Phi 0} - 1}{M_{\text{ср}}^2} \Phi_0 = 0, \quad (3.2)$$

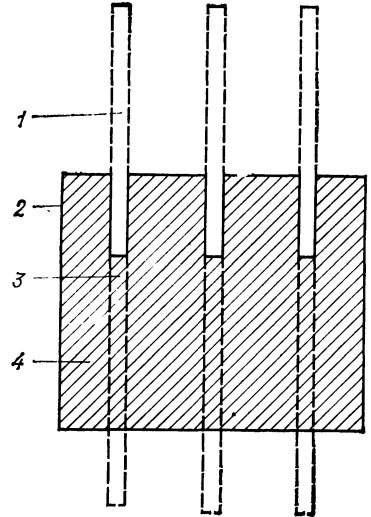


Рис. 3.3. Расчетная модель тестовой задачи 3 (вертикальный разрез):

1 — нейтронная ловушка кассеты СУЗ; 2 — поверхность, ограничивающая расчетную область (здесь задана логарифмическая производная); 3 — топливная часть кассеты СУЗ; 4 — расчетная область

или

$$[2(2h_z^2 + h_r^2)M_{cp}^2 + h_r^2 h_z^2] \Phi_0 = \frac{2M_{cp}^2}{3} h_z^2 (\Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_6) +$$

$$+ M_{cp}^2 h_r^2 (\Phi_7 + \Phi_8) + \frac{k_{\Phi}}{k_{\text{эф}}} h_r^2 h_z^2 \Phi_0. \quad (3.3)$$

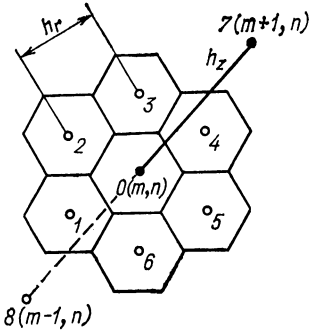


Рис. 3.4. Шаблон, принятый в программе БИПР-5

Если точка m, n сетки имеет «соседа», не принадлежащего расчетной области (соседняя точка находится в поглотителе или отражателе), то при записи уравнений для точки m, n в соседней точке принимается

$$\Phi = \Phi_{m,n} (2d_{\log} - h) / (2d_{\log} + h),$$

где $h = h_r$ или h_z (h_r — размер под ключ; h_z — шаг по высоте); d_{\log} — расчетное или экспериментальное значение параметра, характеризующего граничное условие.

Публикация данного теста преследует две цели:

- 1) дать материал расчетчикам реакторов ВВЭР для первоначальной проверки умения пользоваться программой БИПР;
- 2) дать абстрактный тест для трехмерной однорупповой диффузионной задачи.

Поэтому k_{Φ} представлено в виде формул, используемых в программе БИПР, и значений соответствующих коэффициентов аппроксимации (табл. 3.1), а также в виде табличных данных (табл. 3.2) для 10 участков кассеты (счет идет снизу вверх).

Таблица 3.1

Коэффициенты аппроксимации для расчета k_{Φ}

Коэффициент	Тип кассеты E		
	I	II	III
b_0	0,3447	0,2508	0,1386
b_1	$-0,1650 \cdot 10^{-3}$	$-0,1580 \cdot 10^{-3}$	$-0,1530 \cdot 10^{-3}$
α_1	$-0,9978 \cdot 10^{-3}$	$-0,7814 \cdot 10^{-3}$	$-0,4979 \cdot 10^{-3}$
α_2	$-0,3611 \cdot 10^{-6}$	$-0,3344 \cdot 10^{-6}$	$-0,2214 \cdot 10^{-6}$
C_1	$-0,08574$	$-0,11780$	$-0,15907$
C_2	$0,5442 \cdot 10^{-2}$	$0,9172 \cdot 10^{-2}$	$1,4688 \cdot 10^{-2}$
e_{Xe}	$-1,050$	$-1,600$	$-2,300$
σ_{Xe}^*	$0,220 \cdot 10^8$	$0,337 \cdot 10^8$	$0,485 \cdot 10^8$

Таблица 3.2

Значение k_{ϕ} для рабочего состояния реактора на номинальной мощности

m	$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=4$	$n=5$	$n=6$	$n=7$	$n=8$	$n=9$
10	—	0,99264	0,98963	1,10670	0,98985	0,99306	—	1,11476	1,11280
9	—	0,98514	0,98200	1,09705	0,98223	0,98561	—	1,10560	1,10342
8	—	0,97997	0,97700	1,09142	0,97728	0,98051	—	1,09943	1,09780
7	1,08851	0,97267	0,97231	1,08795	0,97266	0,97339	1,09044	1,09077	1,09300
6	1,08575	0,96968	0,96970	1,08604	0,97009	0,97047	1,08769	1,08866	1,09136
5	1,08668	0,96870	0,96878	1,08713	0,96918	0,96949	1,08848	1,08942	1,09201
4	1,08993	0,96935	0,96943	1,09036	0,96981	0,97005	1,09149	1,09230	1,09460
3	1,09551	0,97181	0,97189	1,09589	0,97222	0,97245	1,09678	1,09742	1,09933
2	1,10412	0,97670	0,97676	1,10441	0,97703	0,97721	1,10506	1,10551	1,10696
1	1,11797	0,98566	0,98571	1,11817	0,98589	0,98602	1,11860	1,11887	1,11985

m	$n=10$	$n=11$	$n=12$	$n=13$	$n=14$	$n=15$	$n=16$	$n=17$	$n=18$
10	1,12288	1,10816	0,98902	0,98913	1,10907	0,99327	0,99386	0,99193	1,21748
9	1,11381	1,09656	0,98137	0,98149	1,09951	0,98585	0,98650	0,98450	1,20656
8	1,10844	1,09267	0,97645	0,97660	1,09368	0,98078	0,98147	0,97970	1,20034
7	1,10456	1,08735	0,97225	0,97243	1,08846	0,97367	0,97431	0,97491	1,19623
6	1,10286	1,08576	0,96977	0,96997	1,08688	0,97077	0,97143	0,97237	1,19558
5	1,10293	1,08681	0,96881	0,96908	1,08788	0,96979	0,97141	0,97186	1,19774
4	1,10459	1,09007	0,96952	0,96971	1,09101	0,97037	0,97097	0,97186	1,20235
3	1,10808	1,09564	0,97197	0,97214	1,09643	0,97269	0,97321	0,97396	1,20958
2	1,11415	1,10422	0,97683	0,97697	1,10483	0,97740	0,97780	0,97838	1,22037
1	1,12533	1,11804	0,98575	0,98585	1,11847	0,98616	0,98643	0,98682	1,23783

Продолжение табл. 3.2

<i>m</i>	<i>n</i> =19	<i>n</i> =20	<i>n</i> =21	<i>n</i> =22	<i>n</i> =23	<i>n</i> =24	<i>n</i> =25	<i>n</i> =26	<i>n</i> =27
10	1,24506	1,10652	0,98924	0,99011	1,11049	0,99138	1,11363	1,23413	1,10762
9	1,23580	1,09688	0,98163	0,98254	1,10102	0,98393	1,10428	1,22394	1,09804
8	1,22982	1,09132	0,97676	0,97766	1,09531	0,97923	1,09897	1,21790	1,09252
7	1,22564	1,08746	0,97263	0,97312	1,09019	0,97490	1,09520	1,21401	1,08855
6	1,22387	1,08622	0,97019	0,97060	1,08861	0,97250	1,09381	1,21275	1,08727
5	1,22415	1,08731	0,96930	0,96989	1,08951	0,97159	1,09440	1,21374	1,08830
4	1,22628	1,09053	0,96993	0,97029	1,09245	0,97207	1,09681	1,21677	1,09140
3	1,23051	1,09602	0,97232	0,97263	1,09763	0,97420	1,10126	1,22208	1,09675
2	1,23777	1,10452	0,97711	0,97736	1,10575	0,97861	1,10854	1,23062	1,10508
1	1,25104	1,11825	0,98596	0,98613	1,11910	0,98703	1,12106	1,24550	1,11864

<i>m</i>	<i>n</i> =28	<i>n</i> =29	<i>n</i> =30	<i>n</i> =31	<i>n</i> =32	<i>n</i> =33	<i>n</i> =34	<i>n</i> =35	<i>n</i> =36	<i>n</i> =37
10	0,98950	0,98984	0,99071	1,22471	1,10722	1,10858	1,21609	1,24366	0,99159	1,23690
9	0,98195	0,98235	0,98331	1,21403	1,09774	1,09917	1,20514	1,23423	0,98428	1,22689
8	0,97722	0,97774	0,97886	1,20819	1,09255	1,09415	1,19954	1,22863	0,98006	1,22128
7	0,97326	0,97398	0,97541	1,20486	1,08919	1,09108	1,19674	1,22519	0,97705	1,21808
6	0,97092	0,97172	0,97329	1,20418	1,08813	1,09007	1,19660	1,22378	0,97513	1,21700
5	0,97004	0,97086	0,97243	1,20583	1,08914	1,09097	1,19886	1,22418	0,97430	1,21785
4	0,97062	0,97138	0,97285	1,20964	1,09210	1,09372	1,20340	1,22635	0,97465	1,22056
3	0,97291	0,97357	0,97486	1,21587	1,09727	1,09860	1,21050	1,23058	0,97647	1,22544
2	0,97757	0,97809	0,97912	1,22549	1,10540	1,10641	1,22112	1,23783	0,98045	1,23346
1	0,98628	0,98663	0,98737	1,24162	1,11880	1,11948	1,23837	1,25108	0,98837	1,24770

Значение k_{Φ} невыгоревших кассет вычисляется следующим образом (обозначения соответствуют принятым в программе БИПР):

$$k_{\Phi m,n} = \left(1 + b_{0E} + b_{1E} \bar{W} \frac{\psi_{m,n}}{\bar{\psi}} \right) \Pi_B \Pi_{\Delta t} \Pi_{Xe}.$$

Здесь n, m — соответственно номера кассеты и точки по высоте кассеты;

b_{0E}, b_{1E} — коэффициенты, определяемые типом кассеты ($E=I, II, III$);

$\bar{W} = N_{a.з}/V_{a.з}$ — средняя мощность, выделяемая в единице объема активной зоны реактора;

$\psi_{m,n}/\bar{\psi}$ — коэффициент неравномерности энерговыделения для объема m, n , причем

$$\psi_{m,n} = \frac{(1 + b_{0E}) \Phi_{m,n}}{\nu}, \quad \nu = 2,442;$$

$$\bar{\psi} = \frac{1}{m_0 n_0} \sum_{n=1}^{n_0} \sum_{m=1}^{m_0} \psi_{m,n};$$

$$\Pi_{\Delta t} = 1 + \alpha_{1E} \Delta t_{m,n} + \alpha_{2E} \Delta t_{m,n}^2,$$

α_{1E}, α_{2E} — коэффициенты, определяемые сортом топлива; $\Delta t_{m,n}$ — подогрев теплоносителя (для удобства эта величина отсчитывается от центра зоны, где подогрев принят равным нулю):

$$\Delta t_{m,n} = \bar{\Delta t} \left[\frac{1}{m_0} \left(\sum_{k=1}^{m-1} \frac{\psi_{k,n}}{\bar{\psi}} + \frac{1}{2} \frac{\psi_{m,n}}{\bar{\psi}} \right) - \frac{1}{2} \right];$$

$\bar{\Delta t}$ — средний подогрев теплоносителя в реакторе (в отличие от $\Delta t_{m,n}$ средний подогрев отсчитывается от нижнего края активной зоны);

$$\Pi_B = 1 + C_{1E} C_B \gamma_{m,n} + C_{2E} C_B^2 \gamma_{m,n}^2,$$

C_{1E}, C_{2E} — коэффициенты, определяемые типом кассеты;

C_B — концентрация бора в теплоносителе, г/л;

$\gamma_{m,n} = (1 + Q_1 \Delta t_{m,n} + Q_2 \Delta t_{m,n}^2)$ — коэффициент, учитывающий изменение плотности воды;

$$\Pi_{Xe} = 1 + e_{Xe,E} \rho_{Xe,m,n},$$

$e_{Xe,E}$ — коэффициент, определяемый типом кассеты;

$$\rho_{Xe m,n} = \frac{(\gamma_J + \gamma_{Xe})(\psi_{m,n}/\bar{\psi}) \cdot 3,1 \cdot 10^{-7} \bar{W}}{\lambda_{Xe} + \sigma_{Xe,E}^* \frac{\psi_{m,n}/\bar{\psi}}{k_{\Phi m,n}} \cdot 3,1 \cdot 10^{-14} \bar{W}};$$

$\gamma_J, \gamma_{Xe}, \lambda_{Xe}$ — соответственно выходы иода, ксенона и константа распада ксенона;

$\sigma_{\text{Xe}, E}^*$ — приведенное относительное сечение поглощения ксенона для кассеты типа E .

Приведем также значения ряда параметров, необходимых для расчета k_{Φ} :

$$Q_1 = -2,449 \cdot 10^{-3}; \quad Q_2 = -6,928 \cdot 10^{-8};$$

$$\gamma_1 = 0,061; \quad \gamma_{\text{Xe}} = 0,003; \quad \lambda_{\text{Xe}} = 0,207 \cdot 10^{-4};$$

$$V_{a,3} = 1,627 \cdot 10^4; \quad n_0 = 349; \quad m_0 = 10;$$

на границе с боковым отражателем $2d_{\log} = 18,240$

на границе с торцевым отражателем $2d_{\log} = 18,630$

на боковой стороне регулятора $2d_{\log} = 14,860$

на торце регулятора $2d_{\log} = 37,500$.

Рабочее состояние на мощности характеризуется значениями

$$N_{a,3} = 0,1375 \cdot 10^7 \text{ кВт}; \quad \overline{\Delta t} = 32,34; \quad C_B = 0,734; \quad M^2 = 64,5 \text{ см}^2.$$

Рассчитываются и приводятся в решении следующие величины.

1. Эффективный коэффициент размножения $k_{\text{эф}}$.
2. Радиальный коэффициент неравномерности тепловыделения

$$k_q = \max_n k_{q(n)}.$$

3. Объемный коэффициент неравномерности тепловыделения

$$k_V = \max_{m,n} \left(\psi_{m,n} / \frac{1}{m_0 n_0} \sum_{m=1}^{m_0} \sum_{n=1}^{n_0} \psi_{m,n} \right).$$

4. Относительная мощность кассет

$$k_{q(n)} = \sum_{m=1}^{m_0} \psi_{m,n} / \frac{1}{n_0} \sum_{m=1}^{m_0} \sum_{n=1}^{n_0} \psi_{m,n}.$$

5. Плотность потока нейтронов в 10 точках по высоте в выбранных кассетах: 1—10 и 15—19.

6. Плотность энергосвечения в десяти точках по высоте в тех же кассетах.

3.3. Решение. Приведем результаты расчетов по программе БИПР-5.

1. $k_{\text{эф}} = 1,00002$.

2. $k_q = 1,2533$.

3. $k_V = 1,9045$.

4. $k_{q(n)}$ см. на рис. 3.5.

5. Плотность потока нейтронов в 10 точках по высоте кассет см. табл. 3.3.

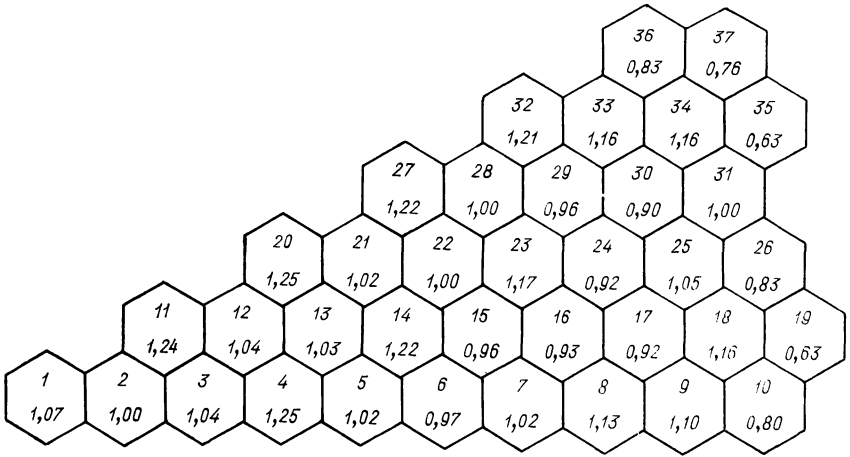


Рис. 3.5. Относительная мощность кассет

Таблица 3.3

Плотность потока нейтронов для рабочего состояния реактора на номинальной мощности

m	$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=4$	$n=5$	$n=6$	$n=7$
10	0,0	0,1905	0,2516	0,2852	0,2496	0,1873	0,0
9	0,0	0,4063	0,5326	0,6011	0,5274	0,3979	0,0
8	0,0	0,6673	0,8425	0,9387	0,8320	0,6501	0,0
7	1,2428	1,2040	1,2326	1,3191	1,2129	1,1645	1,1855
6	1,6203	1,5202	1,5199	1,6144	1,4939	1,4679	1,5448
5	1,8099	1,6916	1,6858	1,7902	1,6568	1,6336	1,7273
4	1,8487	1,7248	1,7181	1,8270	1,6892	1,6674	1,7685
3	1,7109	1,5933	1,5872	1,6909	1,5613	1,5425	1,6418
2	1,3500	1,2547	1,2499	1,3344	1,2301	1,2164	1,2996
1	0,7305	0,6772	0,6746	0,7222	0,6642	0,6572	0,7052

m	$n=8$	$n=9$	$n=10$	$n=15$	$n=16$	$n=17$	$n=18$	$n=19$
10	0,1901	0,2385	0,1860	0,1851	0,1782	0,2193	0,2440	0,1335
9	0,4014	0,4983	0,3864	0,3925	0,3766	0,4597	0,5065	0,2765
8	0,6552	0,7794	0,5929	0,6400	0,6135	0,7238	0,7783	0,4208
7	1,1916	1,1392	0,8207	1,1491	1,1127	1,0852	1,0842	0,5731
6	1,5072	1,4059	1,0014	1,4483	1,4041	1,3428	1,3251	0,6961
5	1,6833	1,5677	1,1155	1,6120	1,5643	1,4946	1,4774	0,7749
4	1,7267	1,6120	1,1483	1,6460	1,5997	1,5320	1,5225	0,7981
3	1,6070	1,5056	1,0744	1,5237	1,4836	1,4254	1,4266	0,7476
2	1,2757	1,2001	0,8582	1,2023	1,1729	1,1311	1,1417	0,5981
1	0,6943	0,6561	0,4703	0,6499	0,6353	0,6151	0,6273	0,3285

6. Плотность энерговыделения в 10 точках по высоте в тех же кассетах см. табл. 3.4.

Плотность энерговыделения для рабочего состояния реактора
на номинальной мощности

<i>m</i>	<i>n</i> =1	<i>n</i> =2	<i>n</i> =3	<i>n</i> =4	<i>n</i> =5	<i>n</i> =6	<i>n</i> =7
10	0,0	0,1781	0,2344	0,2984	0,2326	0,1751	0,0
9	0,0	0,3769	0,4925	0,6233	0,4878	0,3693	0,0
8	0,0	0,6158	0,7752	0,9684	0,7657	0,6002	0,0
7	1,2786	1,1028	1,1286	1,3557	1,1110	1,0674	1,2218
6	1,6628	1,3882	1,3879	1,6572	1,3648	1,3416	1,5882
5	1,8590	1,5431	1,5380	1,8395	1,5121	1,4915	1,7771
4	1,9045	1,5744	1,5685	1,8829	1,5427	1,5232	1,8246
3	1,7716	1,4582	1,4527	1,7514	1,4294	1,4126	1,7020
2	1,4089	1,1540	1,1497	1,3930	1,1318	1,1194	1,3574
1	0,7720	0,6286	0,6262	0,7632	0,6166	0,6103	0,7456

<i>m</i>	<i>n</i> =8	<i>n</i> =9	<i>n</i> =10	<i>n</i> =15	<i>n</i> =16	<i>n</i> =17	<i>n</i> =18	<i>n</i> =19
10	0,2003	0,2508	0,1974	0,1732	0,1668	0,2049	0,2823	0,1580
9	0,4194	0,5197	0,4068	0,3644	0,3499	0,4262	0,5808	0,3247
8	0,6809	0,8087	0,6212	0,5912	0,5670	0,6678	0,8879	0,4918
7	1,2285	1,1769	0,8568	1,0536	1,0210	0,9963	1,2325	0,6676
6	1,5509	1,4503	1,0439	1,3240	1,2845	1,2296	1,5056	0,8096
5	1,7334	1,6182	1,1629	1,4722	1,4296	1,3673	1,6816	0,9014
4	1,7827	1,6678	1,1989	1,5042	1,4627	1,4021	1,7397	0,9301
3	1,6669	1,5644	1,1253	1,3957	1,3597	1,3073	1,6399	0,8742
2	1,3330	1,2557	0,9037	1,1066	1,0801	0,0421	1,3241	0,7035
1	0,7342	0,6945	0,5003	0,6036	0,5902	0,5716	0,7380	0,3906

ДВУХМЕРНЫЕ ТЕСТОВЫЕ ЗАДАЧИ

§ 4. Реактор на быстрых нейтронах типа SNR-300 в треугольной и прямоугольной геометриях

4.1. Прототип теста. Рассматриваются двухмерные модели реактора-размножителя на быстрых нейтронах типа SNR-300, имеющего в активной зоне плутониевое топливо двух разных обогащений (см. § 1, п. 1.1).

4.2. Тестовая задача. Решается двухмерный аналог диффузионного уравнения (В.2) в треугольной и прямоугольной геометриях. Двухмерные модели получаются из трехмерных (см. § 1, п. 1.2) с помощью двух плоских сечений, проведенных перпендикулярно оси через верхнюю половину активной зоны (ВАЗ) и нижнюю (НАЗ). На рис. 4.1 приведены конфигурации двухмерных моделей — сектора в 120° и 90° для треугольной и прямоугольной модели соответственно. Там же показаны граничные условия.

Выделенные кассеты (по шесть треугольников и четыре квадрата) представляют регулирующие стержни и имеют состав либо 5, либо 6. Номера составов, указанные на рис. 4.1, определяют макросечения этих зон (табл. 4.1). Зоны с разными физическими свойствами отделены друг от друга жирными линиями.

Четырехгрупповые макросечения тестовой задачи 4

Зона	Группа 1	Группа 2	Группа 3	Группа 4	Сечение рассеяния $\Sigma_s^{i \rightarrow j}$, см ⁻¹		
					$i=1$	$i=2$	$i=3$
					$j=2$		
1	0,11878·10 ⁻¹	0,53252·10 ⁻²	0,10471·10 ⁻¹	0,26611·10 ⁻¹	0,23597·10 ⁻¹	—	—
2	0,14943·10 ⁻¹	0,76887·10 ⁻²	0,14809·10 ⁻¹	0,38159·10 ⁻¹	0,23262·10 ⁻¹	—	—
3	0,77427·10 ⁻²	0,10825·10 ⁻³	0,29742·10 ⁻³	0,84687·10 ⁻³	0,32071·10 ⁻¹	—	—
4	0,54279·10 ⁻²	0,75857·10 ⁻⁴	0,21218·10 ⁻³	0,57592·10 ⁻³	0,26322·10 ⁻¹	—	—
5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,22946·10 ⁻¹	—	—
6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,12942·10 ⁻¹	—	—
					$j=3$		
					Кoeffициент диффузии D , см		
1	2,87679	1,57085	0,722486	0,964199	0,40791·10 ⁻⁵	0,16153·10 ⁻²	—
2	2,87654	1,57136	0,712708	0,942978	0,46451·10 ⁻⁵	0,15718·10 ⁻²	—
3	2,28561	1,17193	0,632475	0,818357	0,38880·10 ⁻⁵	0,27776·10 ⁻²	—
4	2,71665	1,44094	0,720346	0,987683	0,28907·10 ⁻⁵	0,22889·10 ⁻²	—
5	2,50307	1,31468	0,574277	0,615369	0,10320·10 ⁻⁵	0,37687·10 ⁻²	—
6	4,61642	2,90183	1,02118	1,72963	0,68780·10 ⁻⁶	0,12871·10 ⁻²	—
					$j=4$		
1	0,28204·10 ⁻¹	0,52747·10 ⁻²	0,17612·10 ⁻¹	0,26546·10 ⁻¹	0,44493·10 ⁻⁷	0,42309·10 ⁻⁷	0,46838·10 ⁻²
2	0,28782·10 ⁻¹	0,60491·10 ⁻²	0,19510·10 ⁻¹	0,33714·10 ⁻¹	0,49968·10 ⁻⁷	0,40724·10 ⁻⁷	0,43414·10 ⁻²
3	0,35959·10 ⁻¹	0,58855·10 ⁻²	0,16041·10 ⁻¹	0,13349·10 ⁻¹	0,45039·10 ⁻⁷	0,90018·10 ⁻⁷	0,58971·10 ⁻²
4	0,29093·10 ⁻¹	0,44909·10 ⁻²	0,13082·10 ⁻¹	0,99562·10 ⁻²	0,33248·10 ⁻⁷	0,62133·10 ⁻⁷	0,53536·10 ⁻²
5	0,24814·10 ⁻¹	0,16412·10 ⁻¹	0,72122·10 ⁻¹	0,16868	0,10489·10 ⁻⁷	0,70361·10 ⁻¹¹	0,86815·10 ⁻²
6	0,13159·10 ⁻¹	0,14559·10 ⁻²	0,46001·10 ⁻²	0,78660·10 ⁻³	0,69903·10 ⁻⁸	0,43633·10 ⁻¹¹	0,34533·10 ⁻²
					Спектр нейтронов деления χ		
1-6	0,768	0,232	0,0	0,0	—	—	—

Симметрия треугольной модели позволяет проводить расчет секторов в 60 и 30°, а симметрия прямоугольной модели — расчет сектора в 45°. Прямоугольная модель является модификацией более точной треугольной модели.

Всего рассчитывается четыре варианта (для треугольной и прямоугольной геометрий по два разреза — верхний и нижний), и для каждого из этих четырех вариантов исследуется зависимость $k_{эф}$ от расчетного интервала. Идентификация вариантов в соответствии с длиной интервала приведена в табл. 4.2. Во всех вариантах аксиальная утечка предполагается равной нулю.

Точность итерационных процессов 10^{-5} для относительного изменения потока и 10^{-6} для $k_{эф}$.

4.3. Решения. Расчеты проводились по нескольким программам:

а) с точкой в центре интервала (CITATION, JAR);

б) с точкой на краю интервала (HEXAGA-II, TRIBU, DIXY).

Расчеты по программе JAR проведены специально для дан-

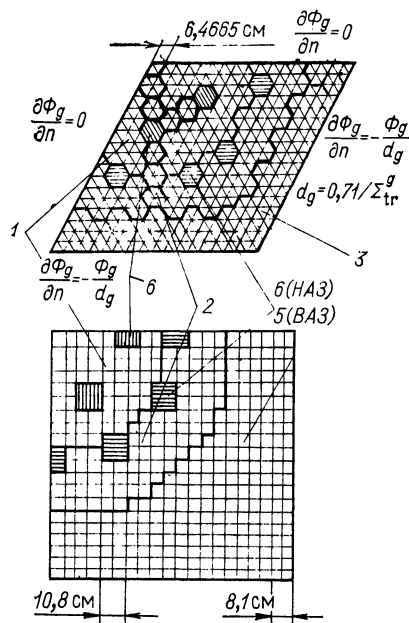


Рис. 4.1. Геометрические модели тестовой задачи 4

Таблица 4.2

Модели, использованные при расчетах тестовой задачи 4

Модель	Геометрия ^а	Размер стороны ячейки, см	Шаг решетки, см	Площадь на одну расчетную точку, см ²	
				КРТК ^б	КРТЦ ^б
B1	△	6,46650	3,73333	32,30	18,11
	□	5,4	5,4	27,72	27,72
B2	△	3,23325	1,86667	8,55	4,53
	□	2,7	2,7	6,93	7,29
B3	△	2,15550	1,24444	3,87	2,01
	□	1,8	1,8	3,08	3,19
B4	△	1,61662	0,93333	2,20	1,13
	□	1,35	1,35	1,73	1,78

^а △ — треугольная геометрия; □ — X, Y-геометрия.

^б КРТК, КРТЦ — обозначение конечно-разностного (КР) метода, реализованного в программах (ТК — точка на краю; ТЦ — точка в центре ячейки).

ной работы, а остальные результаты взяты из [8]. При вычислениях $k_{эф}$ по всем программам использовалась точность 10^{-6} . В программе JAR точность для относительного изменения потоков во внутренних итерациях принималась 10^{-5} ; в остальных программах относительное изменение потока во внешних итерациях было 10^{-5} .

Таблица 4.3

Расчеты $k_{эф}$ в двумерной геометрии тестовой задачи 4

Модель	Δ				X, Y		
	CITATION	JAR	HEXAGA-II	TRIBU	CITATION	JAR	DIXY
Верхняя часть активной зоны							
B1	1,127148	1,12621	1,121672	1,12169	1,115257	—	1,104471
B2	1,124877	1,12412	1,124377	1,12447	1,110350	1,11012	1,108296
B3	1,124387	1,12365	1,124979	1,12507	1,109277	1,10347	1,108638
B4	1,124325	—	1,125156	—	1,108897	—	1,108819
Нижняя часть активной зоны							
B1	1,226600	—	1,226005	1,22603	1,246634	—	1,245185
B2	1,225864	1,224387	1,226900	1,22698	1,245409	1,24048	1,246135
B3	1,225732	—	1,227107	1,22721	1,245187	1,23712	1,245856
B4	1,226007	—	1,227122	—	1,245127	—	1,245762

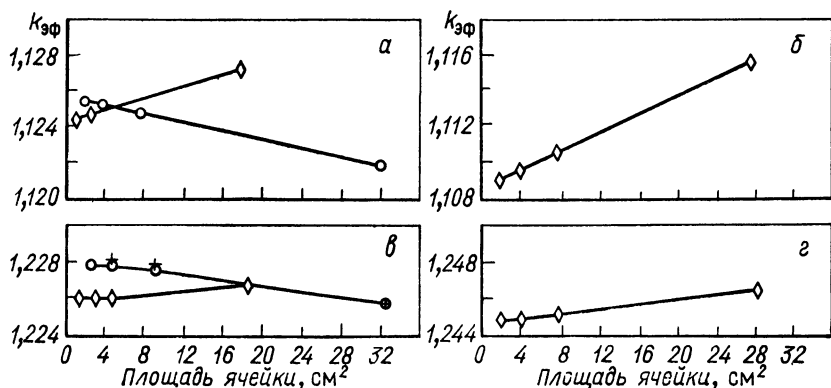


Рис. 4.2. $k_{эф}$ как функция площади ячейки (тестовая задача 4):

а — двумерная треугольная геометрия, ВАЗ; б — двумерная X, Y-геометрия, ВАЗ; в — двумерная треугольная геометрия, НАЗ; г — двумерная X, Y-геометрия, НАЗ (O — расчет по программе HEXAGA-II; + — по программе TRIBU; \diamond — по программе CITATION)

При расчетах по программе JAR использовалась симметрия в 60° для гексагональной и треугольной геометрии. В остальных программах расчеты проводились, по-видимому, для секторов в 120° и 90° . Рассчитывалась зависимость $k_{эф}$ от длины интервала в треугольной и прямоугольной геометрии. Результаты расчетов

приводятся в табл. 4.3 и на рис. 4.2. Кроме того, по программе HEXAGA-II изучалась зависимость $k_{эф}$ от числа энергетических групп (табл. 4.4).

Таблица 4.4

Зависимость $k_{эф}$ от числа групп в тестовой задаче 4
(треугольная геометрия, программа HEXAGA-II)

Число групп	Групповое разбиение в соответствии с 26-групповой структурой констант БНАБ-26	Модель В1	Модель В2	Модель В3
4	5, 11, 14, 26	1,121672	1,124377	1,124979
8	5, 8, 11, 12, 13, 14, 15, 26	1,120367	1,123051	1,123626
14	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 26	1,119312	1,121962	1,122512
26		1,119132	1,121782	1,122332

§ 5. Легководный реактор PWR в прямоугольной геометрии (тест МАГАТЭ 2D)

5.1. Прототип теста. Тест составлен на основании модели большого легководного реактора с двумя зонами разного обогащения, содержащего в активной зоне 177 топливных кассет [3]. Активная зона окружена чистой водой без экрана.

5.2. Тестовая задача. Решается двухгрупповое двумерное диффузионное уравнение типа (В.2) в прямоугольной геометрии с равномерным шагом. Геометрические характеристики и граничные условия рассчитываемой модели приведены на рис. 5.1. Расчетная модель представляет собой сечение трехмерной тестовой модели 2 (см. рис. 2.1) в плоскости X, Y при $z=190$.

Осевого лапласиан $B_{z,g}^2 = 0,8 \cdot 10^{-4}$ для всех зон и групп, т. е. в расчете используется эффективное сечение увода для группы g и зоны R :

$$\tilde{\Sigma}_{cfd,R}^g = \Sigma_{cfd,R}^g + B_{z,g}^2 D_{g,R}.$$

Макросечения рассчитываемой модели приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Макросечения для тестовой задачи 5 (задача МАГАТЭ 2D)

$$(v\Sigma_f^1 = 0; \chi_1 = 1; \chi_2 = 0)$$

Номер зоны	D_1 , см	D_2 , см	$\Sigma_s^{1 \rightarrow 2}$, см ⁻¹	Σ_{cfd}^1 , см ⁻¹	Σ_{cfd}^2 , см ⁻¹	$\sqrt{v\Sigma_f^2}$, см ⁻¹
1	1,5	0,4	0,02	0,03	0,08	0,135
2	1,5	0,4	0,02	0,03	0,085	0,135
3	1,5	0,4	0,02	0,03	0,13	0,135
4	2,0	0,3	0,04	0,04	0,01	0
5	2,0	0,3	0,04	0,04	0,055	0

При описании результатов расчета приводятся следующие величины:

1. Максимальное собственное значение $k_{эф}$.
2. Плотность потоков нейтронов для отдельных кассет:

$$\Phi_{g,i} = \frac{1}{V_i} \int_{V_i} \Phi_{g,i} dV_i,$$

где V_i — объем кассеты i . Нормировка плотности потоков нейтронов такова, что

$$\frac{1}{V_{a.з}} \int_{V_{a.з}} \sum_g \nu \Sigma_f^{(g)} \Phi_g dV = 1.$$

Здесь зоны с составом 3 в процессе нормировки не участвуют.

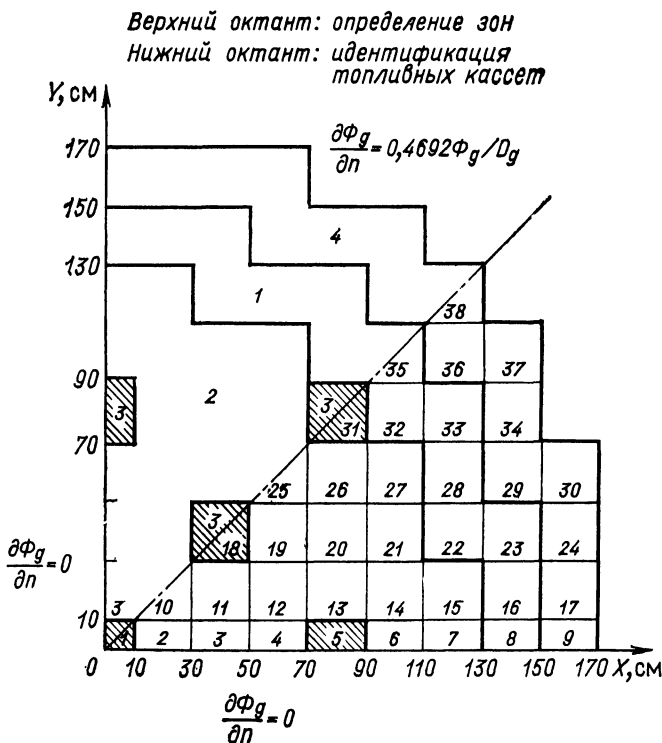


Рис. 5.1. Геометрическая модель двумерной тестовой задачи 5

3. Значения и местоположения максимумов тепловыделения в активной зоне и вблизи границы активной зоны и отражателя. Максимум тепловыделения соответствует максимуму плотности потока тепловой (второй) группы

$$q_{\max} = \nu \Sigma_f^{(2)} \Phi_{2,\max}$$

4. Число неизвестных, число итераций (внешних и внутренних).

5. Тип и численные значения критериев сходимости.

6. Зависимость рассчитанных характеристик от числа интервалов.

5.3. Решения. В табл. 5.2—5.4 приведены результаты расчетов

Таблица 5.2

Расчеты $k_{эф}$ и максимума тепловыделения для тестовой задачи 5 (двухмерная модель МАГАТЭ)

Число интервалов	VENTURE [3]		VANGER [3]		
	$k_{эф}$	$q_{\text{Макс}}^I$	$k_{эф}$	$q_{\text{Макс}}^I$	$q_{\text{Макс}}^{II}$
9×9	1,03208	1,549	1,07647	—	4,28
17×17	1,02965	1,649	1,03733	0,962	2,231
34×34	1,02924	1,599	1,03077	1,364	1,660
68×68	1,02944	1,544	1,02983	1,475	1,546
272×272	1,02958	1,515	—	—	—
Экстраполяция	1,02959	1,513	1,02952	1,522	1,508

Число интервалов	JAR						
	$k_{эф}$	$q_{\text{Макс}}^I$	Координаты $q_{\text{Макс}}^I$, см	$q_{\text{Макс}}^{II}$	Координаты $q_{\text{Макс}}^{II}$, см	Число итераций	
						внешних	внутренних
9×9	—	—	—	—	—	—	—
17×17	1,02936	1,6805	35; 35	—	—	79	1307
34×34	1,02893	1,6339	32,5; 32,5	—	—	80	1509
68×68	1,02897	1,554	31,25; 31,25	1,543	130,25; 55,75	78	1823
272×272	—	—	—	—	—	—	—
Экстраполяция	—	—	—	—	—	—	—

Примечания. Экстраполированное местоположение первого пика тепловыделения по программе VENTURE 31; 31 см, а второго пика 130; 55,5 см ($q_{\text{Макс}}^{II} \approx 1,533$) [3].

по конечно-разностным программам VENTURE, JAR и VANGER. В двух первых расчетная точка лежит в центре интервала, а в последней — на краю. Точности расчета брались такими же, как и для тестовой задачи 2. Число неизвестных в программах VENTURE и VANGER равно удвоенному квадрату числа интервалов по одному направлению, а в программе JAR — примерно в два раза меньше; это связано с тем, что здесь все расчеты, кроме первого, проводились с симметрией 45°.

Значения $k_{эф}$ и максимального тепловыделения (см. табл. 5.2) получены с помощью всех трех программ, а плотности потоков

Таблица 5.3

Усредненная по зонам плотность потоков нейтронов быстрой группы в тестовой задаче 5 (тест МАГАТЭ 2D). Программа VENTURE; точка в центре [3]

Номер кассеты	Число интервалов					
	9×9	17×17	34×34	68×68	272×272	Экстраполяция
1	30,88	34,31	34,47	33,41	32,69	32,64
2	44,85	47,02	45,03	43,20	42,20	42,13
3	48,27	50,60	48,87	47,15	46,20	46,13
4	41,79	42,48	41,04	39,69	38,96	38,91
5	23,38	26,55	27,26	26,98	26,73	26,71
6	31,20	30,42	30,27	30,17	30,12	30,11
7	28,81	28,12	28,74	29,28	29,56	29,58
8	20,55	18,45	19,15	19,95	20,41	20,45
9	1,698	2,139	2,725	3,154	3,378	3,392
10	48,30	50,65	48,55	46,68	45,65	45,58
11	49,14	51,38	49,66	47,95	47,02	46,97
12	44,01	45,30	43,84	42,54	41,81	41,75
13	34,82	36,29	35,52	34,81	34,44	34,42
14	33,41	33,14	33,00	32,94	32,91	32,91
15	29,28	28,44	29,08	29,67	29,99	30,01
16	19,99	17,90	18,61	19,45	19,93	19,97
17	1,639	2,036	2,595	3,008	3,227	3,241
18	48,56	50,51	49,00	48,04	46,68	46,60
19	44,17	45,55	44,42	43,34	42,73	42,70
20	37,62	38,75	38,27	37,73	37,45	37,43
21	33,85	33,55	33,69	33,82	33,87	33,87
22	30,19	27,64	28,12	28,81	29,22	29,24
23	16,20	14,55	15,33	16,22	16,72	16,76
24	1,304	1,523	1,936	2,264	2,443	2,456
25	39,53	40,05	39,16	38,35	37,91	37,87
26	31,79	31,98	31,59	31,27	31,07	31,06
27	28,72	27,94	28,17	28,48	28,64	28,65
28	22,73	20,68	21,37	22,21	22,67	22,71
29	2,993	3,745	4,781	5,544	5,955	5,982
30	0,245	0,425	0,558	0,659	0,714	0,718
31	16,69	19,20	20,14	20,43	20,50	20,50
32	21,82	19,90	20,13	20,59	20,86	20,87
33	14,37	12,70	13,32	14,07	14,49	14,52
34	1,267	1,511	1,922	2,248	2,424	2,436
35	14,61	12,59	13,03	13,69	14,07	14,09
36	2,166	2,522	3,184	3,707	3,994	4,013
37	0,267	0,338	0,447	0,529	0,574	0,577
38	0,338	0,393	0,506	0,595	0,644	0,647

нейтронов в кассетах только с помощью программы VENTURE. При расчете по программе JAR точность расчета бралась 10^{-5} (как для $k_{эф}$, так и для плотности потоков во внутренних итерациях). Зависимость рассчитанных характеристик от числа интервалов подробнее всего исследована с помощью программы VENTURE. Экстраполированные значения получены с помощью квадратичной интерполяции.

Таблица 5.4

Усредненная по зонам плотность потоков нейтронов тепловой группы
в тестовой задаче 5 (тест МАГАТЭ 2D). Программа VENTURE;
точка в центре [3]

Номер кассеты	Число интервалов					Экстраполяция
	9×9	17×17	34×34	68×68	272×272	
1	4,976	5,573	5,699	5,615	5,557	5,553
2	10,498	10,987	10,486	10,027	9,774	9,758
3	11,333	11,877	11,474	11,068	10,845	10,831
4	9,791	9,934	9,562	9,222	9,033	9,021
5	3,761	4,311	4,505	4,535	4,542	4,542
6	7,306	7,102	7,043	6,979	6,969	6,967
7	6,769	6,607	6,759	6,887	6,957	6,961
8	5,162	4,753	5,096	5,429	5,612	5,625
9	5,849	6,597	7,307	7,775	8,019	8,035
10	11,34	11,89	11,39	10,95	10,71	10,69
11	11,54	12,06	11,66	11,29	11,04	11,02
12	10,33	10,63	10,29	9,975	9,808	9,795
13	8,152	8,483	8,271	8,083	7,976	7,969
14	7,844	7,780	7,745	7,729	7,718	7,718
15	6,879	6,691	6,849	6,995	7,074	7,079
16	5,016	4,605	4,950	5,285	5,468	5,481
17	5,630	6,248	6,926	7,385	7,625	7,641
18	11,40	11,86	11,50	11,15	10,96	10,95
19	10,370	10,69	10,43	10,17	10,03	10,02
20	8,835	9,097	8,984	8,859	8,790	8,784
21	7,953	7,885	7,921	7,955	7,973	7,974
22	7,477	6,848	6,974	7,154	7,255	7,262
23	4,216	3,952	4,439	4,888	5,139	5,155
24	4,446	4,694	5,240	5,653	5,872	5,886
25	9,280	9,398	9,188	8,998	8,893	8,886
26	7,449	7,478	7,366	7,266	7,207	7,203
27	6,753	6,568	6,632	6,707	6,750	6,753
28	5,736	5,368	5,739	6,093	6,289	6,301
29	10,04	10,75	11,60	12,18	12,48	12,50
30	1,692	1,998	2,378	2,665	2,819	2,830
31	2,680	3,124	3,343	3,448	3,501	3,505
32	5,395	4,906	4,948	5,048	5,103	5,107
33	3,686	3,435	3,838	4,220	4,432	4,437
34	4,526	4,849	5,413	5,838	6,052	6,077
35	3,764	3,434	3,790	4,142	4,343	4,357
36	7,200	7,188	7,707	8,135	8,362	8,378
37	1,359	1,582	1,885	2,118	2,244	2,253
38	1,694	1,860	2,175	2,428	2,568	2,568

§ 6. Большой реактор на быстрых нейтронах в RZ-геометрии

6.1. Прототип теста. Данная двухмерная модель большого энергетического реактора-размножителя на быстрых нейтронах с оксидным топливом и натриевым теплоносителем в R, Z-геометрии была разработана [22] для сравнения программ расчета стран — членов СЭВ.

6.2. Тестовая задача. Решается диффузионное уравнение для двухмерной модели.

6.2.1. Геометрия. Рассматривается цилиндрическая модель реактора. На рис. 6.1 приведены размеры его геометрических зон, граничные условия и соответствие между геометрическими и «физическими» зонами (зонами различного состава).

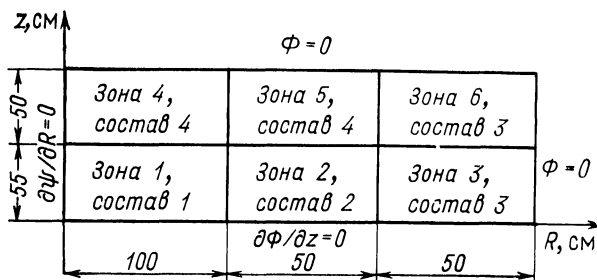


Рис. 6.1. Геометрия тестовой модели 6

При формулировке данного теста первоначально ставилась задача провести расчеты по разным программам с заданным числом узлов (основной вариант). Однако возможны расчеты и с увеличенным числом интервалов (эталонный вариант). Схема разбиения объема реактора узлами расчетной сетки приведена в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Число узлов расчетной сетки в тестовой задаче 6

Зоны	Число интервалов по радиусу		Число интервалов по высоте		Зоны	Число интервалов по радиусу		Число интервалов по высоте	
	основной вариант	эталонный вариант	основной вариант	эталонный вариант		основной вариант	эталонный вариант	основной вариант	эталонный вариант
1	20	40	10	35	4	20	40	5	18
2	20	40	10	35	5	20	40	5	18
3	10	20	10	35	6	10	20	5	18

Примечание. Полное число узлов в основном варианте 50 по радиусу и 15 по высоте; в эталонном варианте 100 по радиусу и 53 по высоте.

6.2.2. Ядерные концентрации. Как видно из табл. 6.2 и рис. 6.1, активная зона разделена на две части, отличающиеся концентрацией изотопов плутония в составе топлива. Суммарные концентрации топливных нуклидов в обеих частях активной зоны совпадают. Эти части и торцевой экран имеют одинаковые концентрации натрия, кислорода и нуклидов конструкционных материалов. В активной зоне содержатся также осколки деления, кон-

Составы физических зон для тестовой задачи 6 (концентрация ядер $\rho_{i,r}$, 10^{22} см^{-3})

Нуклид i	Номер состава			
	1	2	3	4
^{238}U	0,7397	0,7109	1,270	0,955
^{239}Pu	0,0746	0,09333	—	—
^{240}Pu	0,0283	0,03522	—	—
^{241}Pu	0,01242	0,01557	—	—
Осколки ^{239}Pu	0,0342	0,0342	—	—
O	1,710	1,710	2,540	1,910
Na	0,720	0,720	0,550	0,720
Fe	1,235	1,235	0,842	1,235
Cr	0,321	0,321	0,219	0,321
Ni	0,266	0,266	0,1815	0,266
Mo	0,0326	0,0326	0,0224	0,0326

центрация которых в обеих частях активной зоны принята одинаковой и соответствующей средней глубине выгорания около 4%. Приводимые в табл. 6.2 концентрации относятся к парам осколков.

Температура всех зон реактора 900°K .

6.2.3. Подготовка малогрупповых констант. Исходными данными для проведения базового расчета послужила система 26-групповых констант [23] с учетом изменений в групповых сечениях основных делящихся нуклидов, введенных на основании оценок, выполненных в 1969 г.

Макроскопические 26-групповые константы были получены с помощью программы МИМ [24]. При подготовке констант учтена резонансная самоэкранировка сечений и в сечения замедления введена поправка на форму внутригруппового спектра.

В 26-групповом приближении выполнен двухмерный диффузионный расчет модели и по полученным интегральным спектрам зон проведена свертка 26-групповых констант в шестигрупповые. Энергетические границы групп малогрупповой системы и доли спектра нейтронов деления, попадающих в эти группы, приведены в табл. 6.3, из которой видно, что последняя, шестая, группа малогруппового разбиения соответствует тепловой группе констант БНАБ [23]. Поскольку отношение потока тепловых нейтронов к максимальному потоку в зоне составляет $\sim 10^{-10}$, для расчета реактора вполне допустимо использовать первые пять групп сечений.

Значения шестигрупповых макроконстант физических зон приведены в табл. 6.4. Шестигрупповые микроконстанты нуклидов, входящих в состав реактора, приведены в табл. 6.5.

Групповые интервалы и спектр нейтронов деления для тестовой задачи 6

Номер группы	Энергия	Доля спектра нейтронов деления	Номер группы для БНАБ [23]
1	10,5—2,5 МэВ	0,308	1—3
2	2,5—0,8 МэВ	0,464	4—5
3	800—46,5 кэВ	0,224	6—9
4	46,5—0,215 кэВ	0,004	10—16
5	215—0,215 эВ	0	17—25
6	Тепловая	0	26

6.2.4. Список функционалов для расчета. $k_{эф}$ — коэффициент размножения (максимальное собственное число условно-критической задачи).

$\Phi_{g,r}$ — нормированные групповые плотности потоков нейтронов, проинтегрированные по объемам геометрических зон:

$$\Phi_{g,r} = \int_{V_r} \Phi_g(R, Z) dV / \sum_g \Phi_{g,r}, \quad (6.1)$$

где V_r — объем r -й геометрической зоны.

$P_{i,r}$ — скорость рождения нейтронов деления в результате деления i -го нуклида в r -й геометрической зоне, нормированная на 1000 рождений во всем реакторе:

$$P_{i,r} = \frac{\sum_g \rho_{i,r} \nu \sigma_{f,g}^i \Phi_{g,r}}{\sum_r \sum_i P_{i,r}} 1000; \quad (6.2)$$

$F_{i,r}$ — скорость деления i -го нуклида в r -й геометрической зоне с той же нормировкой:

$$F_{i,r} = \frac{\sum_g \rho_{i,r} \sigma_{f,g}^i \Phi_{g,r}}{\sum_r \sum_i P_{i,r}} 1000; \quad (6.3)$$

$C_{i,r}$ — скорость захвата нейтронов i -м нуклидом без деления в r -й геометрической зоне:

$$C_{i,r} = \frac{\sum_g \rho_{i,r} \sigma_{c,g}^i \Phi_{g,r}}{\sum_r \sum_i P_{i,r}} 1000. \quad (6.4)$$

P — суммарная составляющая нейтронного баланса:

$$P = k_{эф}(F + C + L), \quad (6.5)$$

где

$$P = \sum_r \sum_i P_{i,r} = 1000, \quad (6.6)$$

Макроскопические сечения тестовой задачи 6

Номер группы	D , см	Σ_{cfd} , см ⁻¹	$\nu\Sigma_f$, см ⁻¹	Σ_g , см ⁻¹	$\Sigma_{1 \rightarrow g}$, см ⁻¹	$\Sigma_{in}^2 \rightarrow g$, см ⁻¹
1	0,29296 · 10 ¹	0,57543 · 10 ⁻¹	0,19361 · 10 ⁻¹	0,73461 · 10 ⁻²	—	—
2	0,22218 · 10 ¹	0,36158 · 10 ⁻¹	0,10219 · 10 ⁻¹	0,13780 · 10 ⁻¹	0,24372 · 10 ⁻¹	—
3	0,14031 · 10 ¹	0,79228 · 10 ⁻²	0,41813 · 10 ⁻²	0,46118 · 10 ⁻²	0,18634 · 10 ⁻¹	0,17747 · 10 ⁻¹
4	0,90783	0,97871 · 10 ⁻²	0,68224 · 10 ⁻²	0,85456 · 10 ⁻⁴	—	—
5	0,74131	0,60521 · 10 ⁻¹	0,53171 · 10 ⁻¹	0,27486 · 10 ⁻⁹	—	—
6	0,44070	0,56734	0,10061 · 10 ¹	0	—	—
Физическая зона 1						
1	0,29288 · 10 ¹	0,57552 · 10 ⁻¹	0,20563 · 10 ⁻¹	0,73430 · 10 ⁻²	—	—
2	0,22228 · 10 ¹	0,36244 · 10 ⁻¹	0,11608 · 10 ⁻¹	0,13515 · 10 ⁻¹	0,24241 · 10 ⁻¹	—
3	0,14080 · 10 ¹	0,80726 · 10 ⁻²	0,52344 · 10 ⁻²	0,43880 · 10 ⁻²	0,18430 · 10 ⁻¹	0,17651 · 10 ⁻¹
4	0,90917	0,10335 · 10 ⁻¹	0,83531 · 10 ⁻²	0,68958 · 10 ⁻⁴	—	—
5	0,72611	0,68592 · 10 ⁻¹	0,65671 · 10 ⁻¹	0,44285 · 10 ⁻⁹	—	—
6	0,37590	0,69717	0,12592 · 10 ¹	0	—	—
Физическая зона 2						
1	0,27235 · 10 ¹	0,63735 · 10 ⁻¹	0,21676 · 10 ⁻¹	0,87435 · 10 ⁻²	—	—
2	0,19761 · 10 ¹	0,44125 · 10 ⁻¹	0,70067 · 10 ⁻²	0,19658 · 10 ⁻¹	0,23658 · 10 ⁻¹	—
3	0,11829 · 10 ¹	0,10072 · 10 ⁻¹	0	0,75424 · 10 ⁻²	0,23156 · 10 ⁻¹	0,20420 · 10 ⁻¹
4	0,83603	0,95803 · 10 ⁻²	0	0,45721 · 10 ⁻³	—	—
5	0,85607	0,25240 · 10 ⁻¹	0	0,13615 · 10 ⁻⁶	—	—
6	0,15036 · 10 ¹	0,38119 · 10 ⁻¹	0	0	—	—
Физическая зона 3						
1	0,28226 · 10 ¹	0,59789 · 10 ⁻¹	0,16269 · 10 ⁻¹	0,78837 · 10 ⁻²	—	—
2	0,21183 · 10 ¹	0,38685 · 10 ⁻¹	0,51092 · 10 ⁻²	0,16968 · 10 ⁻¹	0,25270 · 10 ⁻¹	—
3	0,13005 · 10 ¹	0,86396 · 10 ⁻²	0	0,66805 · 10 ⁻²	0,20233 · 10 ⁻¹	0,18635 · 10 ⁻¹
4	0,86345	0,79436 · 10 ⁻²	0	0,49845 · 10 ⁻³	—	—
5	0,81894	0,23333 · 10 ⁻¹	0	0,11969 · 10 ⁻⁶	—	—
6	0,14152 · 10 ¹	0,43004 · 10 ⁻¹	0	0	—	—

Примечание. D — коэффициент диффузии; Σ_{cfd} — суммарное сечение увода нейтронов из группы вследствие захвата, деления и замедления; Σ_g — сечение упругого замедления; $\Sigma_{i \rightarrow j} = \Sigma_{i \rightarrow j} + \Sigma_{j-1} \delta_{ij}$, $j=1$.

МИКРОСКОПИЧЕСКИЕ СЕЧЕНИЯ

Физическая зона 1

Номер группы	Сечение захвата, б			
	^{238}U	^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu
1	$0,19640 \cdot 10^{-1}$	$0,26100 \cdot 10^{-1}$	$0,32733 \cdot 10^{-1}$	$0,16100 \cdot 10^{-1}$
2	0,10058	$0,39997 \cdot 10^{-1}$	0,17696	$0,47391 \cdot 10^{-1}$
3	0,18035	0,19369	0,43630	0,23441
4	0,67539	$0,12806 \cdot 10^1$	$0,16282 \cdot 10^1$	$0,11394 \cdot 10^1$
5	$0,24799 \cdot 10$	$0,15971 \cdot 10^2$	$0,14985 \cdot 10^2$	$0,83054 \cdot 10^1$
6	$0,13949 \cdot 10$	$0,13847 \cdot 10^3$	$0,15073 \cdot 10^3$	$0,20438 \cdot 10^3$

Номер группы	Осколки ^{239}Pu	O	Na	Fe
1	$0,32733 \cdot 10^{-1}$	$0,34593 \cdot 10^{-1}$	$0,42136 \cdot 10^{-2}$	$0,46472 \cdot 10^{-2}$
2	$0,93186 \cdot 10^{-1}$	0	$0,20000 \cdot 10^{-3}$	$0,33879 \cdot 10^{-2}$
3	0,25659	0	$0,87943 \cdot 10^{-3}$	$0,49676 \cdot 10^{-2}$
4	$0,12427 \cdot 10^1$	0	$0,40787 \cdot 10^{-2}$	$0,10480 \cdot 10^{-1}$
5	$0,13545 \cdot 10^2$	0	$0,72991 \cdot 10^{-2}$	$0,38551 \cdot 10^{-1}$
6	$0,24526 \cdot 10^2$	0	0,26826	$0,12926 \cdot 10$

Номер группы	Cr	Ni	Mo
1	$0,47050 \cdot 10^{-2}$	0,15565	$0,12999 \cdot 10^{-1}$
2	$0,35795 \cdot 10^{-2}$	$0,47504 \cdot 10^{-1}$	$0,24638 \cdot 10^{-1}$
3	$0,57356 \cdot 10^{-2}$	$0,11302 \cdot 10^{-1}$	$0,67683 \cdot 10^{-1}$
4	$0,16203 \cdot 10^{-1}$	$0,21399 \cdot 10^{-1}$	0,32671
5	$0,42866 \cdot 10^{-1}$	$0,63760 \cdot 10^{-1}$	$0,35789 \cdot 10^1$
6	$0,15840 \cdot 10^1$	$0,23502 \cdot 10^{-1}$	$0,13797 \cdot 10^1$

Номер группы	Сечение деления, б			
	^{238}U	^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu
1	0,56978	$0,18390 \cdot 10^1$	$0,16204 \cdot 10^1$	$0,14017 \cdot 10^1$
2	0,21070	$0,18482 \cdot 10^1$	$0,15420 \cdot 10^1$	$0,13630 \cdot 10^1$
3	0	$0,15181 \cdot 10^1$	0,17151	$0,19956 \cdot 10^1$
4	0	$0,21714 \cdot 10^1$	$0,17377 \cdot 10^{-1}$	$0,58311 \cdot 10^1$
5	0	$0,19437 \cdot 10^2$	0	$0,31644 \cdot 10^2$
6	0	$0,37913 \cdot 10^3$	0	$0,52117 \cdot 10^3$

Номер группы	Сечение деления, умноженное на ν , б			
	^{238}U	^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu
1	$0,17013 \cdot 10^1$	$0,62178 \cdot 10^1$	$0,53975 \cdot 10^1$	$0,49136 \cdot 10^1$
2	0,56099	$0,56722 \cdot 10^1$	$0,46073 \cdot 10^1$	$0,42997 \cdot 10^1$
3	0	$0,44257 \cdot 10^1$	0,49142	$0,59633 \cdot 10^1$
4	0	$0,62533 \cdot 10^1$	$0,48826 \cdot 10^{-1}$	$0,17260 \cdot 10^2$
5	0	$0,55976 \cdot 10^2$	0	$0,91890 \cdot 10^2$
6	0	$0,10918 \cdot 10^4$	0	$0,15427 \cdot 10^4$

Физическая зона 2

Номер группы	Сечение захвата, б			
	^{238}U	^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu
1	$0,19636 \cdot 10^{-1}$	$0,26097 \cdot 10^{-1}$	$0,32727 \cdot 10^{-1}$	$0,16097 \cdot 10^{-1}$
2	0,10032	$0,39997 \cdot 10^{-1}$	0,17640	$0,47280 \cdot 10^{-1}$
3	0,17899	0,19193	0,43219	0,23120
4	0,66710	$0,12254 \cdot 10^1$	$0,15791 \cdot 10^1$	$0,11096 \cdot 10^1$
5	$0,25530 \cdot 10^1$	$0,15747 \cdot 10^2$	$0,14365 \cdot 10^2$	$0,84620 \cdot 10^1$
6	$0,13949 \cdot 10^1$	$0,13847 \cdot 10^3$	$0,15073 \cdot 10^3$	$0,20438 \cdot 10^3$

Номер группы	Осколки ^{239}Pu	O	Na	Fe
1	$0,32727 \cdot 10^{-1}$	$0,34605 \cdot 10^{-1}$	$0,42114 \cdot 10^{-2}$	$0,46455 \cdot 10^{-2}$
2	$0,93038 \cdot 10^{-1}$	0	$0,20000 \cdot 10^{-3}$	$0,33850 \cdot 10^{-2}$
3	0,25403	0	$0,86697 \cdot 10^{-3}$	$0,49584 \cdot 10^{-2}$
4	$0,11975 \cdot 10^1$	0	$0,39814 \cdot 10^{-2}$	$0,10228 \cdot 10^{-1}$
5	$0,13645 \cdot 10^2$	0	$0,74447 \cdot 10^{-2}$	$0,39167 \cdot 10^{-1}$
6	$0,24526 \cdot 10^2$	0	0,26826	$0,12926 \cdot 10^1$

Номер группы	Cr	Ni	Mo
1	$0,47022 \cdot 10^{-2}$	0,15567	$0,12995 \cdot 10^{-1}$
2	$0,35758 \cdot 10^{-2}$	$0,47659 \cdot 10^{-1}$	$0,24609 \cdot 10^{-1}$
3	$0,56971 \cdot 10^{-2}$	$0,11251 \cdot 10^{-1}$	$0,67064 \cdot 10^{-1}$
4	$0,15828 \cdot 10^{-1}$	$0,21280 \cdot 10^{-1}$	0,31692
5	$0,43692 \cdot 10^{-1}$	$0,65022 \cdot 10^{-1}$	$0,36372 \cdot 10^1$
6	$0,15840 \cdot 10^1$	$0,23502 \cdot 10^1$	$0,13797 \cdot 10^1$

Номер группы	Сечения деления, б			
	^{238}U	^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu
1	0,56976	$0,18389 \cdot 10^1$	$0,16203 \cdot 10^1$	$0,14017 \cdot 10^1$
2	0,21229	$0,18490 \cdot 10^1$	$0,15424 \cdot 10^1$	$0,13635 \cdot 10^1$
3	0	$0,15193 \cdot 10^1$	0,17674	$0,19795 \cdot 10^1$
4	0	$0,21198 \cdot 10^1$	$0,17568 \cdot 10^{-1}$	$0,57241 \cdot 10^1$
5	0	$0,19007 \cdot 10^2$	0	$0,31646 \cdot 10^2$
6	0	$0,37913 \cdot 10^3$	0	$0,52117 \cdot 10^3$

Номер группы	Сечение деления, умноженное на ν , б			
	^{238}U	^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu
1	$0,17012 \cdot 10^1$	$0,62176 \cdot 10^1$	$0,53973 \cdot 10^1$	$0,49136 \cdot 10^1$
2	0,56525	$0,56754 \cdot 10^1$	$0,46090 \cdot 10^1$	$0,43019 \cdot 10^1$
3	0	$0,44304 \cdot 10^1$	0,50649	$0,59165 \cdot 10^1$
4	0	$0,61049 \cdot 10^1$	$0,49362 \cdot 10^{-1}$	$0,16943 \cdot 10^2$
5	0	$0,54738 \cdot 10^2$	0	$0,93671 \cdot 10^2$
6	0	$0,10918 \cdot 10^4$	0	$0,15427 \cdot 10^4$

Физическая зона 3

Номер группы	Сечение захвата, б			
	^{238}U	^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu
1	$0,19580 \cdot 10^{-1}$	$0,26034 \cdot 10^{-1}$	$0,32633 \cdot 10^{-1}$	$0,16034 \cdot 10^{-1}$
2	0,10114	$0,39997 \cdot 10^{-1}$	0,17817	$0,47633 \cdot 10^{-1}$
3	0,19121	0,20366	0,46840	0,25918
4	0,69405	$0,17322 \cdot 10^1$	$0,20946 \cdot 10^1$	$0,13678 \cdot 10^1$
5	$0,18405 \cdot 10^1$	$0,25795 \cdot 10^2$	$0,28606 \cdot 10^2$	$0,99133 \cdot 10^1$
6	$0,13949 \cdot 10^1$	$0,13847 \cdot 10^3$	$0,15673 \cdot 10^3$	$0,20438 \cdot 10^3$

Номер группы	Осколки ^{239}Pu			
	Осколки ^{239}Pu	O	Na	Fe
1	$0,32633 \cdot 10^{-1}$	$0,34784 \cdot 10^{-1}$	$0,43734 \cdot 10^{-2}$	$0,47601 \cdot 10^{-2}$
2	$0,93509 \cdot 10^{-1}$	0	$0,20000 \cdot 10^{-3}$	$0,34473 \cdot 10^{-2}$
3	0,27683	0	$0,99881 \cdot 10^{-3}$	$0,53200 \cdot 10^{-2}$
4	$0,16409 \cdot 10^1$	0	$0,51375 \cdot 10^{-2}$	$0,12734 \cdot 10^{-1}$
5	$0,18309 \cdot 10^2$	0	$0,86939 \cdot 10^{-2}$	$0,45216 \cdot 10^{-1}$
6	$0,24526 \cdot 10^2$	0	0,26826	$0,12926 \cdot 10^1$

Номер группы	Cr	Ni	Mo
1	$0,48071 \cdot 10^{-2}$	0,15597	$0,13014 \cdot 10^{-1}$
2	$0,35876 \cdot 10^{-2}$	$0,47313 \cdot 10^{-1}$	$0,24703 \cdot 10^{-1}$
3	$0,61017 \cdot 10^{-2}$	$0,11841 \cdot 10^{-1}$	$0,72533 \cdot 10^{-1}$
4	$0,19030 \cdot 10^{-1}$	$0,22881 \cdot 10^{-1}$	0,40154
5	$0,51234 \cdot 10^{-1}$	$0,76296 \cdot 10^{-1}$	$0,52925 \cdot 10^1$
6	$0,15840 \cdot 10^1$	$0,23502 \cdot 10^1$	$0,13797 \cdot 10^1$

Номер группы	Сечения деления, б			
	^{238}U	^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu
1	0,57106	$0,18401 \cdot 10^1$	$0,16216 \cdot 10^1$	$0,14627 \cdot 10^1$
2	0,20723	$0,18465 \cdot 10^1$	$0,15412 \cdot 10^1$	$0,13618 \cdot 10^1$
3	0	$0,15091 \cdot 10^1$	0,13614	$0,21206 \cdot 10^1$
4	0	$0,26165 \cdot 10^1$	$0,15982 \cdot 10^{-1}$	$0,66464 \cdot 10^1$
5	0	$0,29659 \cdot 10^2$	0	$0,36930 \cdot 10^2$
6	0	$0,37913 \cdot 10^3$	0	$0,52117 \cdot 10^3$

Номер группы	Сечения деления, умноженные на ν , б			
	^{238}U	^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu
1	$0,17068 \cdot 10^1$	$0,62257 \cdot 10^1$	$0,54050 \cdot 10^1$	$0,49201 \cdot 10^1$
2	0,55170	$0,56654 \cdot 10^1$	$0,46035 \cdot 10^1$	$0,42947 \cdot 10^1$
3	0	$0,43917 \cdot 10^1$	0,38956	$0,63278 \cdot 10^1$
4	0	$0,75352 \cdot 10^1$	$0,44906 \cdot 10^{-1}$	$0,19673 \cdot 10^2$
5	0	$0,85415 \cdot 10^2$	0	$0,10931 \cdot 10^3$
6	0	$0,10918 \cdot 10^4$	0	$0,15427 \cdot 10^4$

Физическая зона 4

Номер группы	Сечения захвата, б			
	^{238}U	^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu
1	$0,19650 \cdot 10^{-1}$	$0,26100 \cdot 10^{-1}$	$0,32751 \cdot 10^{-1}$	$0,16100 \cdot 10^{-1}$
2	0,10216	$0,39997 \cdot 10^{-1}$	0,18034	$0,48068 \cdot 10^{-2}$
3	0,19013	0,20557	0,46523	0,25681
4	0,73274	$0,18169 \cdot 10^1$	$0,21839 \cdot 10^1$	$0,14152 \cdot 10^1$
5	$0,21702 \cdot 10^1$	$0,25776 \cdot 10^2$	$0,28604 \cdot 10^2$	$0,99610 \cdot 10^1$
6	$0,13949 \cdot 10^1$	$0,13847 \cdot 10^3$	$0,15073 \cdot 10^3$	$0,20438 \cdot 10^3$

Номер группы	Осколки ^{239}Pu	O	Na	Fe
1	$0,32751 \cdot 10^{-1}$	$0,34652 \cdot 10^{-1}$	$0,42836 \cdot 10^{-2}$	$0,46962 \cdot 10^{-2}$
2	$0,94089 \cdot 10^{-1}$	0	$0,20000 \cdot 10^{-3}$	$0,34094 \cdot 10^{-2}$
3	0,27478	0	$0,96748 \cdot 10^{-3}$	$0,50571 \cdot 10^{-2}$
4	$0,17200 \cdot 10^1$	0	$0,48715 \cdot 10^{-2}$	$0,12587 \cdot 10^{-1}$
5	$0,18334 \cdot 10^2$	0	$0,87336 \cdot 10^{-2}$	$0,45388 \cdot 10^{-1}$
6	$0,24526 \cdot 10^2$	0	0,26826	$0,12926 \cdot 10^1$

Номер группы	Cr	Ni	Mo
1	$0,47608 \cdot 10^{-2}$	0,15563	$0,13036 \cdot 10^{-1}$
2	$0,36021 \cdot 10^{-2}$	$0,46579 \cdot 10^{-1}$	$0,24819 \cdot 10^{-1}$
3	$0,60193 \cdot 10^{-2}$	$0,11721 \cdot 10^{-1}$	$0,72047 \cdot 10^{-1}$
4	$0,19260 \cdot 10^{-1}$	$0,22513 \cdot 10^{-1}$	0,41464
5	$0,51464 \cdot 10^{-1}$	$0,76643 \cdot 10^{-1}$	$0,49539 \cdot 10^1$
6	$0,15840 \cdot 10^1$	$0,23502 \cdot 10^1$	$0,13797 \cdot 10^1$

Номер группы	Сечения деления, б			
	^{238}U	^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu
1	0,57037	$0,18401 \cdot 10^1$	$0,16213 \cdot 10^1$	$0,14024 \cdot 10^1$
2	0,20099	$0,18434 \cdot 10^1$	$0,15398 \cdot 10^1$	$0,13596 \cdot 10^1$
3	0	$0,15098 \cdot 10^1$	0,13800	$0,21084 \cdot 10^1$
4	0	$0,27053 \cdot 10^1$	$0,15692 \cdot 10^{-1}$	$0,68130 \cdot 10^1$
5	0	$0,29619 \cdot 10^2$	0	$0,37104 \cdot 10^2$
6	0	$0,37913 \cdot 10^3$	0	$0,52117 \cdot 10^3$

Номер группы	Сечения деления, умноженные на ν , б			
	^{238}U	^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu
1	$0,17035 \cdot 10^1$	$0,62223 \cdot 10^1$	$0,54013 \cdot 10^1$	$0,49167 \cdot 10^1$
2	0,53500	$0,56530 \cdot 10^1$	$0,45967 \cdot 10^1$	$0,42858 \cdot 10^1$
3	0	$0,43943 \cdot 10^1$	0,39489	$0,62920 \cdot 10^1$
4	0	$0,77910 \cdot 10^1$	$0,44093 \cdot 10^{-1}$	$0,20166 \cdot 10^2$
5	0	$0,85301 \cdot 10^2$	0	$0,10983 \cdot 10^3$
6	0	$0,10918 \cdot 10^4$	0	$0,15427 \cdot 10^4$

$$F = \sum_r \sum_i F_{i,r}, \quad (6.7)$$

$$C = \sum_r \sum_i C_{i,r}. \quad (6.8)$$

Утечка нейтронов L определяется условием (6.5).

Характеристики воспроизводства:

KB_r — «физический» коэффициент воспроизводства; KB_r — его составляющие по зонам:

$$KB_r = \frac{[C_{8,r} + C_{0,r}] - (1 - \delta_{r1})(1 - \delta_{r2})[C_{9,r} + F_{9,r} + C_{1,r} + F_{1,r}]}{\sum_{r=1}^2 (\delta_{r1} + \delta_{r2})(C_{9,r} + F_{9,r} + C_{1,r} + F_{1,r})}. \quad (6.9)$$

Здесь символы Кронекера $\delta_{r,r'}$ используются для учета того обстоятельства, что выгорание топливных нуклидов в экране следует рассматривать как уменьшение скорости накопления нового топлива, а не как выгорание загруженного. Поскольку в данной модели плутоний в экране отсутствует, формула (6.9) сводится к

$$KB_r = (C_{3,r} + C_{0,r}) \Big/ \sum_{r=1}^2 (C_{9,r} + F_{9,r} + C_{1,r} + F_{1,r}). \quad (6.10)$$

6.3. Решения. Все расчеты проводились в шестигрупповом приближении с использованием макро- и микросечений, приведенных в табл. 6.4 и 6.5. Расчеты осуществлялись по программам МСТВ, МСТ, 2D, ANANUSO, ARIENA, V2DR и DIPOL1 [22, 24—28]. По программам МСТ и МСТВ проведено по два расчета. Первый с 750 точками: 50 точек по радиусу и 15 по высоте. Расчет с этим числом точек обозначен МТС (50) и МСТВ (50). Второй расчет со 100 точками по радиусу и 53 по высоте обозначен МСТ (100) и МСТВ (100). Программа 2D применялась только для расчета «стандартного» варианта. Перед получением интегральных потоков по программе 2D, использованных затем для расчета сравниваемых функционалов, проводилась интерполяция потоков на середину расчетных интервалов.

Таблица 6.6

Нормированные интегральные потоки по расчетным зонам для тестовой задачи 6. Программа МСТВ (100)

Номер группы	Номер зоны					
	1	2	3	4	5	6
1	0,031173	0,035154	0,013346	0,010959	0,012321	0,005954
2	0,100886	0,111303	0,048113	0,043310	0,047659	0,024461
3	0,593814	0,600230	0,516116	0,502744	0,510492	0,456319
4	0,273676	0,252933	0,416058	0,435148	0,422033	0,503497
5	0,000448	0,000377	0,006364	0,007836	0,007491	0,009766
6	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

Таблица 6.7

Составляющие коэффициента воспроизводства по зонам для тестовой задачи 6.
Программа МСТВ (100)

Номер зоны, <i>r</i>	1	2	3	4	5	6
KB_r	0,5628	0,4732	0,1789	0,1318	0,1118	0,0305

Примечание. KB по реактору 1,4893; $KBA = KB_1 + KB_2 = 1,0361$.

Таблица 6.8

Баланс нейтронов для тестовой задачи 6. Программа МСТВ (100)

Нуклид	Номер зоны					
	1	2	3	4	5	6

Скорость рождения нейтронов деления

^{238}U	63,46	61,36	7,44	4,31	4,14	0,53
^{239}Pu	299,54	333,13	0,00	0,00	0,00	0,00
^{240}Pu	20,98	25,25	0,00	0,00	0,00	0,00
^{241}Pu	86,44	93,35	0,00	0,00	0,00	0,00
Итого	470,42	513,09	7,44	4,31	4,14	0,53

Скорость деления

^{238}U	22,58	21,83	2,65	1,54	1,48	0,19
^{239}Pu	102,06	113,29	0,00	0,00	0,00	0,00
^{240}Pu	6,92	8,40	0,00	0,00	0,00	0,00
^{241}Pu	28,92	31,20	0,00	0,00	0,00	0,00
Итого	160,48	174,72	2,65	1,54	1,48	0,19

Скорость захвата нейтронов

^{238}U	175,87	144,49	61,05	44,98	38,15	10,42
^{239}Pu	27,87	28,65	0,00	0,00	0,00	0,00
^{240}Pu	16,17	16,97	0,00	0,00	0,00	0,00
^{241}Pu	4,47	4,69	0,00	0,00	0,00	0,00
Осколки ^{239}Pu	13,62	11,35	0,00	0,00	0,00	0,00
O	1,44	1,46	0,14	0,07	0,07	0,00
Na	1,01	0,86	0,18	0,21	0,18	0,03
Fe	6,11	5,31	0,85	1,14	0,97	0,14
Cr	2,10	1,80	0,30	0,41	0,35	0,05
Ni	4,63	4,29	0,44	0,57	0,50	0,06
Mo	3,42	2,86	0,63	0,90	0,76	0,11
Итого	256,71	222,73	63,59	48,28	40,98	10,81

Примечание. Составляющие баланса нейтронов по реактору $P = 999,93$; $C = 643,10$; $F = 341,06$; $L = -14,25$.

Таблица 6.9

Сравнение функционалов тестовой задачи 6

Программа	$\delta k_{эф}$, %	δKB , %	δKBA , %	δKB (по зонам), %					
				1	2	3	4	5	6
Эталон									
MCTB (100)	0,12	-0,03	-0,10	-0,18	-0,04	-0,17	0,15	0,45	-0,33
2D	0,01	-0,03	-0,10	-0,18	-0,04	-0,17	0,15	0,45	-0,33
V2DR	0,23	0,15	-0,74	-5,65	5,07	7,32	-6,68	3,40	5,25
ANANUSO	0,39	0,25	-0,64	-4,25	3,63	6,20	-4,48	3,31	3,93
ARIENA	-0,18	0,19	0,10	0,21	-0,06	-0,28	0,91	0,63	0,66
PATH1	0,17	0,23	-0,10	-0,27	0,11	0,56	0,99	1,43	1,64
MCT (50)	0,02	0,01	-0,02	-0,09	0,04	0,11	-0,08	0,18	0,00
MCT (100)	-0,18	0,34	0,09	0,20	-0,04	0,17	1,52	1,25	1,64
MCTB (50)									

Таблица 6.10

Сравнение суммарной скорости рождения нейтронов деления для тестовой задачи 6

Программа	δR (по зонам), %					
	1	2	3	4	5	6
Эталон						
MCTB (100)	-0,15	0,05	0,81	3,02	3,62	1,89
2D	-0,10	0,18	-5,38	-1,62	-5,31	33,96
V2DR	-5,89	5,50	3,63	-16,01	-3,38	-3,77
ANANUSO	-4,49	4,19	-1,48	-4,87	-1,93	-3,77
ARIENA	0,09	-0,25	1,61	8,12	7,97	3,77
PATH1	-0,27	0,23	0,54	0,00	0,48	1,89
MCT (50)	-0,08	0,09	-0,54	-0,70	-0,48	-1,89
MCT (100)	0,09	-0,25	1,75	8,35	8,21	5,66
MCTB (50)						

Таблица 6.11

Сравнение суммарной скорости захватов нейтронов для тестовой задачи 6

Программа	δC (по зонам), %					
	1	2	3	4	5	6
Эталон						
MCTB (100)	-0,36	-0,24	-0,36	-0,08	0,27	-0,46
2D	-0,14	-0,06	0,25	-0,19	0,32	-2,13
V2DR	-5,68	5,04	7,30	-6,73	3,29	5,09
ANANUSO	-4,48	3,47	6,31	-4,18	3,56	3,98
ARIENA	0,19	-0,04	-0,27	0,91	0,66	0,46
PATH1	-0,38	-0,00	0,49	0,83	1,39	1,48
MCT (50)	-0,08	0,04	0,09	-0,04	0,12	0,00
MCT (100)	0,23	-0,03	0,20	1,55	1,32	1,85
MCTB (50)						

Таблица 6.12

Сравнение суммарной скорости деления для тестовой задачи 6

Программа	δF (по зонам), %					
	1	2	3	4	5	6
Эталон						
MCTB (100)	-0,21	0,05	0,75	3,25	3,38	0,00
2D	-0,16	0,17	-5,28	-1,30	-5,41	31,58
V2DR	-5,91	5,50	3,40	-16,23	-3,38	0,00
ANANUSO	-4,51	4,18	-1,51	-5,19	-2,03	-5,26
ARIENA	0,07	-0,25	1,51	8,44	8,11	5,26
PATH1	-0,27	0,23	0,38	0,00	0,68	5,26
MCT (50)	-0,00	0,10	-0,38	-0,65	0,00	0,00
MCT (100)	0,09	-0,25	1,51	8,44	8,78	5,26
MCTB (50)						

Таблица 6.13

Сравнение составляющих баланса нейтронов по реактору для тестовой задачи 6

Программа	$\delta C, \%$	$\delta F, \%$	$\delta L, \%$	Программа	$\delta C, \%$	$\delta F, \%$	$\delta L, \%$
MCTB (100)	Эталон			PATH1	0,15	-0,01	3,79
2D	-0,26	-0,04	2,11	MCT (50)	0,07	0,00	-15,09
V2DR	-0,08	-0,04	1,54	MCT (100)	-0,00	0,00	-1,05
ANANUSO	-0,01	-0,02	-17,05	MCTB (50)	0,33	0,01	-2,53
ARIENA	0,02	-0,03	-29,54				

Таблица 6.14

Сравнение интегральных потоков для тестовой задачи 6

Программа	Номер группы	$\delta \Phi$ (по зонам), %					
		1	2	3	4	5	6
MCTB (100)	Эталон						
2D	1	0,32	0,48	1,05	3,38	3,81	3,19
	2	0,29	0,43	1,08	2,45	2,73	2,94
	3	0,06	0,10	0,24	0,23	0,23	0,43
	4	-0,27	-0,49	-0,46	-0,64	-0,75	-0,57
	5	-4,44	-5,26	-0,16	2,55	2,94	-0,31
V2DR	1	-0,07	0,48	-5,93	-1,27	-6,11	47,65
	2	-0,03	0,39	-3,87	-0,95	-3,84	26,95
	3	0,00	0,04	-0,27	-0,14	-0,29	0,71
	4	0,02	-0,34	0,90	0,25	0,88	-2,38
	5	-0,67	-5,00	4,78	1,62	4,02	-7,11
ANANUSO	1	-0,71	0,48	-4,79	-9,03	-7,79	-5,71
	2	-0,49	1,53	-2,47	-6,26	-4,41	-3,56
	3	-0,01	-0,04	-0,02	-0,78	-0,57	-0,42
	4	0,28	-0,64	0,45	1,68	1,35	0,61
	5	-2,22	-5,26	1,10	3,70	2,94	0,72
ARIENA	1	-0,51	0,91	-9,59	-0,73	-6,74	-6,22
	2	-0,26	1,90	-5,28	-0,35	-3,46	-4,95
	3	0,04	0,08	-0,29	-0,05	-0,24	-0,51
	4	0,08	-1,14	1,15	0,06	0,80	0,79
	5	-4,44	-13,16	8,49	2,30	3,87	-0,61
PATH1	1	-0,19	-0,40	1,87	7,76	7,79	5,21
	2	-0,16	-0,34	1,41	5,38	5,43	4,01
	3	-0,07	-0,09	0,15	0,69	0,68	0,49
	4	0,23	0,42	0,39	-1,43	-1,56	-0,67
MCT (50)	1	0,16	0,40	-0,07	-1,09	-1,06	0,34
	2	0,17	0,37	0,12	-0,39	-0,27	0,53
	3	0,06	0,10	0,06	0,04	0,06	0,12
	4	-0,22	-0,45	-0,09	-0,03	-0,07	-0,14
	5	-2,22	-5,26	0,79	2,68	2,80	0,41
MCT (100)	1	0,00	0,09	-0,60	-0,64	-0,65	-0,17
	2	0,01	0,09	-0,37	-0,42	-0,38	-0,29
	3	0,00	0,01	-0,03	-0,04	-0,04	-0,02
	4	-0,01	-0,09	0,09	0,09	0,09	0,03
	5	0,00	0,00	0,79	0,77	0,80	0,20
MCTB (50)	1	-0,19	-0,40	1,65	7,39	7,47	4,54
	2	-0,17	-0,34	1,16	5,06	5,10	3,43
	3	-0,07	-0,09	0,09	0,63	0,61	0,41
	4	0,23	0,42	-0,28	-1,32	-1,44	-0,56
	5	4,44	5,26	-1,26	-5,23	-5,61	-1,43

По программе ANANUSO был проведен расчет с 12 координатными функциями и с 15+10 точками в осевом направлении. По программе ARIENA выполнен расчет с числом одномерных координатных функций 7×7 . По программе V2DR расчет проводился с 15 функциями по радиусу и с 13 по высоте.

Расчеты, проведенные на основе программы DIPOL1, обозначены PATH1.

В качестве эталона для сравнения выбраны результаты, полученные с помощью программы МСТВ для расчетной сетки со 100 точками по радиусу и 53 точками по высоте. Результаты эталонных расчетов приведены в табл. 6.6—6.8.

Эффективный коэффициент размножения нейтронов $k_{эф} = 1,0013326$.

Для сравнения результатов расчетов по разным программам использована формула

$$\delta x = \frac{x_{эт} - x}{x_{эт}} 100,$$

где x — значение параметра, полученного по какой-либо программе; $x_{эт}$ — значение параметра, полученное по программе МСТВ (100). Результаты сравнения параметров, перечисленных в п. 6.2.4, приведены в табл. 6.9—6.14.

При составлении табл. 6.13 значения составляющих баланса нейтронов по реактору C и F были сосчитаны дополнительно, так как в работах [25—27] они не приведены. Значения утечек L взяты из указанных работ, при этом по результатам работ [22] и [27] соотношение баланса оказалось невыполненным. В результате сравнения установлено, что расхождения в $k_{эф}$ не превосходят 0,4%, а в КВ — не более 0,35%. Различия в составляющих КВ по зонам достигают 7%. Такие расхождения ожидалось; они приемлемы и объясняются различием расчетных методов и возможностей программ.

§ 7. Сборка кассет реактора ВВЭР-440 в гексагональной геометрии

7.1. Прототип теста. Рассматривается сборка кассет реактора ВВЭР-440 в секторе симметрии 30° [30].

7.2. Тестовая задача. Расчетная модель (рис. 7.1) состоит из шести кассет (четырёх топливных 1, 2, 3, 4 и двух кассет отражателя 5, 6).

Расчетной областью является вся область кассет, заключенная внутри угла 30° . На внешней границе сборки кассет задается условие равенства нулю плотности потока нейтронов.

Расчетная модель каждой кассеты (рис. 7.2) состоит из 169 элементарных расчетных ячеек гексагональной формы с шагом (расстояние между центрами ячеек) 1,22 см. Внешний ряд эле-

ментарных ячеек кассеты — «стенка» (для данного теста свойства стенки совпадают со свойствами отражателя). В сборке кассет «стенка» является общей для двух соприкасающихся кассет. Каждая кассета имеет четыре типа ячеек, различающихся физическими свойствами (центральная нетопливная ячейка, внутренние топливные ячейки, внешний, примыкающий к стенке, ряд топливных ячеек и ячейки стенки). Подробная картограмма всей расчетной модели сборки кассет представлена на рис. 7.3. Здесь разными числами обозначены элементарные расчетные ячейки с разными физическими свойствами.

Цель расчетов — определить максимальное собственное число задачи и распределение плотности потока нейтронов и тепловыделения. Используется четырехгрупповое диффузионное уравнение типа (В.2), которое решается конечно-разностным методом для гексагональной сетки с узлами в центрах расчетных ячеек (рис. 7.4). Для аппроксимации производной используется семиточечный шаблон. Таким образом, в результате аппроксимации уравнение

$$\nabla D \nabla \Phi + \Sigma \Phi = q \quad (7.1)$$

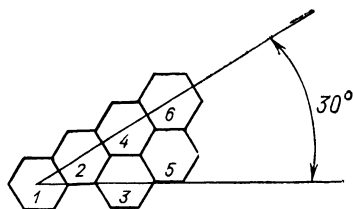


Рис. 7.1. Двухмерная модель сборки кассет ВВЭР-440 (задача 7)

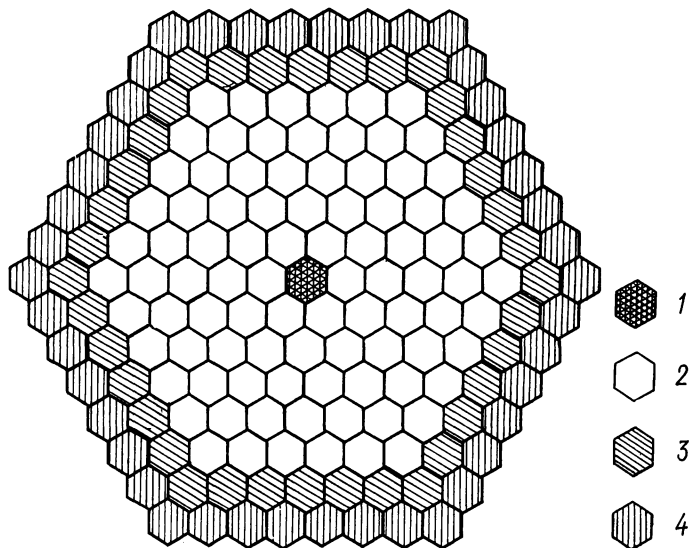


Рис. 7.2. Кассета ВВЭР-440 (задача 7):

1 — центральная нетопливная ячейка; 2 — внутренняя топливная ячейка; 3 — топливная ячейка внешнего ряда; 4 — ячейка стенки кассеты

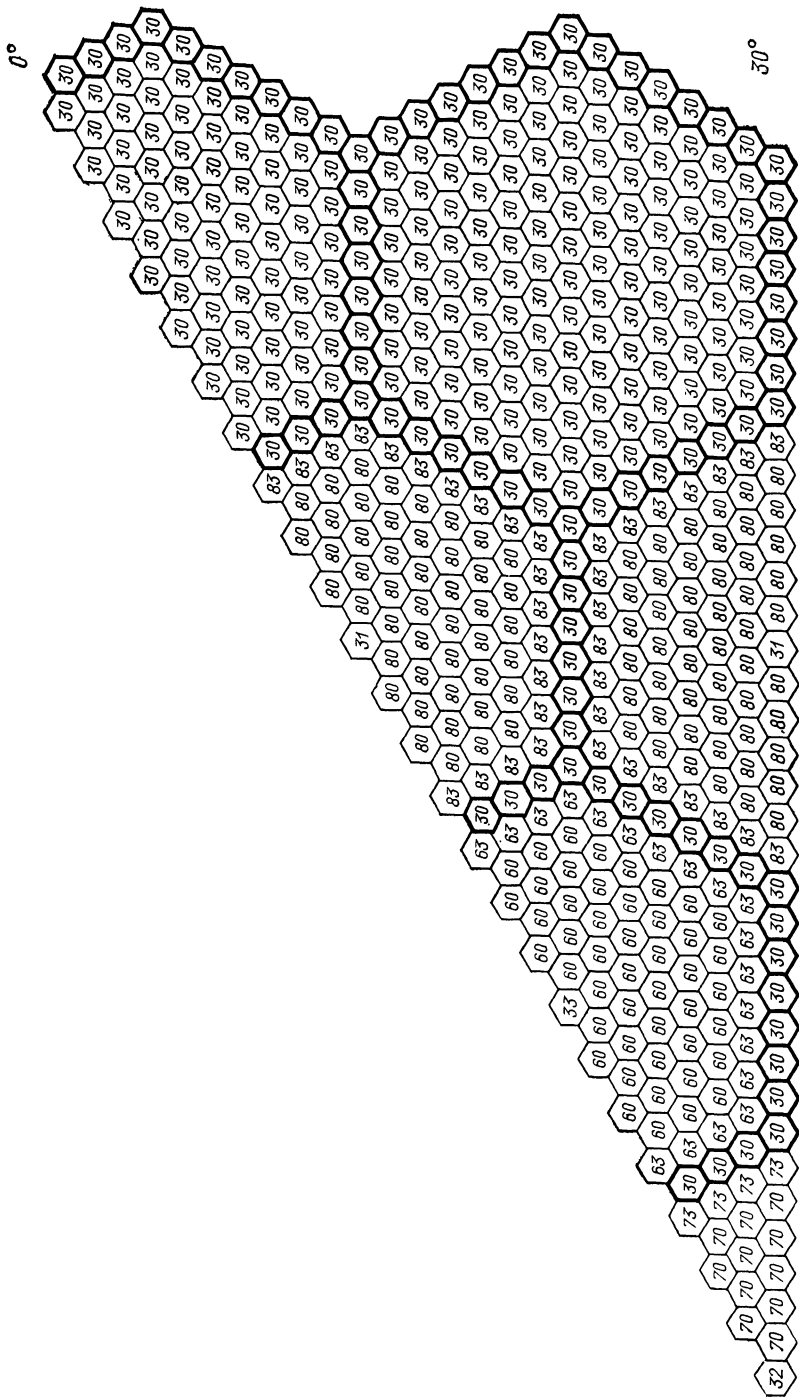


Рис. 7.3. Картограмма расчетной модели сборки кассет ВЭР-440 (полуцирковой линией выделена стенка кассеты)

приводится к виду:

$$\sum_{j=1}^6 \frac{D_0 D_j}{(D_0 + D_j)} \Phi_j + \left[\frac{3h^2}{4} \Sigma_0 + \sum_{j=1}^6 \frac{D_0 D_j}{(D_0 + D_j)} \right] \Phi_0 = \frac{3h^2}{4} q_0, \quad (7.2)$$

где h — расстояние между расчетными узлами.

Физические свойства (макроскопические константы) всех используемых в картограмме типов элементарных расчетных ячеек (помеченных разными числами) приведены в табл. 7.1. (тип элементарной ячейки соответствует номеру, указанному в подробной картограмме на рис. 7.3).

Спектр деления по группам (χ_i) одинаков для всех типов ячеек и составляет $\chi_1 = 0,76$; $\chi_2 = 0,24$; $\chi_3 = \chi_4 = 0$.

7.3. Решения. Результаты решения данной тестовой задачи с использованием лишь процесса внешних итераций приведены в работе [30]. Однотипное диффузионное уравнение решалось методом Галеркина. Авторы данной книги решали эту задачу с помощью программы JAR, а В. С. Ионов — с помощью программы НИ-7000. В обеих программах использованы процессы внешних и внутренних итераций, процесс внутренних итераций организован по методу верхней релаксации с оптимальным ускоряющим параметром в каждой группе. Для окончания итераций применены следующие критерии сходимости:

Программа JAR. 1. Внутренние итерации

$$\max_m \left| \frac{\Phi_m^{(l),k-1} - \Phi_m^{(l),k}}{\Phi_m^{(l),k}} \right| < 0,00001,$$

где $\Phi_m^{(l),k}$ — плотность потока нейтронов l -й энергетической группы в m -м узле и k -й внутренней итерации. Этот критерий проверяется по всем расчетным узлам для каждой группы.

2. Внешние итерации

$$\left| k_{\Sigma\Phi}^n - k_{\Sigma\Phi}^{n-1} \right| < 0,00001, \quad k_{\Sigma\Phi}^n = \frac{\sum_m \sum_l \left| \nu \Sigma_f^{(l)} \Phi_m^{(l),n} \right|}{\sum_m \sum_l \left| \nu \Sigma_f^{(l)} \Phi_m^{(l),n-1} \right|},$$

где n — номер внешней итерации; l — номер энергетической группы; $\nu \Sigma_f^{(l)}$ — сечение размножения в l -й группе и m -м узле.

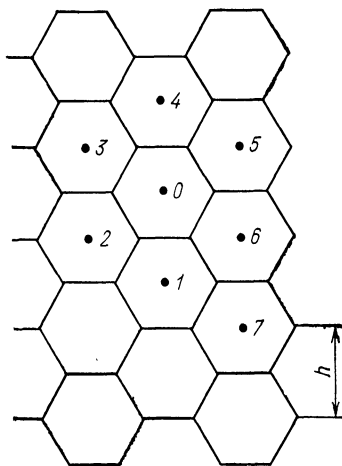


Рис. 7.4. Схема расположения узлов в гексагональной сетке

Программа НИ-7000. 1. Внутренние итерации

$$\frac{\sum_m |\Phi_m^{(l),k} - \Phi_m^{(l),k-1}|}{\sum_m \Phi_m^{(l),k}} < 0,00001.$$

Этот критерий проверяется для каждой энергетической группы.

2. Внешние итерации

$$\left| 1 - \frac{k_{\text{эф}}^n}{k_{\text{эф}}^{n-1}} \right| < 0,00001,$$

$$N \frac{\max_m |Qf_m^n - Qf_m^{n-1}|}{\sum_m Qf_m^n} < 0,0001,$$

где $Qf_m^n = \sum_t v \Sigma_{f_m}^{(t)} \Phi_m^{(t),n}$, а N — полное число расчетных узлов.

Таблица 7.2

Распределение тепловыделения в тестовой задаче 7

Номер узла	Линия симметрии 0°			Линия симметрии 30°		
	Работа [30]	JAR	НИ-7000	Работа [30]	JAR	НИ-7000
1	0	0	0	0	0	0
2	1,000	1,000	1,000	1,032	1,031	1,032
3	0,999	0,999	0,999	0,995	0,995	0,995
4	1,105	1,106	1,102	0,992	0,992	0,992
5	0,865	0,866	0,865	1,010	1,011	1,010
6	0,803	0,804	0,803	1,055	1,056	1,054
7	0,781	0,783	0,782	1,157	1,158	1,153
8	0	0	0	0	0	0
9	0,716	0,719	0,716	0	0	0
10	0,667	0,670	0,668	0	0	0
11	0,641	0,644	0,642	0	0	0
12	0,915	0,920	0,913	0	0	0
13	0,686	0,690	0,685	0	0	0
14	0,591	0,595	0,591	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0
16	0,427	0,431	0,426	1,179	1,184	1,176
17	0,350	0,354	0,350	0,967	0,972	0,966
18	0,342	0,348	0,341	0,855	0,859	0,854
19	0	0	0	0,783	0,787	0,783
20	0	0	0	0,735	0,740	0,736
21	0	0	0	0,718	0,722	0,718
22	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0,623	0,628	0,623
24	0	0	0	0,548	0,553	0,549
25	0	0	0	0,499	0,504	0,500
26	0	0	0	0,467	0,472	0,467
27	0	0	0	0,458	0,463	0,457
28	—	—	—	0,494	0,501	0,492

В программе JAR на внешней границе крайнего ряда ячеек выполняется условие: $\nabla\Phi^{(l)}/\Phi^{(l)}=1/h$, где $\Phi^{(l)}$ — плотность потока нейтронов в последнем расчетном узле. Для пояснения обратимся к рис. 7.4. Ячейка 6 имеет две свободные грани и уравнение (7.2) для этой ячейки запишется в форме:

$$\sum_{j=0,1,5,7} \frac{D_6 D_j}{D_6 + D_j} \Phi_j + \left[\frac{3h^2}{4} \Sigma_6 + \sum_{j=0,1,5,7} \frac{D_6 D_j}{D_6 + D_j} + 2D_6 \right] \Phi_6 =$$

$$= \frac{3h^2}{4} q_6.$$

Таблица 7.3

Распределение плотности потока нейтронов по четырем группам в тестовой задаче 7. Программа JAR

Номер узла	Линия симметрии 0°				Линия симметрии 30°			
	1	2	3	4	1	2	3	4
1	0,787	0,985	0,834	0,672	0,787	0,985	0,834	0,672
2	0,801	0,999	0,812	0,539	0,802	1,000	0,818	0,559
3	0,782	0,976	0,802	0,541	0,799	0,997	0,811	0,536
4	0,738	0,927	0,794	0,602	0,789	0,984	0,804	0,535
5	0,701	0,889	0,774	0,658	0,772	0,964	0,798	0,548
6	0,692	0,877	0,742	0,619	0,748	0,937	0,793	0,579
7	0,674	0,854	0,717	0,603	0,715	0,902	0,790	0,637
8	0,636	0,810	0,704	0,693	0,674	0,862	0,789	0,732
9	0,625	0,793	0,663	0,553	0,661	0,847	0,773	0,728
10	0,594	0,752	0,631	0,514	0,650	0,834	0,758	0,715
11	0,555	0,701	0,602	0,485	0,639	0,820	0,743	0,700
12	0,538	0,669	0,558	0,354	0,628	0,805	0,729	0,684
13	0,511	0,629	0,501	0,261	0,616	0,789	0,715	0,668
14	0,459	0,565	0,444	0,223	0,604	0,773	0,701	0,647
15	0,386	0,478	0,392	0,254	0,596	0,759	0,687	0,608
16	0,329	0,404	0,319	0,162	0,615	0,768	0,659	0,463
17	0,259	0,317	0,255	0,134	0,620	0,766	0,632	0,377
18	0,183	0,227	0,198	0,135	0,612	0,754	0,606	0,328
19	0,109	0,142	0,150	0,173	0,594	0,733	0,579	0,297
20	0,065	0,088	0,105	0,146	0,570	0,702	0,552	0,278
21	0,038	0,053	0,069	0,106	0,537	0,662	0,524	0,273
22	0,022	0,031	0,043	0,070	0,492	0,609	0,500	0,323
23	0,012	0,018	0,025	0,042	0,464	0,572	0,453	0,238
24	0,006	0,009	0,013	0,022	0,424	0,521	0,411	0,208
25	0,002	0,003	0,005	0,008	0,378	0,465	0,370	0,190
26	0	0	0	0	0,328	0,403	0,329	0,181
27	0	0	0	0	0,275	0,338	0,289	0,182
28	0	0	0	0	0,218	0,272	0,251	0,200
29	0	0	0	0	0,159	0,206	0,217	0,243
30	0	0	0	0	0,119	0,158	0,181	0,236
31	0	0	0	0	0,089	0,121	0,147	0,210
32	0	0	0	0	0,066	0,091	0,116	0,176
33	0	0	0	0	0,048	0,067	0,089	0,140
34	0	0	0	0	0,034	0,048	0,064	0,104
35	0	0	0	0	0,021	0,030	0,042	0,068
36	0	0	0	0	0,009	0,013	0,018	0,029

В программе НИ-7000 для последнего ряда ячеек плотность потока нейтронов принималась равной нулю. Ниже приведено значение максимального собственного числа

Программа	Работа [30]	JAR	НИ-7000
$k_{эф}$	1,03723	1,03745	1,03740

а также (в табл. 7.2—7.4) распределение тепловыделения и плотности потока нейтронов во всех энергетических группах на линиях симметрии 0° и 30° (см. рис. 7.3).

Таблица 7.4

Распределение плотности потока нейтронов по четырем группам в тестовой задаче 7. Программа НИ-7000

Номер узла	Линия симметрии 0°				Линия симметрии 30°			
	1	2	3	4	1	2	3	4
1	0,787	0,985	0,833	0,672	0,787	0,985	0,833	0,672
2	0,801	0,997	0,812	0,539	0,802	1,000	0,816	0,559
3	0,781	0,975	0,801	0,540	0,799	0,997	0,810	0,536
4	0,737	0,926	0,793	0,602	0,788	0,984	0,804	0,535
5	0,700	0,888	0,773	0,656	0,772	0,964	0,797	0,548
6	0,690	0,875	0,740	0,617	0,747	0,936	0,792	0,578
7	0,672	0,852	0,715	0,601	0,714	0,901	0,788	0,636
8	0,634	0,807	0,701	0,691	0,673	0,861	0,788	0,731
9	0,622	0,789	0,660	0,550	0,660	0,845	0,772	0,727
10	0,591	0,749	0,628	0,511	0,649	0,832	0,756	0,713
11	0,552	0,697	0,599	0,482	0,638	0,818	0,741	0,698
12	0,535	0,664	0,555	0,352	0,626	0,802	0,726	0,682
13	0,507	0,625	0,497	0,259	0,614	0,786	0,712	0,665
14	0,455	0,560	0,440	0,222	0,602	0,769	0,698	0,644
15	0,383	0,473	0,389	0,251	0,594	0,755	0,684	0,605
16	0,325	0,400	0,316	0,160	0,612	0,764	0,655	0,461
17	0,256	0,314	0,252	0,133	0,616	0,762	0,628	0,375
18	0,181	0,226	0,195	0,133	0,608	0,750	0,602	0,326
19	0,107	0,139	0,148	0,169	0,591	0,728	0,576	0,295
20	0,063	0,086	0,102	0,142	0,566	0,697	0,548	0,276
21	0,037	0,052	0,066	0,102	0,533	0,658	0,520	0,271
22	0,021	0,030	0,041	0,066	0,488	0,604	0,496	0,320
23	0,011	0,016	0,023	0,039	0,461	0,568	0,449	0,236
24	0,005	0,008	0,011	0,019	0,420	0,517	0,407	0,206
25	0,002	0,002	0,003	0,006	0,374	0,460	0,366	0,188
26	0	0	0	0	0,325	0,399	0,325	0,179
27	0	0	0	0	0,272	0,335	0,285	0,179
28	0	0	0	0	0,215	0,268	0,248	0,197
29	0	0	0	0	0,157	0,203	0,214	0,239
30	0	0	0	0	0,117	0,155	0,178	0,231
31	0	0	0	0	0,087	0,118	0,143	0,204
32	0	0	0	0	0,064	0,088	0,112	0,169
33	0	0	0	0	0,046	0,064	0,084	0,131
34	0	0	0	0	0,030	0,043	0,058	0,093
35	0	0	0	0	0,017	0,024	0,032	0,052
36	0	0	0	0	0	0	0	0

§ 8. Модель ячейки реактора в X, Y -геометрии с неразделяющимися переменными

8.1. Прототип теста. Тест [7] представляет собой двухмерную модель реактора, для расчета которого методы, основанные на разделении переменных, малоэффективны.

8.2. Тестовая задача. Конфигурация и размеры модели представлены на рис. 8.1. Задача рассматривается в X, Y -геометрии; в третьем измерении система принимается бесконечной. На внешней границе области функция плотности потока нейтронов имеет нулевую производную ($\nabla\Phi=0$). Зоны 1 и 2 (см. рис. 8.1) характеризуются ядерными концентрациями и макроконстантами, приведенными в табл. 8.1 и 8.2. Спектр деления χ принимался единым для обеих зон ($\Sigma\chi_g \neq 1$).

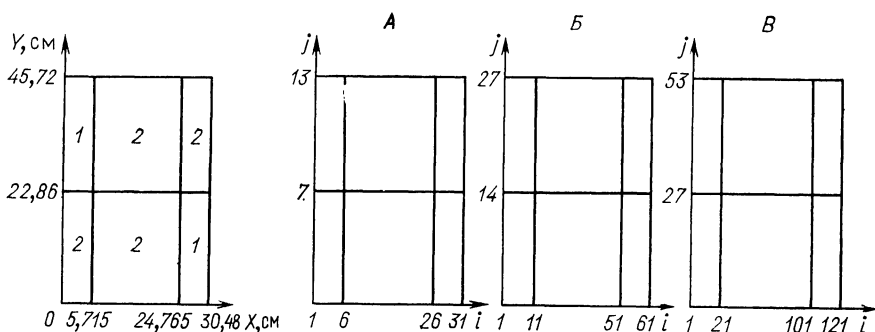


Рис. 8.1. Конфигурация зоны и конечно-разностные сетки для модели 8

Требуется определить собственное число задачи $k_{эф}$ и распределение плотности потока нейтронов, используя конечно-разностный метод решения диффузионного уравнения.

8.3. Решения. Уравнение диффузии решалось методом конечных разностей с использованием прямоугольной сетки. Для аппроксимации производных принимался пятиточечный шаблон. Рассчитывались $k_{эф}$ и распределение плотности потока нейтронов для трех вариантов сеток: A, B, B (см. рис. 8.1).

Для всех сеток границы раздела зон с различными физическими свойствами «проходят» через узлы сетки. Узлы первой и последней линии в каждом из направлений лежат на границе области. Внутри зон интервалы между точками по каждому из направлений одинаковы (в каждой зоне сетка равномерная).

Решение задачи с сеткой B приведено в [1] и получено для настоящей работы П. А. Болобовым по программе ПОЛЕ. Задача с сетками A и B решалась только по программе ПОЛЕ. Во всех задачах использовался метод последовательной точечной верхней релаксации (SOR).

Таблица 8.1

Состав зон тестовой задачи 8 (ядерные концентрации, 10^{24} см^{-3})

Номер зоны	Zr		^{235}U		^{238}U		H	O	Циркалий	Th
	1	2	1	2	1	2				
1	0,97261 · 10 ⁻²	—	0,89719 ⁻³	0,66676 · 10 ⁻⁴	0,24937 · 10 ⁻¹	0,33727 · 10 ⁻¹	0,61176 · 10 ⁻²	—	0,61003 · 10 ⁻²	—
2	—	—	—	—	0,27452 · 10 ⁻¹	0,25927 · 10 ⁻¹	0,60801 · 10 ⁻²	—	—	—

Таблица 8.2

Макроконстанты для двух зон в тестовой задаче 8

Номер группы	D, см		$\Sigma_{cfd}, \text{ см}^{-1}$		$\Sigma_s^{g \rightarrow g+1}, \text{ см}^{-1}$		$\nu \Sigma_f, \text{ см}^{-1}$		χ
	1	2	1	2	1	2	1	2	
1	2,07155	2,28988	0,062120	0,06830	0,06067	0,06680	0,00251	0,00172	0,7389580
2	1,04356	1,225552	0,058530	0,06344	0,05669	0,06156	0,00328	0	0,2609630
3	0,82935	0,86183	0,074510	0,07185	0,04268	0,05985	0,04743	0	0,0002212
4	0,46506	0,603900	0,562800	0,05510	—	—	1,1356	0	0

Распределение плотности потока нейтронов в четвертой энергетической группе для тестовой задачи 8
(сетка B, см. рис. 8.1)

	$x=0;$ $t=1$	$x=5,144;$ $t=10$	$x=5,715;$ $t=11$	$x=6,191;$ $t=12$	$x=24,289;$ $t=50$	$x=24,765;$ $t=51$	$x=25,336;$ $t=52$	$x=30,480;$ $t=61$
$y=45, 72; j=27$	2,54666 2,54568	5,07697 5,07540	7,50257 7,50040	9,51421 9,51155	4,91923 4,91902	4,75588 4,75571	4,57948 4,57934	3,85665 3,85665
$y=43, 962; j=26$	2,53795 2,53697	5,06083 5,05927	7,47909 7,47693	9,48471 9,48206	4,94719 4,94699	4,78531 4,78514	4,61054 4,61039	3,89479 3,89478
$y=24, 618; j=15$	1,79850 1,79799	3,48522 3,48448	5,04923 5,04822	6,34787 6,34666	8,27093 8,26974	8,00388 8,00270	7,69694 7,69577	6,86390 6,86271
$y=22, 860; j=14$	3,67247 3,67166	5,17238 5,17143	6,20258 6,20149	7,09268 7,09148	7,09268 7,09149	6,20258 6,20150	5,17238 5,17143	3,67247 3,67166
$y=21, 102; j=13$	6,86390 6,86270	7,69694 7,69575	8,00389 8,00269	8,27093 8,26972	6,34787 6,34667	5,04923 5,04823	3,48522 3,48448	1,79850 1,79800
$y=1, 758; j=2$	3,89479 3,89478	4,61053 4,61040	4,78531 4,78514	4,94719 4,94700	9,48471 9,48209	7,47909 7,47694	5,06083 5,05929	2,53795 2,53698
$y=0; j=1$	3,85665 3,85665	4,57948 4,57935	4,75588 4,75571	4,91923 4,91904	9,51421 9,51158	7,50257 7,50041	5,07697 5,07542	2,54666 2,54569

При решении задачи с сеткой *Б* (см. рис. 8.1) в [1] получено $k_{эф} = 0,87914 \pm 0,00002$. Решение находится с помощью внешнего и внутреннего итерационного процесса. На каждой внешней итерации выполнялось 35 внутренних итераций SOR с ускоряющими параметрами $\omega_1 = 1,5461$; $\omega_2 = 1,5005$; $\omega_3 = 1,4000$; $\omega_4 = 1,4000$ (индекс при ω соответствует номеру энергетической группы).

Для ускорения внешних итераций использовалась чебышевская экстраполяция в предположении, что все собственные значения, кроме максимального, лежат в интервале $[0, 1/2]$. Было сделано шесть внешних итераций.

С помощью программы ПОЛЕ для сетки *Б* получено $k_{эф} = 0,87919 \pm 0,00001$.

Так же, как и в [1], использовался внешний и внутренний итерационный процесс.

Критерий окончания внутренних итераций в программе ПОЛЕ:

а) $k \geq 10$;

$$б) \sum_m |\Phi_m^{l(k)} - \Phi_m^{l(k+1)}| / \sum_m \Phi_m^{l(k+1)} < \varepsilon (2 - \omega_l);$$

$$\varepsilon = \max_{l,m} \left(\frac{\Phi_m^{l(n+1)}}{\Phi_m^{l(n)}} \right) - \min_{l,n} \frac{\Phi_m^{l(n+1)}}{\Phi_m^{l(n)}}, \quad l = 1 \div 4.$$

Здесь n — номер внешней итерации; k — номер внутренней итерации; l — номер группы; m — номер точки конечно-разностной схемы.

Для сетки *Б* по программе ПОЛЕ использовался (в отличие от работы [1]) оптимальный набор параметров: $\omega_1 = 1,835$; $\omega_2 = 1,786$; $\omega_3 = 1,737$; $\omega_4 = 1,735$. Для ускорения внешних итераций применялась чебышевская экстраполяция при том же предположении, что и в работе [1], т. е., что все собственные значения,

Таблица 8.4

Сравнение плотности потока нейтронов в четвертой энергетической группе для сеток *А*, *Б*, *В* тестовой задачи 8

<i>y</i>	Сетка	Плотность потока нейтронов при <i>x</i> , равном			
		0	5,715	24,765	30,480
45,72	А	2,46464	6,86158	4,71929	3,85668
	Б	2,54568	7,50040	4,75571	3,85665
	В	2,57063	7,70063	4,76661	3,85666
22,86	А	3,05808	5,66302	5,66301	3,05807
	Б	3,67166	6,20149	6,20150	3,67166
	В	4,04876	6,44670	6,44665	4,04874
0	А	3,85665	4,71929	6,86157	2,46463
	Б	3,85665	4,75571	7,50041	2,54569
	В	3,85665	4,76658	7,70055	2,57060

кроме максимального, лежат в интервале $[0, 1/2]$. Было выполнено восемь внешних итераций; при этом соблюдается условие: $\epsilon < 10^{-6}$.

Результаты расчета плотности потока нейтронов в четвертой энергетической группе для характерных точек сетки B (рис. 8.1) представлены в табл. 8.3, где верхняя цифра взята из работы [1], нижняя цифра получена с помощью программы ПОЛЕ.

В табл. 8.4 приведены сравнительные результаты расчетов плотности потока нейтронов для сеток A, B, B для характерных точек в четвертой энергетической группе, при этом значение $k_{эф}$ для сетки A равно $0,88725 \pm 0,00001$, для сетки B $0,87919 \pm 0,00001$ и для сетки B $0,87677 \pm 0,00001$. Эти результаты получены с помощью программы ПОЛЕ при $\epsilon = 10^{-6}$.

Данные в табл. 8.3 и 8.4 нормированы на одинаковое значение плотности потока нейтронов в точке с координатами $x=0, y=0$.

§ 9. Гетерогенный реактор на тепловых нейтронах

9.1. Прототип теста. Тест* представляет собой модель небольшого гетерогенного реактора (критической сборки) на тепловых нейтронах.

9.2. Тестовая задача. Рассматривается трехгрупповая двухмерная модель критической сборки в виде цилиндра из однородного замедлителя, в котором расположены цилиндрические блоки неоднородностей — твэлы и регулирующие стержни. Данные о конфигурации и размерах рассматриваемой системы представлены на рис. 9.1. В третьем измерении сборка считается бесконечной. Принимается, что на внешней поверхности цилиндра плотность потока нейтронов обращается в нуль.

Задача решается по методике А. Д. Галанина — С. М. Фейнберга [32]. Предполагается, что в замедлителе (вне блоков) справедливо диффузионно-возрастное приближение:

$$\left. \begin{aligned} \Delta n_1 - n_1/L_1^2 &= 0; \\ \Delta n_2 - n_2/L_2^2 &= -n_1/L_1^2; \\ \Delta n_3 - n_3/L_3^2 &= -n_2/L_2^2. \end{aligned} \right\} (9.1)$$

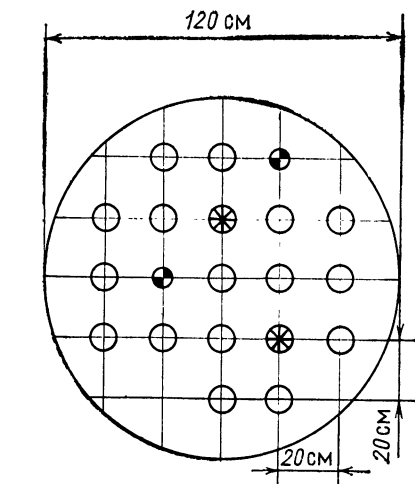


Рис. 9.1. Поперечный разрез гетерогенной критической сборки (тест 9)

* Тест составлен Б. П. Кочуровым.

Здесь $L_1^2 = \tau_1$; $L_2^2 = \tau_2$; L_3^2 — квадраты длины замедления и диффузии в замедлителе; $n_{1,2} = q_{1,2}\tau_{1,2}/D$; $q_{1,2}$ — плотность замедления; D — коэффициент диффузии тепловых нейтронов. Для данного теста используется монополюсное приближение, согласно которому не учитывается азимутальная зависимость плотности потока нейтронов на поверхности блоков.

На поверхности блока задается граничное условие

$$r \frac{\partial n}{\partial r} \Big|_{r=\rho_t} = \Lambda_t n, \quad (9.2)$$

где ρ_t — радиус блока типа t ; $\Lambda_t = \begin{pmatrix} \Lambda_t^{11} & \Lambda_t^{12} & \Lambda_t^{13} \\ \Lambda_t^{21} & \Lambda_t^{22} & \Lambda_t^{23} \\ \Lambda_t^{31} & \Lambda_t^{32} & \Lambda_t^{33} \end{pmatrix}$.

Общее решение системы (9.1) можно записать в форме:

$$n_i = \sum_{j=1}^i C_{ij} f_j, \quad i = 1, 2, 3, \quad (9.3)$$

где

$$f_j = f_j(r) = \sum_{k=1}^K a_{kj} K_0 \left(\frac{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_k|}{L_j} \right) + \sum_{m=1}^N b_{mj} J_m \left(\frac{r}{L_j} \right) e^{im\theta},$$

k — номер блока: $k = 1, 2, \dots, K$ ($K=20$); m — номера всех гармоник, с помощью которых описывается азимутальная зависимость нейтронного поля; $m = 1, 2, \dots, M$; θ — угол между вектором \mathbf{r} и фиксированной осью; точка начала отсчета для вектора \mathbf{r} и ось могут быть выбраны произвольно.

Подстановка (9.3) в (9.1) позволяет получить систему рекуррентных соотношений для C_{ij} :

$$C_{ij} = 1; \quad i = j$$

$$C_{ij} = v_{ij} C_{i-1,j}; \quad v_{ij} = \frac{1}{L_{i-1}^2} \left/ \left(\frac{1}{L_i^2} - \frac{1}{L_j^2} \right) \right., \quad i > j, \quad C_{ij} \equiv 0, \quad i < j.$$

Используя условие равенства нулю плотности потока нейтронов на внешней границе реактора радиусом R и применяя теоремы сложения для бесселевых функций, коэффициенты b_{mj} из (9.3) можно исключить. Тогда значение функции f_j в окрестности k -го блока можно записать в форме:

$$f_j(|\mathbf{r} - \mathbf{r}_k|) = \sum_{l=1}^k F_{kl,j}(|\mathbf{r} - \mathbf{r}_k|) a_{lj}. \quad (9.4)$$

Здесь

$$F_{kl,j}(|\mathbf{r} - \mathbf{r}_k|) = K_0 \left(\frac{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_k|}{L_j} \right) \delta_{kl} +$$

$$+ I_0 \left(\frac{|r - r_k|}{L_j} \right) (1 - \delta_{kl}) K_0 \left(\frac{|r_k - r_l|}{L_j} \right) -$$

$$- \sum_{m=0}^{N=9} \left[K_m \left(\frac{R}{L_j} \right) / I_m \left(\frac{R}{L_j} \right) \right] I_m \left(\frac{|r_k|}{L_j} \right) I_m \left(\frac{|r_l|}{L_j} \right) \varepsilon_m \cos m\chi_{kl},$$

где δ_{kl} — символ Кронекера; $\varepsilon_m = \begin{cases} 1, & m = 0; \\ 2, & m > 0; \end{cases}$ χ_{kl} — угол

между векторами r_k и r_l .

В системе (9.3), в которой f_j представлено в виде (9.4), число неизвестных a_{ij} равно произведению числа блоков на число групп нейтронов; для данного примера число неизвестных равно 60. Система (9.2) содержит столько же (60) условий для определения этих коэффициентов.

В [31], [32] используется прием, согласно которому система однородных уравнений, соответствующая (9.2), записывается относительно неизвестных компонент вектора p , заданных на поверхностях блоков: $n_1(r_k)$, $n_2(r_k)$, $n_3(r_k)$.

Введем собственное число задачи ($k_{эф}$), выделяя в матрице Λ_i часть, которая пропорциональна числу вторичных нейтронов деления

$$\Lambda'_i \rightarrow \begin{pmatrix} \Lambda_i^{11} & \frac{\Lambda_i^{12}}{k_{эф}} & \frac{\Lambda_i^{13}}{k_{эф}} \\ \Lambda_i^{21} & \Lambda_i^{22} & \Lambda_i^{23} \\ \Lambda_i^{31} & \Lambda_i^{32} & \Lambda_i^{33} \end{pmatrix}.$$

Результатом решения соответствующей системы алгебраических уравнений является значение $k_{эф}$ и групповые значения плот-

Таблица 9.1

**Нейтронно-физические характеристики
для тестовой задачи 9**

Номер блока	ρ , см	j	Λ_{ij} при i равном		
			1	2	3
1	5,0	1	0,0800	0	-1,4158
		2	-0,0600	0,1400	0
		3	0	-0,0400	0,7000
2	5,0	1	0	0	0
		2	0	0,0100	0
		3	0	0	0,0300
3	3,0	1	0,0100	0	0
		2	0	0,2000	0
		3	0	0	1,000

ности потоков нейтронов n_1, n_2, n_3 на поверхности блоков. Для расчета использованы значения $R=60$ см; $L_1^2=40$ см², $L_2^2=80$ см², $L_3^2=4000$ см², остальные данные приведены в табл. 9.1.

9.3. Решения. В табл. 9.2 приведены результаты расчета плот-

Таблица 9.2

Плотности потоков нейтронов для тестовой задачи 9

Номер блока	n_1	n_2	n_3	Номер блока	n_1	n_2	n_3
1	0,396	0,347	0,292	11	0,256	0,695	1,270
2	0,708	0,604	0,537	12	0,520	0,420	0,425
3	0,365	0,328	0,265	13	0,547	0,446	0,438
4	0,853	0,736	0,658	14	0,272	0,742	1,334
5	1,218	1,047	0,926	15	1,306	1,127	0,992
6	0,736	0,609	0,594	16	0,984	0,844	0,761
7	0,416	0,361	0,306	17	0,088	0,220	0,211
8	0,708	0,604	0,537	18	0,567	0,466	0,453
9	1,218	1,047	0,926	19	0,775	0,696	0,563
10	1,292	1,102	1,000	20	0,552	0,504	0,398

ности потоков нейтронов, полученные Б. П. Кочуровым по программе [31], при этом максимальное собственное значение $k_{эф} = 1,0000$.

ОДНОМЕРНЫЕ ТЕСТОВЫЕ ЗАДАЧИ

§ 10. Три тестовые задачи в сферической и цилиндрической геометриях

Ниже приводятся три четырехгрупповые тестовые задачи, каждая из которых решалась в диффузионном и P_1 -приближениях. Данные тестовые задачи были подготовлены специалистами ГДР [33] в рамках совместных работ стран — членов СЭВ по проверке программ, используемых для расчетов реакторов на быстрых нейтронах. Далее эти три тестовые задачи описываются вместе.

10.1. Прототипы тестов. При разработке тестовых задач были использованы идеализированные двухзонные модели реакторов на быстрых нейтронах с объемами активных зон 2500 и 10 000 л. Тест 10.1 был получен на основе модели Бейкера [34], а тесты 10.2 и 10.3 — на основе модели ОК-5 из работы [35].

10.2. Тестовые задачи. Решаются в одномерной сферической (тесты 10.1 и 10.2) и цилиндрической (тест 10.3) геометриях аналогии диффузионного уравнения (В.2) и уравнения в P_1 -приближе-

Характеристики одномерных тестовых моделей

Номер тестовой задачи	Приближение	Активная зона		Экран		Геометрия
		Размер, см	Число интервалов	Размер, см	Число интервалов	
10.1.1 10.1.2	P_1 Диффузионное	84,196	50	45,72	30	Сфера
10.2.1 10.2.2	P_1 Диффузионное	134	50	50	30	Сфера
10.3.1 10.3.2	P_1 Диффузионное	134	50	50	30	Цилиндр

нии (В.1). Геометрические характеристики тестов приведены в табл. 10.1, четырехгрупповые макроскопические сечения — в табл. 10.2—10.4. На внешней границе реактора плотность потока нейтронов равна нулю. При расчетах в диффузионном приближении сечения Σ_{s1}^{l-g} , естественно, не использовались. Сравняются следующие величины: эффективный коэффициент размножения, интегральные групповые плотности потоков нейтронов по зонам и групповые плотности потоков в нескольких представительных точках, которые нормировались на 1000 в первой точке в той группе, где плотность потока нейтронов максимальна.

Таблица 10.2

Макроскопические сечения задачи 10.1
($\chi_1=0,904$; $\chi_2=0,083$; $\chi_3=0,013$; $\chi_4=0$)

Номер группы g	D_g , см	Σ_{cfd}^g , см ⁻¹	Σ_{tr}^g , см ⁻¹	$(\nu\Sigma_f)^g$, см ⁻¹	$\Sigma_s^{g-1,g}$, см ⁻¹	$\Sigma_s^{g-2,g}$, см ⁻¹	$\Sigma_{s1}^{g-1,g}$, см ⁻¹
Активная зона							
1	2,375887	0,016718	0,13958	0,007883	—	—	—
2	1,708549	0,012011	0,19373	0,004221	0,012916	—	-0,00071
3	1,339938	0,009169	0,24813	0,004366	0,009366	0,000409	-0,00137
4	0,983045	0,014011	0,33909	0,011926	0,004590	—	-0,00064
Отражатель							
1	1,828583	0,021740	0,18083	0,004882	—	—	—
2	1,286233	0,015196	0,25667	0,000527	0,018165	—	-0,00145
3	1,039034	0,011147	0,31959	0,000549	0,013112	0,000570	-0,00249
4	0,864228	0,012501	0,38570	0,002194	0,005928	0	-0,00122

Таблица 10.3

Макроскопические сечения задачи 10.2
 $(\chi_1=0,904; \chi_2=0,083; \chi_3=0,013; \chi_4=0)$

Номер группы g	$D_g, \text{ см}$	$\Sigma_{cfd}^g, \text{ см}^{-1}$	$\Sigma_{tr}^g, \text{ см}^{-1}$	$(v\Sigma_f)^g, \text{ см}^{-1}$	$\Sigma_s^{g-1}, g, \text{ см}^{-1}$	$\Sigma_s^{g-2}, g, \text{ см}^{-1}$	$\Sigma_{s1}^{g-1}, g, \text{ см}^{-1}$
Активная зона							
1	1,940807	0,019962	0,170699	0,008481	—	—	—
2	1,377344	0,014095	0,240152	0,004075	0,015536	—	—0,001044
3	1,053985	0,010954	0,315437	0,004215	0,011092	0,000509	—0,001856
4	0,775936	0,015991	0,429552	0,011279	0,005386	0	—0,000825
Отражатель							
1	1,868341	0,019820	0,177091	0,002901	—	—	—
2	1,367150	0,013713	0,241774	0	0,017195	—	—0,001315
3	1,052266	0,010321	0,315825	0	0,012140	0,000475	—0,002043
4	0,814846	0,010344	0,409075	0	0,006163	0	—0,000952

Таблица 10.4

Макроскопические сечения задачи 10.3
 $(\chi_1=0,904; \chi_2=0,083; \chi_3=0,013; \chi_4=0)$

Номер группы g	$D_g, \text{ см}$	$\Sigma_{cfd}^g, \text{ см}^{-1}$	$\Sigma_{tr}^g, \text{ см}^{-1}$	$(v\Sigma_f)^g, \text{ см}^{-1}$	$\Sigma_s^{g-1}, g, \text{ см}^{-1}$	$\Sigma_s^{g-2}, g, \text{ см}^{-1}$	$\Sigma_{s1}^{g-1}, g, \text{ см}^{-1}$
Активная зона							
1	1,941103	0,019875	0,170674	0,008211	—	—	—
2	1,377281	0,014011	0,240160	0,003830	0,015535	—	—0,001044
3	1,054117	0,010862	0,315399	0,003961	0,011095	0,000509	—0,001857
4	0,776581	0,0156113	0,429167	0,010600	0,005386	0	—0,000825
Отражатель							
1	1,868341	0,019820	0,177091	0,002901	—	—	—
2	1,367150	0,013713	0,241774	0	0,017195	—	—0,001315
3	1,052266	0,010321	0,315825	0	0,012140	0,000475	—0,002043
4	0,814846	0,010344	0,409075	0	0,006163	0	—0,000952

Таблица 10.5

**Значения $k_{эф}$ для тестовых задач 10.1—10.3,
полученные с помощью программ 9M, FD-1D, FE-1D**

Задача	9M	FD-1D	FE-1D
10.1.1	1,000197	1,000197	1,000225
10.1.2	0,999859	0,999980	0,999887
10.2.1	1,000153	1,000321	1,000152
10.2.2	0,999990	0,999992	0,999988
10.3.1	1,000075	1,000564	1,000091
10.3.2	0,999976	1,000090	0,999991

10.3. Решения. В табл. 10.5—10.8 приведены результаты расчетов данных тестов, проведенных в Физико-энергетическом институте, г. Обнинск, по программам 9M, FD-1 D и FE-1 D [10]. Номера задач имеют трехзначную идентификацию. Последний знак означает используемое приближение (1 — P_1 , 2 — диффузионное). Например, задача 10.1.1 означает, что задача 10.1 решается в P_1 -приближении.

Таблица 10.6

Значения интегральных потоков $10^{-p} V_R \int \varphi_g^r(r) dV$
для тестовых задач 10.1—10.3

Задача	P	9M			FD-1D		FE-1D	
		g	Зона 1	Зона 2	Зона 1	Зона 2	она 1	Зона 2
10.1.1	10	1	1,1225	0,2134	1,1233	0,2136	1,1225	0,2133
		2	1,2342	0,3570	1,2351	0,3574	1,2340	0,3570
		3	1,2284	0,4914	1,2292	0,4919	1,2281	0,4916
		4	0,3931	0,2276	0,3934	0,2279	0,3930	0,2278
10.1.2	10	1	1,1228	0,2142	1,2142	1,1239	1,1228	0,2140
		2	1,2345	0,3578	1,2358	0,3584	1,2343	0,3578
		3	1,2293	0,4918	1,2306	0,4927	1,2290	0,4921
		4	0,3936	0,2277	0,3940	0,2281	0,3935	0,2279
10.2.1	10	1	3,3039	0,2035	3,3112	0,2042	3,3036	0,2031
		2	3,9417	0,4015	3,9503	0,4029	3,9410	0,4014
		3	4,1051	0,5901	4,1141	0,5921	4,1041	0,5903
		4	1,3776	0,3407	1,3806	0,3419	1,3770	0,3412
10.2.2	10	1	3,3041	0,2045	3,3072	0,2047	3,3039	0,2040
		2	3,9419	0,4027	3,9455	0,4032	3,9412	0,4026
		3	4,1061	0,5907	4,1099	0,5915	4,1051	0,5910
		4	1,3781	0,3408	1,3793	0,3413	1,3775	0,3413
10.3.1	8	1	2,3088	0,0841	2,3167	0,0852	2,3004	0,0838
		2	2,8004	0,1667	2,8157	0,1688	2,7961	0,1665
		3	2,9755	0,2470	2,9915	0,2500	2,9708	0,2468
		4	1,0243	0,1433	1,0299	0,1451	1,0227	0,1434
10.3.2	8	1	2,3040	0,0845	2,3056	0,0847	2,3006	0,0842
		2	2,8005	0,1672	2,8025	0,1677	2,7963	0,1670
		3	2,9760	0,2472	2,9780	0,2480	2,9714	0,2471
		4	1,0246	0,1434	1,0253	0,1438	1,0229	1,1434

Рассчитывались значения $k_{эф}$ и плотности потоков нейтронов при заданном числе интервалов. Точность расчета $k_{эф}$ принималась равной 10^{-6} .

**Плотность потоков нейтронов в центре реактора
(задачи 10.1—10.3)**

Задача	Номер группы	9M	FD-1D	FE-1D
10.1.1	1	9244,02	9244,02	9243,82
	2	10000,00	10000,00	10000,00
	3	9644,73	9644,81	9644,89
	4	2974,60	2974,62	2974,68
10.1.2	1	9245,67	9244,86	9245,46
	2	10000,00	10000,00	10000,00
	3	9650,54	9651,24	9650,68
	4	2977,88	2978,20	2977,96
10.2.1	1	8170,73	8168,68	8170,56
	2	9697,59	9696,41	9697,59
	3	10000,00	10000,00	10000,00
	4	3297,84	3298,06	3297,94
10.2.2	1	8169,54	8169,50	8169,37
	2	9695,50	9695,49	9695,49
	3	10000,00	10000,00	10000,00
	4	3298,40	3298,42	3298,49
10.3.1	1	7815,33	7807,63	7815,12
	2	9469,44	9464,91	9469,35
	3	10000,00	10000,00	10000,00
	4	3406,11	3406,99	3406,16
10.3.2	1	7814,70	7812,87	7814,49
	2	9468,25	9467,20	9468,15
	3	10000,00	10000,00	10000,00
	4	3406,44	3406,66	3406,50

Пространственно-энергетическое четырехгрупповое распределение потока нейтронов для тестов
10.1—10.3 (программа FE-1D)

Рядус	1	2	3	4	1	2	3	4
	Задача 10.1.1							
20,207	8692,31	9402,03	9070,62	2798,57	8693,93	9402,13	9076,21	2801,69
40,414	7154,17	7734,23	7477,25	2312,52	7155,68	7734,62	7482,26	2315,20
60,621	4931,25	5340,58	5237,00	1643,92	4932,43	5341,57	5241,18	1645,92
84,196	1863,22	2374,78	2658,64	982,15	1864,00	2376,48	2661,28	983,72
100,960	379,67	712,53	1047,01	509,37	381,65	714,59	1047,82	509,52
116,200	90,06	189,69	323,54	177,14	90,74	190,79	324,14	177,16
128,392	7,86	16,58	29,40	16,60	7,93	16,69	29,47	16,61
	Задача 10.2.1							
29,480	7660,00	9091,55	9375,07	3091,82	7659,00	9089,72	9375,18	3092,37
61,640	6079,48	7215,58	7440,60	2453,91	6078,99	7214,49	7441,09	2454,48
91,120	4034,52	4786,67	4938,43	1629,72	4034,63	4786,49	4939,35	1630,29
134,000	818,88	1144,89	1356,34	5797,15	819,82	1146,19	1357,23	579,53
150,667	148,60	344,11	539,56	330,76	149,62	345,32	540,05	330,83
165,667	31,42	95,47	182,86	131,59	31,79	96,16	183,27	131,65
182,333	1,72	5,75	12,15	9,37	1,75	5,80	12,19	9,38
	Задача 10.3.1							
29,480	7384,46	8947,54	9448,95	3218,48	7383,97	8946,55	9449,08	3218,84
61,640	6019,82	7293,95	7702,68	2623,71	6019,75	7293,55	7703,23	2624,15
91,120	4169,03	5049,56	5334,93	1818,19	4169,46	5049,87	5335,95	1818,71
134,000	937,30	1335,41	1612,72	703,47	938,48	1337,08	1613,84	703,92
150,667	180,27	422,64	671,07	415,65	181,54	424,20	671,74	415,76
167,333	33,49	105,25	206,99	151,94	33,65	105,77	207,23	151,99
182,333	2,28	7,72	16,48	12,80	2,31	7,79	16,54	12,81
	Задача 10.3.2							

§ 11. Ячейка хранилища кассет реактора типа ВВЭР

11.1. Прототип теста. Рассматривается хранилище для кассет реактора типа ВВЭР. Исследуется $k_{эф}$ и распределение плотности потока нейтронов для бесконечной решетки кассет, помещенных в воду.

11.2. Тестовая задача. Расчетная модель представляет собой двухзонный цилиндр, бесконечный по высоте. Расчет проводится в двухгрупповом диффузионном приближении, на внешней границе градиент плотности потока нейтронов обращается в нуль (расчет ячейки). Характеристики расчетных зон приведены в табл. 11.1.

Таблица 11.1

Параметры зон тестовой задачи 11

Зона	Внешний радиус, см	D_1 , см	D_2 , см	$\Sigma_c^{(1)}$, см ⁻¹	$\Sigma_c^{(2)}$, см ⁻¹	$\nu\Sigma_f^{(1)}$, см ⁻¹	$\nu\Sigma_f^{(2)}$, см ⁻¹	Σ_s^{1-2} , см ⁻¹	χ_1	χ_2
Центральная	7,213	1,2101	0,3034	0,03046	0,1255	0,008383	0,2186	0,01958	1	0
Внешняя	11,82	1,1664	0,1452	0,05965	0,01864	0	0	0,05886	0	0

Решение задачи (значения $k_{эф}$ и плотности потока нейтронов) получалось с помощью двух методов: аналитического [32] по программе [29] и метода конечных разностей.

11.3. Решение. С помощью аналитического метода получен $k_{эф}=0,9030706$. Расчеты с помощью конечно-разностного метода проводились по программе FINDIF* и по программе FP1DIR**.

Таблица 11.2

Значение $k_{эф}$ для тестовой задачи 11 (конечно-разностный метод)

Число узлов			$k_{эф}$	
общее	в центральной зоне	во внешней зоне	Узел в центре интервала	Узел на краю интервала
10	6	4	0,890916	0,923429
20	12	8	0,899842	0,907710
40	24	16	0,902251	0,904173
150	100	50	—	0,903158
160	96	64	0,903017	—
300	200	100	—	0,903091
320	192	128	0,903057	—
480	288	192	0,903065	—
500	300	200	—	0,903076

* Расчет Н. А. Петушковой и Е. С. Глушкова.

** Расчет проведен О. А. Волощенко.

В программе FINDIF расчетный узел лежит на границе интервала, в программе FP1D1R — в центре. При расчетах была обеспечена одинаковая для $k_{эф}$ точность 10^{-6} . Результаты, полученные с помощью конечно-разностных методов, обнаруживают зависимость от числа узлов сетки (рис. 11.1, табл. 11.2).

Распределения плотности потока быстрых и тепловых нейтронов, полученные аналитическим методом, приведены на рис. 11.2. Эти же распределения, полученные с помощью конечно-разностных методов, практически совпадают (в пределах 2%) с резуль-

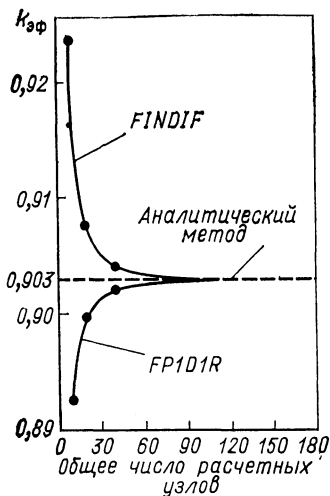
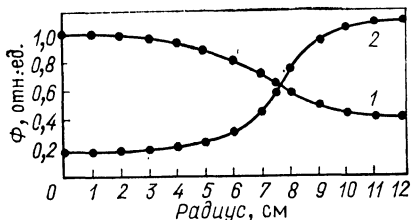


Рис. 11.1. Зависимость $k_{эф}$ от числа расчетных узлов (задача 11)

Рис. 11.2. Распределение плотности потоков нейтронов быстрой (1) и тепловой (2) групп, полученное аналитическим методом (задача 11)



татами, полученными аналитически даже при малом числе расчетных узлов (6 и 4) соответственно в центральной и внешней зонах).

ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ ТЕСТОВЫЕ ЗАДАЧИ

§ 12. Задача о максимуме мощности (одномерная плоская геометрия)

12.1. Прототип теста [36]. Физической основой для данного варианта послужила задача о максимуме мощности реактора на тепловых нейтронах при наличии теплофизических ограничений. Максимизация мощности осуществляется путем размещения поглотителя в объеме реактора. Концентрация поглотителя ограничена. Для описания реактора использована простейшая одномерная (плоская) одногрупповая модель.

12.2. Тестовая задача. Реактор представляет собой плоскую пластину толщиной $2H$. Плотность потока нейтронов $\Phi(x)$ описывается уравнением:

$$d^2\Phi/dx^2 + \alpha^2(u)\Phi = 0,$$

где $\Phi = \Phi(x)$; $u = u(x)$; $\alpha^2(u) = a - bu$; a, b — константы.

Граничные условия:

$$d\Phi/dx|_{x=0} = 0; \Phi(H) = 0.$$

Требуется найти оптимальную компоновку (управление) $u(x)$, такую, чтобы величина $W = \int_0^H \Phi(x) dx$ была максимальна, $\Phi(x) \leq \Phi_{\max}$; на управление наложено ограничение $u_{\min} \leq u \leq u_{\max}$, причем $\alpha^2(u_{\max}) < \pi/2H$, $\alpha^2(u_{\min}) > \pi/2H$.

12.3. Решения. Задача имеет аналитическое решение, полученное с помощью принципа максимума Понтрягина

$$\begin{cases} u = u^* \text{ при } 0 \leq x \leq h_0 \text{ и } u = u_{\min} \text{ при } h_0 < x \leq H; \\ \Phi(0) = \Phi_{\max}, \Phi(x) \leq \Phi(0). \end{cases}$$

u^* лежит в области допустимых значений u и удовлетворяет условию $|\alpha^2(u^*)| < \alpha^2(u)$ при $u_{\min} \leq u \leq u_{\max}$ и $u \neq u^*$, т. е. $\alpha^2(u^*) = 0$ или $u^* = u_{\max}$.

После того как значение u^* выбрано, величина h_0 вычисляется из решения трансцендентного уравнения

$$\alpha_1 \operatorname{tg}(\alpha_1 h_0) = \alpha_2 \operatorname{ctg} \alpha_2 (H - h_0),$$

где $\alpha_2 = a - bu_{\min}$, $\alpha_1 = a - bu^*$.

§ 13. Задача о максимуме мощности (одномерная цилиндрическая геометрия)

13.1. Прототип теста [37—38]. Физической основой для данного варианта послужила задача о максимуме мощности реактора на тепловых нейтронах при наличии теплофизических ограничений [37, 38]. Максимизация мощности осуществляется размещением поглотителя в объеме реактора. Концентрация поглотителя ограничена. Для описания реактора использована простейшая одномерная (цилиндрическая) одногрупповая модель.

13.2. Тестовая задача. Реактор представляет собой бесконечный цилиндр радиусом R . Распределение нейтронов описывается уравнением

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{d\Phi}{dr} \right) + \alpha^2(u) \Phi = 0,$$

где $\Phi = \Phi(r)$, $u = u(r)$; $\alpha^2(u) = a - bu$, $\alpha^2(u) \geq 0$; a и b —константы.

Граничные условия $\Phi(0) = \Phi_0^*$, $\Phi(R) = 0^*$. Требуется найти оптимальную компоновку (управление) $u(r)$, такую, чтобы величина

* Теплофизическое ограничение заключено в граничном условии $\Phi(0) = \Phi_0$ при $\alpha^2(u) \geq 0$.

$W = \int_0^R u(r) \varphi(r) dr$ была максимальна. На управление наложено

ограничение $u_{\min} \leq u(r) \leq u_{\max}$.

13.3. Решение. Задача имеет аналитическое решение, полученное с использованием принципа максимума Понтрягина. Результат записывается в виде системы трансцендентных уравнений [37]. В качестве численного примера рассмотрен случай

$$R = 2,405 \text{ см}; \quad a = 5,17; \quad b = 4,17; \quad u_{\min} = 0,776; \quad u_{\max} = 1,118.$$

Оптимальна трехзонная компоновка:

$$\begin{array}{ll} \text{Зона I} & 0 \leq r \leq r_1 \quad u(r) = u_{\max} \\ \text{Зона II} & r_1 < r < r_2, \quad u(r) = u_{\min} \\ \text{Зона III} & r_2 \leq r \leq R, \quad u(r) = u_{\max} \end{array}$$

Здесь $r_1 = 1,26$ см; $r_2 = 2,04$ см.

§ 14. Оптимизация ксенонового переходного процесса

14.1. Прототип теста [44, 45]. Рассматривается реактор на тепловых нейтронах с малым запасом реактивности. После длительной работы на постоянной мощности требуется остановить реактор, варьируя мощность в течение времени T так, чтобы выделенная за этот период энергия была минимальна и отрицательная реактивность, связанная с образованием Хе, не превосходила заданного значения. Мощность реактора ограничена.

14.2. Тестовая задача. Используется точечная модель реактора. Концентрация нуклидов ^{135}Xe и ^{135}I описывается системой уравнений

$$\left. \begin{array}{l} \frac{dx_1}{dt} = \gamma_1 \Phi - \lambda_1 x_1; \\ \frac{dx_2}{dt} = \gamma_2 \Phi + \lambda_1 x_1 - (\lambda_2 + \sigma \Phi) x_2. \end{array} \right\} \quad (14.1)$$

Здесь $x_1 = I(t)/\Sigma_f$; $x_2 = \text{Xe}(t)/\Sigma_f$ (I — концентрация ^{135}I ; Хе — концентрация ^{135}Xe ; Σ_f — макросечение деления топлива); γ_1 и γ_2 — число ядер I и Хе, образующихся на один акт деления; λ_1 и λ_2 — постоянные распада I и Хе; σ — микросечение захвата изотопа Хе; $\Phi = \Phi(t)$ — плотность потока нейтронов.

Граничные условия:

при $t \leq 0 \quad \Phi(t) = \text{const} = \Phi_{\max}$;

$$x_1(0) = \frac{\gamma_1 \Phi_{\max}}{\lambda_1}; \quad x_2(0) = \frac{(\gamma_1 + \gamma_2) \Phi_{\max}}{\lambda_2 + \sigma \Phi_{\max}},$$

при $t > T \quad \Phi(t) \equiv 0$.

Требуется определить оптимальный режим работы реактора $[\Phi(t)]$ за период $t \in [0, T]$ из условия минимума функционала

$$E = \frac{1}{\Phi_{\max}} \int_0^T \Phi(t) dt.$$

Имеются ограничения: а) $\Phi(t) \leq \Phi_{\max}$; б) $\max_{\substack{t \geq 0 \\ t < T}} x_2(t) \leq R$.

14.3. Решения. Исключим из рассмотрения тривиальный случай, когда $\Phi(t) \equiv 0$. Задача решается с использованием принципа максимума Понтрягина. Оптимальный режим имеет три характерных участка:

I. $0 < t \leq T_1, \quad \Phi_I(t) = 0;$

II. $T_1 < t < T_2, \quad \Phi_{II}(t) = \frac{\lambda_1 x_1^{II}(t) - \lambda_2 R}{\sigma R - \gamma_2};$

$$x_1^{II}(t) = A \exp \left[\frac{\lambda_1 (\gamma_1 + \gamma_2 - \sigma R)}{(\sigma R - \gamma_2)} (t - T_1) + \frac{\gamma_1 \lambda_2 R}{\lambda_1 [\gamma_1 + \gamma_2 - \sigma R]} \right];$$

$$A = \frac{\gamma_1 \lambda_2 R}{\lambda_1 [\gamma_1 + \gamma_2 - \sigma R]} - \frac{\gamma_1 \Phi_{\max}}{\lambda_1} \exp(-\lambda_1 T_1);$$

$$x_2^{II}(t) = \text{const} = R;$$

III. $T_2 < t \leq T, \quad \Phi_{III}(t) = \Phi_{\max}.$

Значения T_1, T_2 определяются из решения системы (14.1). Численное решение задачи представлено при следующем значении констант:

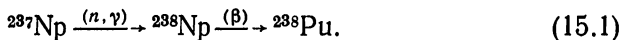
γ_1	γ_2	$\lambda_1, \text{с}^{-1}$	$\lambda_2, \text{с}^{-1}$	$\sigma, \text{см}^2$
0,061	0,002	$0,2853 \cdot 10^{-4}$	$0,2109 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^{-18}$

Принимаем: $R = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$; $\Phi_{\max} = 10^{14} \text{ 1}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$; $T = 16 \text{ ч } 6 \text{ мин } 40 \text{ с}$. Тогда $T_1 = 1 \text{ ч } 37 \text{ мин } 30 \text{ с}$; $T_2 = 16 \text{ ч } 4 \text{ мин } 30 \text{ с}$.

§ 15. Получение максимального количества нуклида

15.1 Прототип теста [39, 40]. Задача заключается в том, чтобы определить режим облучения мишени для получения максимального количества некоторого нуклида. Под режимом облучения понимается варьирование энергетическим спектром нейтронов, что достигается перемещением мишени внутри реактора или переносом мишени в другой реактор. При этом задано время облучения и наложены ограничения на дозу облучения и значение максимальной плотности потока нейтронов.

В настоящей тестовой задаче рассматривается облучение потоком нейтронов ^{237}Np с целью получения ^{238}Pu *:



Так как период полураспада ^{238}Np мал (~ 2 сут), ставится задача об оптимизации условий получения максимальной суммарной концентрации ^{238}Np и ^{238}Pu .

15.2. Тестовая задача. Представим процесс образования ^{238}Pu при облучении ^{237}Np нейтронами с помощью системы дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= -[\sigma(^{237}\text{Np})\Phi_T + I(^{237}\text{Np})\Phi_6] x_1; \\ \frac{dx_2}{dt} &= [\sigma(^{237}\text{Np})\Phi_T + I(^{237}\text{Np})\Phi_6] x_1 - \\ &\quad - [\sigma(^{238}\text{Np})\Phi_T + I(^{238}\text{Np})\Phi_6 + \lambda(^{238}\text{Np})] x_2; \\ \frac{dx_3}{dt} &= \lambda(^{238}\text{Np}) x_2 - [\sigma(^{238}\text{Pu})\Phi_T + I(^{238}\text{Pu})\Phi_6] x_3. \end{aligned} \right\} \quad (15.2)$$

Здесь x_1, x_2, x_3 — концентрация ядер $^{237}\text{Np}, ^{238}\text{Np}, ^{238}\text{Pu}$; $\sigma(^{237}\text{Np}), \sigma(^{238}\text{Np}), \sigma(^{238}\text{Pu})$ — полное сечение поглощения тепловых нейтронов $^{237}\text{Np}, ^{238}\text{Np}$ и ^{238}Pu соответственно; $I(^{237}\text{Np}), I(^{238}\text{Np}), I(^{238}\text{Pu})$ — полный резонансный интеграл поглощения нейтронов $^{237}\text{Np}, ^{238}\text{Np}$ и ^{238}Pu соответственно; $\lambda(^{238}\text{Np})$ — постоянная распада ^{238}Np .

Таблица 15.1

Параметры тестовой задачи 15

Нуклид	$\sigma, б$	$I, б$	$\lambda, \text{лет}^{-1}$
^{237}Np	170,0	946,0	—
^{238}Np	2070,0	880,0	169,1
^{238}Pu	500,0	150,0	—

Числовые значения параметров задачи приведены в табл. 15.1.

Задаем полное время облучения $T=0,5$ года. Интегральные дозы облучения определяются как

$$\int_0^T \Phi_T(t) dt = 1,5778 \cdot 10^4 \text{ б}^{-1};$$

$$\int_0^T \Phi_6(t) dt = 0,3155 \cdot 10^4 \text{ б}^{-1}.$$

Начальная концентрация ^{237}Np $x_1(0) = 1$ отн. ед. **

При выполнении оговоренных выше условий и ограничений требуется максимизировать функционал:

$$J[\Phi_T(t), \Phi_6(t)] = x_2(T) + x_3(T).$$

* ^{238}Pu используется в качестве источника энергии для наземных и космических установок, а также в медицине.

** Начальная концентрация ^{237}Np и результат решения представлены в относительных единицах, при этом начальная концентрация ограничена только требованием выполнения уравнений (15.2) во все время облучения.

Оптимизируемое управление есть две функции: $\Phi_T(t)$ и $\Phi_G(t)$. Ставится задача определить значения этих функций при изменении аргумента с интервалом 0,01 года, т. е.

$$\Phi_T(0), \Phi_G(0), \Phi_T(0,01), \Phi_G(0,01), \Phi_T(0,02), \Phi_G(0,02) \dots$$

15.3. Решения. Задача решена с использованием принципа максимума при помощи программ* ISOTOP и PLUTON [41—43].

Т а б л и ц а 15.2

Оптимальное управление для тестовой задачи

t , лет	$\frac{\Phi_T}{\max \Phi_T}$	$\frac{\Phi_G}{\max \Phi_G}$	t , лет	$\frac{\Phi_T}{\max \Phi_T}$	$\frac{\Phi_G}{\max \Phi_G}$
0,00	1,000	0,000	0,25	0,600	0,000
0,01	1,000	0,000	0,26	0,400	0,000
0,02	1,000	0,000	0,27	0,400	0,150
0,03	1,000	0,000	0,28	0,200	0,150
0,04	1,000	0,000	0,29	0,100	0,250
0,05	1,000	0,000	0,30	0,119	0,350
0,06	0,994	0,000	0,31	0,000	0,500
0,07	0,979	0,000	0,32	0,000	0,550
0,08	0,968	0,000	0,33	0,000	0,550
0,09	0,962	0,000	0,34	0,000	0,550
0,10	0,948	0,000	0,35	0,000	0,550
0,11	0,939	0,000	0,36	0,000	0,550
0,12	0,929	0,000	0,37	0,000	0,650
0,13	0,920	0,000	0,38	0,000	0,569
0,14	0,911	0,000	0,39	0,000	0,596
0,15	0,900	0,000	0,40	0,000	0,600
0,16	0,900	0,000	0,41	0,000	0,602
0,17	0,881	0,000	0,42	0,000	0,600
0,18	0,876	0,000	0,43	0,000	0,600
0,19	0,867	0,000	0,44	0,000	0,650
0,20	0,859	0,000	0,45	0,000	0,650
0,21	0,850	0,000	0,46	0,000	0,650
0,22	0,850	0,000	0,47	0,000	0,587
0,23	0,800	0,000	0,48	0,000	0,650
0,24	0,964	0,000	0,49	0,000	0,946

Оптимальное управление представлено в табл. 15.2. Значение максимизируемого функционала оказалось равным

$$J_{\text{опт}} = x_2(T) + x_3(T) = 0,3363.$$

Отметим, что отличие оптимального значения функционала от его значения при $\Phi_T = \text{const}$ и $\Phi_G = \text{const}$ при сохранении интегральных доз облучения постоянными составляет 23,14%.

* Решение задачи получено А. И. Воловиком.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Argonne Code Center: Benchmark Problem Book. Numerical Determination of the Space, Time, Angle or Energy Distribution of Particles in an Assembly. ANL-7416, 1968.
2. См. [1], ANL-7416 (Suppl. 1), 1972.
3. См. [1], ANL-7416 (Suppl. 2), 1977.
4. Dodds H. L., Jr. Computational Benchmark Problems — a Review of Recent Work within the American Nuclear Society Mathematics and Computation Division. — Nucl. Sci. and Engng, 1977, v. 64, p. 64.
5. Петрунин Д. М., Беляева Е. Д., Киреева И. Л. БИПР-5. Программа для расчета трехмерных полей энерговыделений и выгорания топлива в одногрупповом диффузионном приближении для реакторов типа ВВЭР. Препринт ИАЭ-2518. М., 1975.
6. Fowler T. B., Vondy D. R., Cunningham G. W. Nuclear Reactor Analysis Code: CITATION ORNL-TM-2496, Oak Ridge National Laboratory, 1971.
7. Reiche Ch DIPOL2—ein Programm (Modul) zur Lösung der zweidimensionalen Diffusionsgleichungen. Programmbericht RPT-14/73, Rossendorf, 1973.
8. Buckel G., Küfner K. Benchmark Calculations for a Sodium-Cooled Breeder Reactor by Two- and Three-Dimensional Diffusion Methods.—Nucl. Sci. and Engng, 1977, v. 64, p. 75.
9. Woznicki Z. HEXAGA-II. A Two-dimensional Multigroup Neutron Diffusion Programme for a Uniform Triangular Mesh with Arbitrary Group Scattering for the IBM/370-168 Computer. KFK-2293, 1976.
10. Зинин А. И., Колесов В. Е., Невиница А. И., Суслов И. Р. Тестовые расчеты одномерных моделей реакторов, выполненные по программам ФЭИ. Препринт ФЭИ-373. Обнинск, 1977.
11. Лебедев В. И., Шишков Л. К., Ярославцева Л. Н. Сравнение итерационных методов решения уравнения диффузии для гексагональных конечно-разностных сеток. — В кн.: Семинар «Методы вычислительной и прикладной математики. Методы решения систем вариационно-разностных уравнений». Под руководством акад. Г. И. Марчука. Новосибирск, СО АН СССР, вып. 5, 1979.
12. Reiche Ch. e. a. Kurzbeschreibungen der Prozeduren des Reaktor Codé Systems RHEIN. Programmbericht, Zfk Rossendorf, 1974.
13. Vondy D. R., Fowler T. B., Cunningham G. M. VENTURE: A Code Block for Solving Multigroup Neutronics Problems Applying the Finite Difference Diffusion Theory Approximation to Neutron Transport. ORNL-5062, 1975.
14. Зинин М. Н., Чухлова О. П. V2DR-АЛГОЛ — программа многогруппового расчета потока нейтронов в реакторе методом Бубнова—Галеркина в двумерной геометрии. — В кн.: Сборник докладов по программам и методам физического расчета быстрых реакторов. Димитровград, изд. НИИАР, 1975.
15. Зинин М. Н., Загацкий Б. А., Темноева Т. А., Ярославцева Л. Н. Автоматизация реакторных расчетов. М., Атомиздат, 1974.
16. Марчук Г. И. Методы вычислительной математики. Новосибирск, Наука, СО АН СССР, 1973.
17. Шишков Л. К. Методы решения диффузионных уравнений двумерного ядерного реактора. М., Атомиздат, 1976.
18. Марчук Г. И., Пененко В. В. Численные методы расчета двумерных ядерных реакторов. — Атомная энергия, 1966, т. 20, вып. 3, с. 264.
19. Николайшвили Ш. С. и др. Методы расчета быстрых реакторов. — В кн.: Симпозиум СЭВ. Состояние и перспективы работ по созданию АЭС с реакторами на быстрых нейтронах. Обнинск, 1967. Т. 2. Обнинск, изд. ФЭИ, 1968, с. 75.
20. Frölich R., Schmuck P. Analysis of Transient Overpower Accidents for the SNP-300 Mark-1 and Mark 1-A Cores. — KFK-2115, 1975.
21. Kiefhaber E. The KFKINR — Set of Group Constants. KFK-1572, 1972.
22. Зинин М. Н., Кудряшов Л. Н., Николаев М. Н. Двумерная модель большого энергетического быстрого реактора-бридера с оксидным топливом и натриевым теплоносителем для проведения тестовых расчетов. Препринт НИИАР П-4 (270). Димитровград, 1976.

23. **Абагян Л. П., Базазянц Н. О., Бондаренко И. И., Николаев М. Н.** Групповые константы для расчета ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1964.
24. **Зизин М. Н., Ярославцева Л. Н.** Комплекс программ расчета нейтронно-физических характеристик атомных реакторов.—В кн.: Труды трехстороннего советско-бельгийско-голландского симпозиума по некоторым проблемам физики быстрых реакторов. Т. 1. М., ЦНИИАтоминформ, 1970, Д-17.
25. **Гере Г., Райхе Х.** Расчеты тестового быстрого реактора-бридера в двумерной цилиндрической геометрии. Akademie der Wissenschaften der DDR, Zentralinstitut für Kernforschung, Rossendorf bei Dresden, 1976.
26. **Тинка И., Тинкова Е., Чермак И.** Расчеты тестового быстрого реактора в двумерной геометрии. Ustav Jaderneho Vyzkumu Rez, Cerven. UJV 3901-R, 1976.
27. **Мисдом Э., Мроск Э., Хенинг Д.** Двумерный тестовый расчет модели быстрого реактора. НП комбинат «Крафтверксанлагебау», Берлин, 1976.
28. **Никольский Р. В., Чухлова О. П., Зизин М. Н.** Результаты расчетов стандартного реактора в двумерной геометрии. Препринт НИИАР П-32 (326). Дмитровград, 1977.
29. **Носов В. И., Компаниец Г. В., Петрушенко Р. П.** Методика и программа расчета гетерогенных реакторов с блоками сложного состава. Препринт ИАЭ-2867, М., 1977.
30. **Крысл В., Влаховский К., Выскочил В., Збытовский А.** Результаты расчета двух модельных задач ШКОДА — завод строения ядерных электростанций, Ае 3576/Докл. Р, 1975.
31. **Кочуров Б. П.** О расчетах реакторов численными гетерогенными методами. Препринт ИТЭФ-2, М., 1974.
32. **Галанин А. Д.** Теория гетерогенного реактора. М., Атомиздат, 1971.
33. **Барц Х. Р., Райхе Х., Ванд Х.** Примеры для расчета быстрых реакторов в одномерной геометрии, которые рекомендуются для сравнения расчетов, проведенных с различными расчетными программами РРТ-19/74, ЦИЯИ, Россендорф (ГДР), 1974.
34. **Baker A. R., Hammond A. D.** Calculations for a Large Fast Reactor. A Comparison of Results Organised by the IWG on Fast Reactors of the IAEA. TRG Report 2133 (R), 1971.
35. **Зарицкий С. М., Троянов М. Ф.** Зависимость расчетных значений характеристик энергетических быстрых реакторов от изменений констант, используемых в расчете, и требования к точности этих констант.—См. 24, Д-20.
36. **Павловичев А. М.** Задачи о минимуме среднеквадратичного отклонения тепловыделения и максимуме мощности ядерного реактора. Препринт ИТЭФ-108. М., 1976.
37. **Зарицкая Т. С., Рудик А. П.** О максимальной мощности реактора с газовым охлаждением. Препринт ИТЭФ-108. М., 1976.
38. **Зарицкая Т. С., Рудик А. П.** Использование принципа максимума Л. С. Понтрягина в задачах о минимуме критических размеров и о максимуме мощности.—Атомная энергия, 1967, т. 22, вып. 1, с. 6.
39. **Зарицкая Т. С., Рудик А. П.** Выбор оптимального режима облучения изотопов. Препринт ИТЭФ-537, М., 1967.
40. **Зарицкая Т. С., Рудик А. П.** Выбор оптимального режима облучения изотопов.—Атомная энергия, 1969, т. 26, вып. 5, с. 432.
41. **Воловик А. И., Герасимов А. С., Немировская С. А.** Оптимизационная программа расчета образования изотопов в ядерном реакторе. Препринт ИТЭФ-110, М., 1976.
42. **Воловик А. И.** Оптимизация получения ^{238}Pu из ^{238}U .—Атомная энергия, 1978, т. 44, вып. 4, с. 367.
43. **Воловик А. И.** Методика решения изопериметрической задачи оптимизации облучения изотопов. Препринт ИТЭФ-121, М., 1977.
44. **Рудик А. П.** Ксеноновые переходные процессы в ядерных реакторах. М., Атомиздат, 1974.
45. **Герасимов А. С.** Оптимальный режим эксплуатации исследовательского реактора.—Атомная энергия, 1977, т. 42, вып. 2, с. 126.