

Руководство пользователя программы для ЭВМ JARFR
(с системой констант CONSYST 0601/PRECONS на основе
библиотек БНАБ-93)

РЕФЕРАТ

Руководство пользователя 108 с., 7 таблиц, 17 рисунков, 27 источников.

РЕАКТОРЫ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ, НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС, МНОГОГРУППОВОЕ ДИФФУЗИОННОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ, МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ РАСЧЕТОВ, ИНСТРУКЦИЯ ДЛЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ, ГРАФИЧЕСКИЙ РЕДАКТОР

Настоящая работа посвящена документированию программы для ЭВМ JARFR (далее JARFR), предназначенного для проведения в многогрупповом диффузионном приближении расчетов основных нейтронно-физических характеристик быстрых реакторов и их моделей на критических сборках нулевой мощности.

Представлены расчетные возможности комплекса, покрывающие широкий круг практических и исследовательских задач. С необходимой степенью детализации изложены методы и алгоритмы JARFR, включая подготовку нейтронно-физических констант, базовые методы решения многогруппового уравнения диффузии нейтронов в конечно-разностном приближении, формализм расчета нейтронно-физических функционалов, методы и алгоритмы теории возмущений первого порядка и обобщенной теории возмущений. Изложены основы усовершенствованных методик решения системы диффузионных уравнений, реализованных в комплексе.

Документированы программно-технические характеристики JARFR и разработана подробная инструкция для пользователя. Изучена возможность применения редактора картограмм, обеспечивающего визуализацию, редактирование и преобразование картограмм для реакторных расчетов с применением JARFR.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|-----|
| Обозначения и сокращения | 4 |
| Введение | 5 |
| 1 Назначение и область применения JARFR | 6 |
| 2 Методы и алгоритмы JARFR..... | 9 |
| 2.1 Подготовка нейтронно-физических констант в комплексе..... | 9 |
| 2.2 Решение многогруппового уравнения диффузии нейтронов..... | 10 |
| 2.3 Расчет нейтронно-физических функционалов | 16 |
| 2.4 Методы и алгоритмы теории возмущений..... | 22 |
| 2.5 Усовершенствованные методики решения системы диффузионных уравнений | 34 |
| 3 Программно-технические характеристики JARFR | 45 |
| 3.1 Общие сведения..... | 45 |
| 3.2 Блок-схема программного средства | 45 |
| 3.3 Структура построения комплекса..... | 47 |
| 4 Инструкция для пользователя программного JARFR..... | 55 |
| 4.1 Инструкция по запуску | 55 |
| 4.2 Входная информация | 56 |
| 4.3 Содержание операторов ввода NAMELIST | 60 |
| 4.4 Картограммы расчетных моделей..... | 87 |
| 4.5 Выходная информация..... | 90 |
| 5 Разработка графического модуля задания и редактирования картограмм..... | 93 |
| 5.1 Общее описание..... | 93 |
| 5.2 Принципы работы и архитектура редактора | 95 |
| 5.3 Последовательность отображения, преобразования и коррекции картограмм..... | 98 |
| Заключение..... | 106 |
| Список использованных источников..... | 107 |

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

| | |
|------|--|
| а.з. | - активная зона |
| БЭ | - боковые экраны (зона воспроизводства) |
| ВРХ | - внутриреакторное хранилище |
| ТЭ | - торцевые экраны (зона воспроизводства) |
| ТВС | - тепловыделяющая сборка |
| IIS | - improved iteration scheme (усовершенствованная итерационная схема) |
| SOR | - successive over relaxation (метод точечной верхней релаксации) |

Введение

Для обеспечения качества расчетно-теоретического обоснования характеристик реакторов усовершенствованных типов важным аспектом расчетных исследований является проведение работ по методическому обеспечению нейтронно-физических расчетов.

Основным расчетным инструментом в нейтронной физике реакторов на быстрых нейтронах в настоящее время являются программы, реализующие решение уравнения переноса нейтронов в многогрупповом диффузионном приближении в трехмерной расчетной геометрии с использованием российских систем подготовки нейтронно-физических констант.

В частности, для этих целей используется разработанный в НИЦ “Курчатовский институт” JARFR с системой константного обеспечения CONSYST 0601/PRECONS на основе библиотек БНАБ-93 (разработки ГНЦ РФ ФЭИ).

Как программы нейтронно-физического расчета, так и системы константного обеспечения постоянно совершенствуются в методическом и содержательном плане, поэтому необходимо обеспечить, чтобы расчетные исследования при обосновании характеристик действующих и перспективных реакторов на быстрых нейтронах проводились с учетом этих усовершенствований.

В этой связи в настоящей работе решается актуальная задача по подготовке элементов документации JARFR, предназначенного для проведения в многогрупповом диффузионном приближении расчетов основных нейтронно-физических характеристик быстрых реакторов и их моделей на критических сборках нулевой мощности.

Эти элементы документации должны включать в себя прежде всего изложение методов и алгоритмов JARFR, основ базовых и усовершенствованных методик решения системы диффузионных уравнений, реализованных в программе, а также подробную инструкцию для пользователя.

1 Назначение и область применения JARFR

Сведения о программном средстве

Полное название программы для ЭВМ - комплекс программ JARFR с системой подготовки констант CONSYST и библиотекой БНАБ-93.

Перечень самостоятельных модулей, входящих в JARFR, включает в себя модуль подготовки констант CONSYST 0601 с оболочкой PRECONS и библиотеки ядерных данных БНАБ-93: 28-групповую (ABBN93g.01a) и 299-групповую (ABBN93m.01a).

Основной автор JARFR - Л.Н. Ярославцева, НИЦ “Курчатовский Институт”. В разное время в работе над различными модулями программы принимали и принимают участие другие сотрудники НИЦ “Курчатовский Институт” и сотрудники ОАО «ОКБМ Африкантов».

Организация - разработчик JARFR: НИЦ “Курчатовский Институт”, 123182, г. Москва, пл. Акад. Курчатова, 1. Разработчик библиотеки ядерных данных БНАБ-93 и системы подготовки констант CONSYST 0601 с оболочкой PRECONS – ГИЦ РФ ФЭИ, г. Обнинск.

Расчетные возможности программы

JARFR позволяет проводить расчеты основных нейтронно-физических характеристик быстрых реакторов и их моделей на критических сборках нулевой мощности при заданных значениях размеров, составов и температур элементов конструкции этих установок. С помощью JARFR рассчитываются следующие нейтронно-физические характеристики [1-3]:

- эффективный коэффициент размножения;
- пространственное распределение многогрупповой плотности потока нейтронов и энерговыделения из решения условно-критической задачи или решения неоднородной задачи с внешним источником, характеризующимся заданным пространственно-энергетическим распределением;
- коэффициенты неравномерности энерговыделения по физическим зонам реактора;
- пространственное распределение скоростей реакций, параметры воспроизводства топлива,
- изменение нуклидного состава при выгорании топлива в процессе кампании реактора;
- пространственное распределение флюенса нейтронов и характеристик радиационного повреждения некоторых конструкционных материалов в процессе облучения;
- пространственное распределение многогрупповой ценности нейтронов;
- параметры точечной кинетики: эффективные доли запаздывающих нейтронов, время жизни мгновенных нейтронов;
- решение неоднородной сопряженной задачи с источником (для задаваемых исходными

- данными дробно-линейных функционалов) с ортогонализацией решения;
- пространственное распределение коэффициентов чувствительности эффективного коэффициента размножения и задаваемых дробно-линейных функционалов к изменению концентраций изотопов и размеров реактора.

История развития

JARFR [1-3] в течение длительного времени применяется и развивается сотрудниками НИЦ «Курчатовский институт» и ОАО «ОКБМ Африкантов» для поддержки работ по физике реакторов на быстрых нейтронах. Он давно и успешно использовался и используется в практике расчётов действующих (БН-600 и БОР-60) и перспективных реакторов на быстрых нейтронах, имеется значительный опыт расчетов и верификации, отлажены процедуры подготовки исходных данных и обработки результатов.

JARFR является одним из программных средств, широко применяемых в настоящее время в практике расчетов нейтронно-физических характеристик реакторов на быстрых нейтронах наряду с комплексами ГЕФЕСТ (ВНИИАЭС-ИБРАЭ) [4] и TRIGEX (ФЭИ) [5].

С начала 1980-х годов разработано несколько версий JARFR, из которых две используются в настоящее время:

- JARFR с разработанной в ФЭИ библиотекой констант БНАБ-78 [6] и разработанной в НИИАР системой подготовки констант МИМ [7] – аттестована Госатомнадзором Российской Федерации для расчетов энергетических и исследовательских реакторов и критических сборок на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем, урановым и уран-плутониевым топливом и бланкетом на основе двуокиси урана, аттестационный паспорт №142 от 27.06.2002. Эта версия была внедрена в ОКБМ, НИИАР, НИЦ «Курчатовский институт».
- JARFR с разработанными в ФЭИ библиотекой констант БНАБ-93.01a [8] и системой подготовки констант CONSYST 0601/PRECONS [9]. К настоящему времени эта версия успешно прошла процедуру аттестации в Ростехнадзоре для расчетов реакторов БН-600 и БН-800 (протокол заседания экспертного Совета Ростехнадзора по аттестации программных средств № 59 от 09.10.2012).

Круг задач, в разное время решавшихся и решаемых ныне с использованием этих версий JARFR, достаточно широк, и определяется потребностями организаций, его использующих [10]:

- НИЦ «Курчатовский институт» - расчетные исследования по физике реакторов на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями, реакторов с быстро-резонансным спектром, охлаждаемых пароводяной смесью, а также жидкосолевых реакторов на быстрых нейтронах;

- ОКБМ - проектные расчеты Главного конструктора реакторов типа БН;
- НИИАР - поддержка эксплуатации действующего реактора БОР-60;
- ФЭИ - кросс-верификация алгоритмов и программных средств, предназначенных для расчета нейтронно-физических характеристик реакторов на быстрых нейтронах.

JARFR с системой констант БНАБ-93 использует те же основные алгоритмы расчета, что и аттестованный JARFR с системой констант БНАБ-78, и существующие различия обусловлены в основном использованием разного константного обеспечения. В то же время, происходит непрерывный процесс усовершенствования отдельных модулей программы, в частности, относящихся к базовым вопросам решения многогруппового уравнения диффузии нейтронов, например, путем применения эффективных крупносеточных разностных схем.

В настоящее время JARFR с системой подготовки констант CONSYST 0601/PRECONS и библиотекой констант БНАБ-93 внедрен для практического применения в следующих организациях:

- ОАО «ОКБМ Африкантов» - для расчетов организации - Главного конструктора БН в обоснование характеристик проектируемых реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем БН-800 и БН-1200 с различными видами топлива, планирования загрузки действующего реактора БН-600 (Белоярская АЭС), а также подготовки проектных документов при разработке модификаций активной зоны реактора БН-600;
- НИЦ «Курчатовский институт» - для расчетов нейтронно-физических характеристик перспективных реакторов на быстрых нейтронах с различными теплоносителями (натриевым - БН, свинцовым - БРЕСТ, свинцово-висмутовым - РБ-ЕЦ, гелиевым - БГР), а также анализа нейтронно-физических экспериментов на критических стендах БФС (ФЭИ).

2 Методы и алгоритмы JARFR

2.1 Подготовка нейтронно-физических констант в программе

Для расчета нейтронно-физических констант физических зон, входящих в модель реактора, подготавливается исходная информация, необходимая для расчета с применением системы константного обеспечения CONSYST/PRECONS, а именно концентрации и температуры всех нуклидов, учитываемых при моделировании составов реальных материальных зон.

Для определения гомогенизированных концентраций нуклидов в каждой физической зоне используются данные, полученные из проектного описания элементов конструкции реактора. При подготовке констант используются поля температур, получаемые в результате расчета по проектным программам теплофизического расчета реактора. Нуклиды, присутствующие в ТВС, могут подразделяться на нуклиды теплоносителя, оболочки и топлива. Для каждой физической зоны могут быть заданы температуры каждого нуклида по отдельности, температуры по указанным группам, единое значение температуры для всех нуклидов.

Стандартным режимом использования системы константного обеспечения CONSYST в составе JARFR является подготовка констант в 26-групповом приближении со стандартным для библиотек типа БНАБ разбиением энергетического диапазона от 0 до 10,5 МэВ. Используются опции режимов подготовки констант с помощью программы PRECONS, рекомендованные разработчиками константного обеспечения для диффузионных расчетов быстрых реакторов [11, 12]. При расчете макроконстант среды резонансная блокировка сечений изотопов учитывается с помощью факторов самоэкранировки Бондаренко, которые представлены в библиотеке БНАБ-93 в зависимости от энергии нейтронов, температуры среды и сечения разбавления другими материалами. При расчете групповых сечений упругого замедления поправки на форму внутригруппового спектра нейтронов рассчитываются в системе CONSYST/PRECONS с использованием мультигруппового (299 групп) разбиения по энергии.

В представленной версии JARFR существует возможность выбора способа блокировки транспортного сечения при использовании системы константного обеспечения CONSYST/PRECONS. Как показали специально проведенные исследования, в случае расчёта реакторов типа БН с воспроизводящими экранами более точные результаты могут быть получены при использовании для этих зон так называемой блокировки транспортного сечения по первой гармонике. В случае использования стальных экранов рекомендуется использовать блокировку по нулевой гармонике.

Расчеты моделей реактора могут проводиться и в меньшем, чем 26, числе групп. Для этого существуют две возможности.

Одной из них является свертка нейтронных сечений при начале работы JARFR с использованием 26-групповых спектров для физических зон, полученных непосредственно системой CONSYST/PRECONS. Однако при этом реальные спектры в зонах модели не учитываются, и требуется дополнительный контроль вносимой погрешности путем сравнения с 26-групповыми расчетами конкретного рассчитываемого объекта. Поэтому этот путь в практике расчетов в настоящее время не используется.

Другой возможностью является проведение расчетов по JARFR в два этапа. На первом этапе по сечениям, подготовленным непосредственно блоком CONSYST/PRECONS с учетом составов и мультигрупповых спектров расчетных зон, проводится упрощенный (с невысокими точностями) 26-групповой расчет нейтронного поля в той же геометрической модели, что и последующий основной (с необходимыми точностями) расчет. На втором этапе полученное таким образом «приблизительное» 26-ти групповое распределение плотности потока нейтронов сворачивается в определенное исходными данными модели «малогрупповое» энергетическое разбиение, а затем из подготовленных блоком CONSYST/PRECONS 26-групповых констант формируются константы в меньшем числе групп для основного расчета физических характеристик модели. Практика показала надежность такого подхода, обеспечивающего при надлежащем выборе границ групп минимальные отличия 26-групповых и малогрупповых расчетов (от 9 групп).

Следует отметить, что с развитием вычислительных возможностей компьютеров режим расчетов в меньшем, чем 26, числе групп используется всё реже.

2.2 Решение многогруппового уравнения диффузии нейтронов

Базовый принцип расчета заключается в том, что нейтронно-физические характеристики модели реактора рассчитываются на основе решения многогруппового уравнения переноса нейтронов в диффузионном приближении с известными нейтронно-физическими константами гомогенизированных физических зон модели реактора.

2.2.1 Геометрия расчетных моделей

Пространство, в котором ищется решение, может быть двумерным или трехмерным. Двумерные модели реактора или его фрагментов могут быть эффективно использованы для поисковых расчетных исследований (оценки влияния размера расчетной сетки в плане, разбиения на физические зоны, расположения специальных сборок и органов СУЗ, оптимизация формы границ внутри активной зоны и т.д.). При проведении проектных расчетов двумерные модели в настоящее время не используются.

Расчетная сетка в плане может состоять из треугольных, квадратных или шестигранных ячеек одинакового размера. Может быть использовано автоматическое дробление исходной гексагональной конечно-разностной сетки в поперечном сечении реактора на треугольники с последующим сворачиванием результатов расчета до первоначального разбиения.

По высоте модели разбиение может быть произвольным. В практике расчетных исследований при выборе высотного разбиения пользователи JARFR руководствуются общепринятым подходом: шаги по высоте должны быть сопоставимы с шагом расчётных ячеек в плане. При этом, если это возможно, разбиение по высоте выбирается близким к равномерному. Расчетные узлы сетки располагаются в центрах ячеек. Ячейки имеют одинаковую форму и размер по сечению расчетной модели в горизонтальной плоскости.

В тех случаях, когда условия задачи позволяют использовать симметрию, может рассчитываться не весь реактор, а его часть, попадающая в представительный сектор симметрии. Возможные секторы симметрии расчетной модели в плане:

- для квадратных ячеек - 45, 90, 180, 360 градусов;
- для шестигранных и треугольных ячеек - 30, 60, 120, 180, 360 градусов.

Для секторов симметрии 45, 60 и 90 градусов могут быть использованы различные типы симметрии: зеркальное отражение на границах сектора или симметрия центрального поворота.

2.2.2 Формализм решения

Исходной системой уравнений для расчета пространственно-энергетического распределения плотности потока нейтронов является многогрупповая система диффузионных уравнений:

$$-\nabla D_g \nabla \varphi_g + \Sigma_{cfd,g} \varphi_g = Q_g, \quad (1)$$

$$Q_g = \frac{1}{k_{ef}} \sum_{g'=1}^G \chi_g \nu \Sigma_g^f \phi_{g'} + \sum_{g'=1}^{g-1} \Sigma_s^{g' \rightarrow g} \phi_{g'}, \quad (2)$$

где g – номер группы, $g=1 \dots G$, G – полное число групп;

φ_g - плотность потока нейтронов в группе g ;

D_g - коэффициент диффузии в группе g ;

$\Sigma_{cfd,g}$ - сечение увода нейтронов в группе g ;

Q_g - источник нейтронов в группе g ;

$\nu \Sigma_{fg}$ - сечение размножения в группе g ;

χ_g - доля спектра нейтронов деления в группе g ;

$\Sigma_s^{g' \rightarrow g}$ - сечение рассеяния нейтронов из группы g' в группу g .

На внешних границах расчетной модели может быть реализовано одно из следующих граничных условий:

- а) равенство нулю плотности потока нейтронов;
- б) равенство нулю тока нейтронов;
- в) задание логарифмической производной плотности потока нейтронов.

Для этого на внешней границе модели реактора Γ реализуется условие вида:

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial \bar{n}} \right|_{\Gamma} = -\gamma'' \phi \Big|_{\Gamma} \quad (3)$$

где значение γ'' определяется типом граничного условия. Например, если предположить, что плотность потока нейтронов обращается в ноль на длине линейной экстраполяции $d = 0.71 \lambda_{tr}$ (граница с вакуумом), то значение γ'' определяется выражением:

$$\gamma^{\text{вакуум}} = \frac{2D}{0.71 \cdot 3D} = 0.9389671... \quad (4)$$

Для расчета ценности нейтронов решается многогрупповое уравнение, сопряженное стационарному диффузионному уравнению, с аналогичными граничными условиями:

$$-\nabla D_g \nabla \phi_g^+ + \Sigma_{cfd,g} \phi_g^+ = Q_g^+ \quad (5)$$

$$Q_g^+ = \frac{1}{k_{ef}^+} \nu \Sigma_f^g \sum_{g'=1}^G \chi_{g'} \phi_{g'}^+ + \sum_{g'=g+1}^G \Sigma_s^{g \rightarrow g'} \phi_{g'}^+ \quad (6)$$

Обозначения аналогичны приведенным выше. Индекс “+” относится к сопряженным величинам.

Решение многогрупповых уравнений для плотности потока и ценности нейтронов находится методом итерации источника, при этом на каждой внешней итерации источник нормируется на единицу. Для ускорения внешних итераций может быть использован метод полиномов Чебышева или метод прогнозируемого ускорения по отношению к источнику деления.

Разностная схема

В стандартном режиме расчета решается обычный конечно-разностный аналог приведенных уравнений. При выводе конечно-разностных уравнений используется стандартная процедура интегрирования групповых уравнений по объему ячейки с учетом граничных условий. Решением являются значения искоемых функций в узлах конечно-разностной сетки.

В окончательном виде конечно-разностные уравнения, используемые в JARFR, для всех расчетных геометрий записаны универсальным образом, и в них количество расчетных ячеек, соседствующих с данной ячейкой, входит как параметр. Для каждой энергетической группы i на n -й внешней итерации уравнение выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned}
 & -\frac{8}{Nh^2} \sum_{j=1}^{N16} \frac{D_{i,k} D_{i,l_j}}{D_{i,k} + D_{i,l_j}} \varphi_{i,l_j}^{(n)} - \frac{2}{h_z^2} \sum_{j=1}^{N1T} \frac{D_{i,k} D_{i,l_j}}{D_{i,k} + D_{i,l_j}} \varphi_{i,l_j}^{(n)} + \\
 & \varphi_{i,k}^{(n)} \left\{ \frac{8}{Nh^2} \left(\sum_{j=1}^{N16} \frac{D_{i,k} D_{i,l_j}}{D_{i,k} + D_{i,l_j}} + \sum_{j=1}^{N26} D_{i,k} + \frac{h}{4} \sum_{j=1}^{N36} \gamma_{i,j} \right) + \right. \\
 & \left. \frac{2}{h_z^2} \left(\sum_{j=1}^{N1T} \frac{D_{i,k} D_{i,l_j}}{D_{i,k} + D_{i,l_j}} + \sum_{j=1}^{N2T} D_{i,k} + \frac{h_z}{4} \sum_{j=1}^{N3T} \gamma_{i,j} \right) + \Sigma_{cfd_{i,k}} \right\} = Q_{i,k}^{(n)}
 \end{aligned} \tag{7}$$

где $N=6$ - для шестигранной расчетной ячейки;

4 - для квадратной расчетной ячейки;

3 - для треугольной расчетной ячейки.

h - шаг расчетной схемы в горизонтальной плоскости;

h_z - шаг расчетной схемы по вертикали (члены с множителем $\frac{2}{h_z^2}$ имеют смысл только

для трехмерной геометрии, формула (7) показана для случая постоянного по высоте шага расчетной сетки);

$\varphi_{i,k}^{(n)}$ - плотность потока нейтронов в i -й группе для k -го расчетного узла и n -й итерации;

$D_{i,k}$ - коэффициент диффузии в i -й группе для k -го расчетного узла;

$\gamma_{i,j}$ - логарифмическая производная потока нейтронов на внешней границе реактора в i -й группе для j -го направления в граничной ячейке;

$\Sigma_{cfd_{i,k}}$ - сечение увода нейтронов из i -й группы для k -го расчетного узла;

$N16$ - число внутренних границ в плоскости для k -го узла;

$N1T$ - число внутренних границ в вертикальном направлении для k -го узла;

$N26$ - число внешних границ в плоскости для k -го расчетного узла, где заданы условия равенства нулю плотности потока нейтронов;

$N2T$ - то же для вертикального направления;

$N36$ - число внешних границ в плоскости для k -го расчетного узла, где реализовано задание логарифмической производной плотности потока нейтронов;

$N3T$ - то же для вертикального направления;

$Q_{i,k}^{(n)}$ - источник нейтронов для i -й группы, k -го расчетного узла в n -й итерации;

JARFR в расчетах с заданием логарифмической производной на внешней границе реактора в выражении (3) вместо значения плотности потока нейтронов на реальной границе реактора используется значение плотности потока, среднее по граничной ячейке, поэтому выражение для логарифмической производной преобразуется к виду:

$$\gamma_{i,j}'' = \frac{\gamma_{i,j}'' D_{i,j}}{D_{i,j} + \gamma_{i,j}'' h/4} \quad (8)$$

где $\gamma_{i,j}''$ - логарифмическая производная потока нейтронов на внешней границе реактора в i -й группе для j -го направления в граничной ячейке. В качестве входных данных в JARFR задается массив величин $\gamma_{i,j}''$, определенных для (3), которые в ходе расчетов модифицируются согласно выражению (8). В (7) используется именно такое значение $\gamma_{i,j}''$.

2.2.3 Методы решения

Внутренние итерации

Уравнение диффузии нейтронов в каждой энергетической группе решается методом точечной верхней релаксации (SOR). Конечно-разностное групповое уравнение можно представить в упрощенной форме

$$-a_1\varphi_1 - a_2\varphi_2 - a_3\varphi_3 - a_4\varphi_4 - a_5\varphi_5 - a_6\varphi_6 - a_7\varphi_7 - a_8\varphi_8 + d_0\varphi_0 = q_0 \quad (9)$$

где опущены индекс энергетической группы и номер внешней итерации, величина φ_0 соответствуют значению $\varphi_{i,k}^{(n)}$, величина q_0 соответствуют значению $Q_{i,k}^{(n)}$, величина d_0 - значению, заключенному в (7) в фигурные скобки, величины a_1, \dots, a_6 - значениям $\frac{8}{Nh^2} \frac{D_{i,k} D_{i,lj}}{D_{i,k} + D_{i,lj}}$, а величины a_7, a_8 - значениям $\frac{2}{h_z^2} \frac{D_{i,k} D_{i,lj}}{D_{i,k} + D_{i,lj}}$. Таким образом, индексы перечисляют возможных «соседей» данной расчетной ячейки.

Расчетные формулы метода точечной верхней релаксации на k -той внутренней итерации (при решении уравнения (9) в каждой группе i) с учетом принятой в JARFR нумерации расчетных ячеек и принципом обхода узлов расчетной сетки в порядке возрастания номеров имеют следующий вид (пример для гексагональной геометрии):

$$\varphi_{i,o}^{(k)} = (1 - \omega_i) \varphi_{i,o}^{(k-1)} + \frac{\omega_i}{d_{i,o}} \{q_{i,0} + a_{i,1} \varphi_{i,1}^{(k)} + a_{i,2} \varphi_{i,2}^{(k)} + a_{i,3} \varphi_{i,3}^{(k)} + a_{i,4} \varphi_{i,4}^{(k-1)} + a_{i,5} \varphi_{i,5}^{(k)} + a_{i,6} \varphi_{i,6}^{(k-1)} + a_{i,7} \varphi_{i,7}^{(k)} + a_{i,8} \varphi_{i,8}^{(k-1)}\} \quad (10)$$

где ω_i - параметр, ускоряющий процесс внутренних итераций, причем $1 \leq \omega_i \leq 2$.

Расчет ускоряющих параметров проводится следующим образом:

$$\omega_i = \frac{2}{1 + \sqrt{1 - \mu_i^2}}; \text{ где } \mu_i^2 = \frac{\sum_{n=1}^N (\varphi_{i,n}^{(k)})^2}{\sum_{n=1}^N (\varphi_{i,n}^{(k-1)})^2} \quad (11)$$

где N - полное число узлов в расчетной схеме реактора.

При проведении расчетов ускоряющие параметры определяются с использованием основного алгоритма расчета при выполнении заданного числа итераций в каждой группе, или они могут быть явно заданы в исходных данных. Скорость сходимости метода SOR может быть дополнительно увеличена за счет применения метода прогнозируемого ускорения.

Критерием окончания внутренних итераций служит условие:

$$\left| \frac{\varphi_{i,j}^{(k)} - \varphi_{i,j}^{(k-1)}}{\varphi_{i,j}^{(k-1)}} \right| < \varepsilon_1 \quad (12)$$

где ε_1 - заданная точность расчета плотностей потоков нейтронов во внутренних итерациях.

Внешние итерации

Уравнения (1) и (2) решаются методом итерации источника, при этом на каждой итерации источник нормируется на единицу.

Если расчет источника деления в конце n -той итерации производится как

$$Q_f^{(n)}(\vec{r}) = \sum_{g'=1}^G v \Sigma_{g'}^f(\vec{r}) \varphi_{g'}^{(n-1)}(\vec{r})$$

а сама внешняя итерация начинается с нормированного на единицу источника деления, то в конце каждой внешней итерации эффективный коэффициент размножения может быть рассчитан как

$$k_{ef}^{(n)} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_{f_i}^{(n)})^2}$$

Для ускорения внешних итераций могут быть использованы методы двухслойной чебышевской экстраполяции или прогнозируемого ускорения.

Реализованы два критерия окончания итераций. Внешние итерации заканчиваются при выполнении следующих условий:

$$\left| k_{ef}^{(n)} - k_{ef}^{(n-1)} \right| < \varepsilon_2, \quad \left| \frac{q_i^{(n)} - q_i^{(n-1)}}{q_i^{(n-1)}} \right| < \varepsilon_3; \quad (13)$$

где n - номер внешней итерации;

ε_2 - заданная точность расчета k_{ef} ;

ε_3 - заданная точность расчета локальных значений полного источника нейтронов деления в каждом расчетном узле.

2.3 Расчет нейтронно-физических функционалов

2.3.1 Расчет скоростей реакций и энерговыделения

Расчет скоростей реакций деления $N_f(i,j)$ и захвата $N_c(i,j)$ для i -го элемента в j -м расчетном узле производится по следующим формулам:

$$\begin{aligned} N_f(i,j) &= \sum_{g=1}^{NG} \sigma_f(i,g,j) \varphi(i,g), \\ N_c(i,j) &= \sum_{g=1}^{NG} \sigma_c(i,g,j) \varphi(i,g), \end{aligned} \quad (14)$$

где $\sigma_f(i,g,j)$ и $\sigma_c(i,g,j)$ - соответственно микроскопические сечения деления и захвата для j -го элемента в g -й энергетической группе и i -м расчетном узле;

$\varphi(i,g)$ - плотность потока нейтронов в g -й энергетической группе и i -м расчетном узле;

NG - полное число энергетических групп.

В формулах (14) вместо микроскопических констант захвата и деления могут быть использованы макроскопические свойства i -го расчетного узла, и тогда будут рассчитываться скорости реакций для всего состава i -го расчетного узла.

Расчет пространственного распределения энерговыделения в JARFR проводится с привлечением данных по выходу энергии деления на каждый делящийся нуклид и выделению энергии при захвате нейтрона [6]. Энерговыделение в каждой расчетной ячейке определяется как:

$$Q = Q_f + Q_c \quad (15)$$

где Q_f - энерговыделение при делении (без учета энергии, уносимой антинейтрино, испускаемыми при β -распадах осколков и энергии β -распадов с периодами полураспада больше трех лет),

Q_c - энерговыделение при захвате нейтронов, вычисленное с учетом энергии β -распадов продуктов нейтронных реакций, обуславливающих захват (за вычетом энергии, уносимой нейтрино и антинейтрино).

При этом

$$Q_f = \sum_i \rho_i E_{f,i} \sum_{g=1}^{NG} \sigma_{f,i}^g \varphi_g, \quad (16)$$

где $E_{f,i}$ - эффективное энерговыделение при делении нуклида i .

$$Q_c = \sum_i \rho_i E_{c,i} \sum_{g=1}^{NG} \sigma_{c,i}^g \varphi_g, \quad (17)$$

где $E_{c,i}$ - эффективное энерговыделение при захвате нейтронов нуклидом i .

После расчета поля энерговыделения рассчитывается коэффициент нормировки плотности потока нейтронов по заданной тепловой мощности реактора. Рассчитываются доли энерговыделения в части ТВС, соответствующей активной зоне, торцевым экранам и боковой зоне воспроизводства, а также коэффициенты радиальной и объемной неравномерности поля энерговыделения.

Расчет коэффициента неравномерности энерговыделения по объему реактора или его части (V_j) производится по формуле:

$$KR_{V_j} = \frac{W_{\max}^{(V_j)} N_{V_j}}{\sum_{i \in V_j} W_i}, \quad (18)$$

где KR_{V_j} - коэффициент неравномерности энерговыделения в объеме V_j реактора;

W_i - энерговыделение в i -м расчетном узле реактора;

$W_{\max}^{(V_j)}$ - максимальное энерговыделение в объеме V_j ;

N_{V_j} - число расчетных узлов в объеме V_j .

Суммирование производится по всем значениям W , попадающим в объем V_j .

2.3.2 Расчет параметров воспроизводства топлива

Производится расчет коэффициента воспроизводства реактора KB_P , коэффициента воспроизводства активной зоны KB_A , бокового и торцевого экранов, $KB_{БЭ}$ и $KB_{ТЭ}$, а также полного коэффициента воспроизводства экранов $KB_{Э}$ по следующим формулам:

$$KB_A = \frac{\sum_{j \in N_{VOS}} \sum_{i \in V_{AZ}} N_c(i, j) \rho(i, j)}{\sum_{j \in N_{GOR}} \sum_{i \in V_{AZ}} N_{cf}(i, j) \rho(i, j)}, \quad (19)$$

$$KB_{БЭ} = \frac{\left\{ \sum_{j \in N_{VOS}} \sum_{i \in V_{ТЭ}} N_c(i, j) \rho(i, j) - \sum_{j \in N_{GOR}} \sum_{i \in V_{ТЭ}} N_{cf}(i, j) \rho(i, j) \right\}}{\sum_{j \in N_{GOR}} \sum_{i \in V_{AZ}} N_{cf}(i, j) \rho(i, j)}, \quad (20)$$

$$KB_{ТЭ} = \frac{\left\{ \sum_{j \in N_{VOS}} \sum_{i \in V_{ТЭ}} N_c(i, j) \rho(i, j) - \sum_{j \in N_{GOR}} \sum_{i \in V_{ТЭ}} N_{cf}(i, j) \rho(i, j) \right\}}{\sum_{j \in N_{GOR}} \sum_{i \in V_{AZ}} N_{cf}(i, j) \rho(i, j)}, \quad (21)$$

$$KB_{Э} = KB_{БЭ} + KB_{ТЭ} \quad (22)$$

$$KB_P = KB_A + KB_{Э} \quad (23)$$

В формулах приняты следующие обозначения:

$N_{cf}(i, j)$ - скорости реакций захвата и деления вместе в i -м расчетном узле для j -го элемента;

$\rho(i, j)$ - ядерная концентрация j -го элемента в i -м расчетном узле (ядер/см³)

$D(i, g)$ - коэффициент диффузии в i -м расчетном узле g -й энергетической группы;

V_{AZ} - объем активной зоны реактора;

$V_{БЭ}$ - объем бокового экрана;

$V_{ТЭ}$ - объем торцевого экрана;

N_{VOS} - номера элементов, воспроизводящих новое горючее (²³⁸U, ²⁴⁰Pu, ²⁴²Pu);

N_{GOR} - номера топливных элементов, не воспроизводящих новое горючее (например, ²³⁵U, ²³⁹Pu, ²⁴¹Pu).

Рассчитываются следующие параметры для зон реактора, где есть делящиеся изотопы:

- Относительная доля мощности, выделяемой в k -й физической зоне (под физической зоной понимается совокупность кассет одного состава) - ε_k :

$$\varepsilon_k = \frac{\sum_{j \in NDEL} N_f(k, j)}{\sum_{j \in NDEL} \sum_{k=1}^{NFZ} N_f(k, j)}, \quad (24)$$

где NDEL - все номера делящихся элементов в реакторе;

NFZ - число физических зон в реакторе, в которых есть делящиеся элементы;

$N_f(k, j)$ - интегральные по объему k -й физической зоны скорости реакций деления j -го элемента.

- Относительная доля процессов захвата нейтронов (с делением и без деления) не воспроизводящими новое горючее элементами (топливом) по отношению к полному числу захватов нейтронов с делением для k -й физической зоны - ξ_k :

$$\xi_k = \frac{\sum_{j \in NGOR} N_{cf}(k, j)}{\sum_{j \in NDEL} N_f(k, j)}, \quad (25)$$

- Величина, характеризующая относительную долю появления избыточного топлива для k -й физической зоны:

$$IKB_k = \frac{\sum_{j \in Nvos} N_c(k, j) - \sum_{j \in NGOR} N_{cf}(k, j)}{\sum_{j \in NDEL} \sum_{k=1}^{NFZ} N_f(k, j)}, \quad (26)$$

С помощью величин, определяемых формулами (24)-(26), могут быть получены все значения коэффициентов воспроизводства, определенные выше.

2.3.3 Расчет выгорания топлива, флюенса нейтронов и уровня радиационного повреждения конструкционных материалов

Рассматривается система дифференциальных уравнений, описывающих изменение изотопного состава топлива в общем виде:

$$\frac{\partial \rho(k,i)}{\partial t} = -\rho(k,i)(n_{cf}(k,i) + \lambda(i)) + \rho(k,i-1)n_c(k,i-1)WAYS(i-1) + \sum_{j \neq i} \lambda(j)\rho(k,j)WAYS(j) \quad (27)$$

где $\rho(k,i)$ - концентрация i -го изотопа для k -ой физической зоны;

$n_c(k,i)$, $n_{cf}(k,i)$ - средние значения для единицы объема k -й физической зоны и i -го делящегося изотопа соответственно скоростей процессов радиационного захвата и захвата вместе с делением, нормированных на заданную тепловую мощность реактора;

$\lambda(i)$ - постоянная распада i -го делящегося изотопа;

$WAYS(i)$ - выходы возможных реакций образования i -го изотопа. Для каждого изотопа массив $WAYS$ содержит четыре числа, которые принадлежат интервалу $[0, 100]$. Первое число отображает процентную вероятность образования данного изотопа при радиационном захвате, второе - вероятность образования при β^+ реакции, третье отвечает за β^- реакцию, а четвертое - за α -распад. Дополнительно, для отдельных изотопов может учитываться реакция $(n,2n)$.

Система дифференциальных уравнений (27) в JARFR решается методом Рунге-Кутты высокого порядка с автоматическим выбором шага интегрирования и заданием требуемой точности расчета концентраций.

При расчете выгорания топлива могут быть использованы различные цепочки ядерных превращений при расчете изменения изотопного состава топлива, что определяется в файле входных данных JARFR. Типичные цепочки ядерных превращений, используемые в практических расчетах реакторов типа БН, приведены на рисунке 2.1. Количество рассчитываемых цепочек накопления и превращения изотопов для реактора с урановым топливом может быть сокращено по сравнению с приведенными на рисунке 2.1. Правомочность упрощений была показана сравнением основных результатов расчетов (например, темпа изменения реактивности при выгорании) в случае использования цепочек, приведенных на рисунке 2.1 и сокращенных.

При расчете выгорания в JARFR используется один обобщенный осколок деления (для основного делящегося изотопа в топливной композиции). Значения нейтронных констант для обобщенных осколков деления различных изотопов были рассчитаны в ФЭИ при формировании

библиотеки БНАБ-93. В случае урановой активной зоны это обобщенный осколок деления изотопа ^{235}U , а при расчете активной зоны с МОКС-топливом используется обобщенный осколок деления изотопа ^{239}Pu . В случае постановки в активную зону с урановой загрузкой отдельной ТВС с плутонием для нее по умолчанию также будет использован обобщенный осколок деления изотопа ^{235}U . Погрешность, вносимая этим допущением, оценивается и корректируется дополнительными расчетами.

JARFR позволяет рассчитывать флюенс нейтронов в каждой расчетной ячейке и в физических зонах модели реактора за заданный интервал времени $[0, T]$:

$$\tilde{F} = \int_0^T \phi(t) dt \quad (28)$$

где $\phi(t)$ - значение полного потока нейтронов в момент времени t в данной ячейке или физической зоне,

и степень радиационного повреждения конструкционных материалов, вызванного смещением атомов в решетке - число смещений на атом (dpa), которое, в предположении о постоянстве на заданном интервале времени интенсивности и спектрального распределения потока, определяется формулой:

$$dpa = \tilde{F} \bar{\sigma}_d, \quad (29)$$

где $\bar{\sigma}_d$ - сечение смещения, усредненное по спектру нейтронов в физических зонах модели реактора.

При расчете уровня радиационных повреждений используются различные данные по сечениям смещения, например, адаптированная 100-групповая библиотека сечений смещения для железа [13], а также 26-групповые данные для различных элементов из [14]. Для сплавов групповые сечения смещения определяются с учетом парциальных вкладов каждого химического элемента в сплав и задаются в блоке расчета степени радиационного повреждения.

Расчет данных характеристик может производиться на каждом шаге по выгоранию.

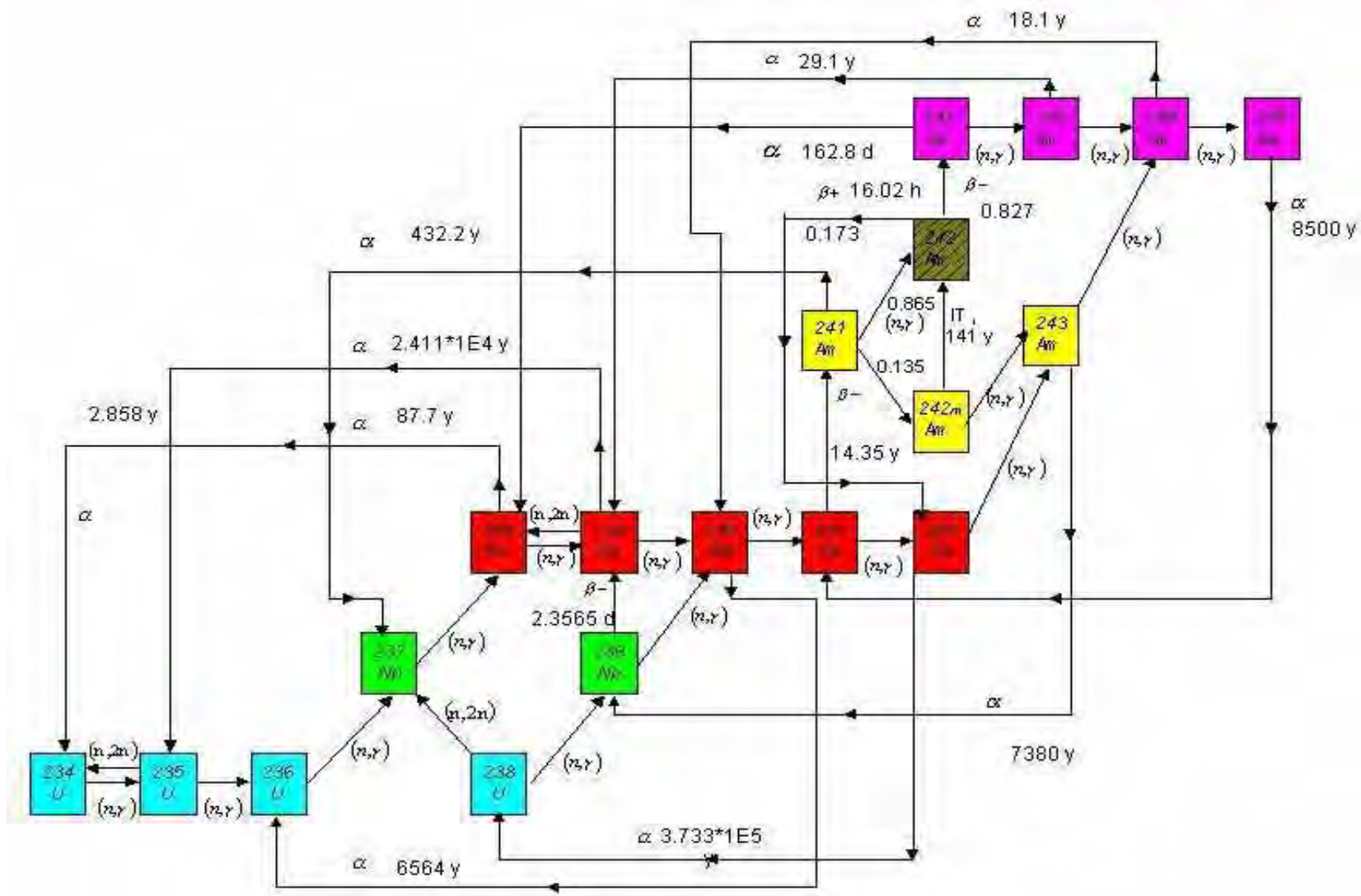


Рисунок 2.1 - Пример цепочек ядерных превращений для JARFR с константами БНАБ93

2.4 Методы и алгоритмы теории возмущений

2.4.1 Методы решения уравнения для ценности нейтронов

JARFR для решения уравнения для расчета пространственно-энергетического распределения ценности нейтронов применяются те же численные методы, что и для решения уравнений для плотности потока нейтронов.

Для расчета ценности нейтронов решается многогрупповое уравнение, сопряженное стационарному диффузионному уравнению (1):

$$-\nabla D_g \nabla \varphi_g^+ + \Sigma_{efd,g} \varphi_g^+ = Q_g^+ \quad (30)$$

$$Q_g^+ = \frac{1}{k_{ef}^+} \nu \Sigma_f^g \sum_{g'=1}^G \chi_{g'} \varphi_{g'}^+ + \sum_{g'=g+1}^G \Sigma_s^{g \rightarrow g'} \varphi_{g'}^+$$

Решение ищется с помощью метода итерации источника. Во внутренних итерациях используется метод точечной верхней релаксации (SOR).

Конечно-разностное групповое уравнение для k -го расчетного узла, решаемое блоком расчета ценности нейтронов, имеет вид:

$$\begin{aligned} & -\frac{8}{Nh^2} \sum_{j=1}^{N16} \frac{D_{i,k} D_{i,l_j}}{D_{i,k} + D_{i,l_j}} \varphi_{i,l_j}^{+(n)} - \frac{2}{h_z^2} \sum_{j=1}^{N1r} \frac{D_{i,k} D_{i,l_j}}{D_{i,k} + D_{i,l_j}} \varphi_{i,l_j}^{+(n)} + \\ & \varphi_{i,k}^{+(n)} \left\{ \frac{8}{Nh^2} \left(\sum_{j=1}^{N16} \frac{D_{i,k} D_{i,l_j}}{D_{i,k} + D_{i,l_j}} + \sum_{j=1}^{N26} D_{i,k} + \frac{h}{4} \sum_{j=1}^{N36} \gamma_{i,j} \right) + \right. \\ & \left. \frac{2}{h_z^2} \left(\sum_{j=1}^{N1r} \frac{D_{i,k} D_{i,l_j}}{D_{i,k} + D_{i,l_j}} + \sum_{j=1}^{N2r} D_{i,k} + \frac{h_z}{4} \sum_{j=1}^{N3r} \gamma_{i,j} \right) + \Sigma_{efd_{i,k}} \right\} = Q_{i,k}^{+(n)} \end{aligned} \quad (31)$$

$$Q_{i,k}^{+(n)} = \nu \Sigma_{f_{i,k}} \sum_{j=1}^{NG} \chi_j \varphi_{j,k}^{+(n-1)} + \sum_{j=i+1}^{NG} \Sigma_{in,k}^{i \rightarrow j} \varphi_{j,k}^{+(n-1)} + \Sigma_{z(e)k}^{i \rightarrow i+1} \varphi_{i+1,k}^{+(n-1)} \quad (32)$$

где все обозначения аналогичны приведенным для (7), кроме следующих:

$\varphi_{i,k}^{+(n)}$ - ценность нейтронов в i -й группе для k -го расчетного узла и n -й итерации;

$Q_{i,k}^{+(n)}$ - источник нейтронов для i -й группы, k -го расчетного узла в n -й итерации;

$\Sigma_{in,k}^{i \rightarrow j}$ - сечение неупругого рассеяния нейтронов из группы i в группу j для k -го расчетного узла;

$\Sigma_{z(e)k}^{i \rightarrow i+1}$ - сечение упругого замедления из группы i в группу $i+1$ для k -го расчетного узла;

2.4.2 Расчет параметров нейтронной кинетики реактора

Формулы расчета эффективной доли запаздывающих нейтронов и времени жизни мгновенных нейтронов основаны на стандартной процедуре, описанной, например, в [15].

В JARFR для расчета этих характеристик используются следующие формулы:

Эффективная доля запаздывающих нейтронов, $\beta_{\text{эфф}}$, рассчитывается так:

для A -го нуклида и i -й физической зоны:

$$\beta_{\text{эфф}}^{A,i} = \frac{1}{\text{CND}} \sum_{k \in NT_i} \left[\sum_{j=1}^{NG} \chi_{D,j}^A \varphi_{j,k}^+ \sum_{l=1}^{NG} \left(\frac{n}{F} \right)_l^A \Sigma_{f_{l,k}}^A \varphi_{l,k} \right], \quad (33)$$

$$\Sigma_{f_{l,k}}^A = \sigma_{f_{l,NT_i}}^A N_{NT_i}^A$$

$$\text{где } \text{CND} = \int_{V_k} Q_f(r) Q^+(r) dV = \sum_{k=1}^{K1} \left[\underbrace{\sum_{i=1}^{NG} \nu \Sigma_{f_{i,k}} \varphi_{i,k}}_{Q_{f_k}} \underbrace{\sum_{j=1}^{NG} \chi_j \varphi_{j,k}^+}_{Q_{f_k}^+} \right]$$

$K1$ – полное число расчетных ячеек

$\sigma_{f_{l,NT_i}}^A$ - микроскопическое сечение деления A -го нуклида в l -й энергетической группе и NT_i -й физической зоне;

$N_{NT_i}^A$ - ядерная концентрация A -го нуклида в NT_i -й физической зоне;

$\chi_{D,j}^A$ - доля запаздывающих нейтронов, попадающих в j -ю группу, для A -го нуклида;

$$\sum_{j=1}^{NG} \chi_{D,j}^A = 1$$

$\left(\frac{n}{F} \right)_j^A$ - среднее число запаздывающих нейтронов на одно деление для нуклида A в группе j .

Значения $\left(\frac{n}{F} \right)_j^A$ и $\chi_{D,j}^A$ для основных делящихся изотопов определены на основе

данных библиотеки БНАБ93.01а и задаются в виде начальных данных внутри блока расчета эффективной доли запаздывающих нейтронов. Следует отметить, что используются данные не для всех нуклидов, для которых есть информация по запаздывающим нейтронам в БНАБ93.01а, а только для тех, вклад которых в интегральные параметры кинетики реактора типа БН с уран-плутониевым топливом существенен. В частности, в этом расчетном блоке сейчас не учитываются данные для Fm, Th, Cm, Es.

Затем проводится расчет суммарной по всем физическим зонам эффективной доли запаздывающих нейтронов A -го нуклида:

$$\beta_{\text{эфф}}^A = \sum_{i=1}^{NT} \beta_{\text{эфф}}^{A,i}, \quad (34)$$

и эффективной доли запаздывающих нейтронов для всего реактора:

$$\beta_{\text{эфф}} = \sum_{A=1}^{NAD} \beta_{\text{эфф}}^A, \quad (35)$$

где NAD - полное число делящихся нуклидов в расчетной модели реактора.

Время жизни мгновенных нейтронов, l_p , рассчитывается по формуле:

$$l_p = \frac{1}{\text{CND}} \sum_{k=1}^{K1} \sum_{j=1}^{MG} \left(\frac{1}{v} \right)_j \varphi_{j,k} \varphi_{j,k}^+, \quad (36)$$

где обратная величина средней групповой скорости нейтронов $\left(\frac{1}{v} \right)_j$ в j -й группе

может быть взята непосредственно из файлов описания библиотеки БНАБ (основной вариант для 26-групповых расчетов), или расчетно определена (для 26-групповых и малогрупповых расчетов) двумя способами:

- на основе усреднения по спектру Ферми

$$\left(\frac{1}{v} \right)_j = 1.4455 \cdot 10^{-6} \frac{1/\sqrt{E_j} - 1/\sqrt{E_{j-1}}}{\Delta u_j}, \quad (37)$$

где Δu_j - групповой интервал летаргии для j -й энергетической группы,

E_j и E_{j-1} - соответственно нижняя и верхняя границы по энергиям (в эВ) для j -й

группы;

- с использованием усреднения по 26-групповому спектру нейтронов φ_i , рассчитанному в блоке подготовки констант для получения малогрупповых сечений:

$$\left(\frac{1}{v} \right)_j = \frac{\sum_{i \in j} \frac{6.825 \cdot 10^{-7} \sqrt{2}}{\sqrt{E_j + E_{j-1}}} \varphi_i}{\sum_{i \in j} \varphi_i} \quad (38)$$

где i - номера энергетических групп из 26-группового разбиения, попадающих в j -ю энергетическую группу малогруппового разбиения.

2.4.3 Формулы теории возмущений первого порядка

Вывод формул теории возмущений первого порядка для многогруппового диффузионного уравнения основан на стандартной процедуре, описанной, например, в [15].

В JARFR используются следующие формулы теории возмущений:

$$\Delta\rho = \frac{1}{K_{ef}} - \frac{1}{K'_{ef}} = \Delta\rho_v + \Delta\rho_{in} + \Delta\rho_{cfd} + \Delta\rho_D + \Delta\rho_{I-2D} \quad (39)$$

$$\begin{aligned} \Delta\rho_v &= \sum_{i=1}^{NT} \Delta\rho_v^{(i)}, \Delta\rho_v^{(i)} = \sum_{k \in NT_i} \Delta\rho_{vk}, \Delta\rho_{vk} = \frac{B1}{CND} \frac{Q_{fk}^+}{K_{ef}} \sum_{j=1}^{NG} \delta v \Sigma_{f,j,k} \varphi_{j,k} \\ \Delta\rho_{in} &= \sum_{i=1}^{NT} \Delta\rho_{in}^{(i)}, \Delta\rho_{in}^{(i)} = \sum_{k \in NT_i} \Delta\rho_{ink}, \Delta\rho_{ink} = \frac{B1}{CND} \sum_{j=1}^{NG} \sum_{g=j+1}^{NG} \delta \Sigma_{in_k}^{j \rightarrow g} \varphi_{j,k} \varphi_{g,k}^+ \\ \Delta\rho_{cfd} &= \sum_{i=1}^{NT} \Delta\rho_{cfd}^{(i)}, \Delta\rho_{cfd}^{(i)} = \sum_{k \in NT_i} \Delta\rho_{cfdk}, \Delta\rho_{cfdk} = -\frac{B1}{CND} \sum_{j=1}^{NG} \delta \Sigma_{cfd,j,k} \varphi_{j,k} \varphi_{j,k}^+ \end{aligned} \quad (40)$$

$$\Delta\rho_{I-2D} = \sum_{i=1}^{NT} \Delta\rho_{I-2D}^{(i)}, \quad \Delta\rho_{I-2D}^{(i)} = \sum_{k \in NT_i} \Delta\rho_{I-2Dk},$$

$$\Delta\rho_D = \sum_{i=1}^{NT} \Delta\rho_D^{(i)}, \quad \Delta\rho_D^{(i)} = \sum_{k \in NT_i} \Delta\rho_{Dk}$$

$$\Delta\rho_{I-2Dk} = \frac{B2}{CND} \sum_{j=1}^{NG} 3\delta \Sigma_{tr,j,k} \text{cappa}^2 D_{j,k}^2 \varphi_{j,k} \varphi_{j,k}^+ \quad (41)$$

$$\Delta\rho_{Dk} = \frac{B1}{CND} \sum_{j=1}^{NG} \left\{ 3\delta \Sigma_{tr,j,k} \left[\frac{8}{Nh^2} \left(\sum_{i=1}^{N1_{\square}} \left(\frac{D_{j,k} D_{j,l}}{D_{j,k} + D_{j,l}} \right)^2 (\varphi_{j,l} - \varphi_{j,k}) (\varphi_{j,l}^+ - \varphi_{j,k}^+) + \sum_{i=1}^{N2_{\square}} D_{j,k}^2 \varphi_{j,k} \varphi_{j,k}^+ + \right. \right. \right. \quad (42)$$

$$\left. \left. \left. \frac{h}{8} \sum_{i=1}^{N3_{\square}} \gamma_{j,i}^2 \varphi_{j,i} \varphi_{j,i}^+ \right) + \frac{2}{h_z^2} \left(\sum_{i=1}^{N1_{\square}} \left(\frac{D_{j,k} D_{j,l}}{D_{j,k} + D_{j,l}} \right)^2 (\varphi_{j,l} - \varphi_{j,k}) (\varphi_{j,l}^+ - \varphi_{j,k}^+) + \sum_{i=1}^{N2_{\square}} D_{j,k}^2 \varphi_{j,k} \varphi_{j,k}^+ + \frac{h_z}{8} \sum_{i=1}^{N3_{\square}} \gamma_{j,i}^2 \varphi_{j,i} \varphi_{j,i}^+ \right) \right] \right\}$$

Формула (41) используется только для двумерных расчетов с конечной высотой в вертикальном нерасчетном направлении (учет утечки нейтронов в нерасчетном направлении за счет конечности высоты реактора).

$$CND = \sum_{k=1}^{K1} \int_{V_k} Q_f(r) Q^+(r) dV = B1 \sum_{k=1}^{K1} \left[\underbrace{\sum_{i=1}^{NG} v \Sigma_{f,i,k} \varphi_{i,k}}_{Q_{fk}} \underbrace{\sum_{j=1}^{NG} \chi_j \varphi_{j,k}^+}_{Q_{fk}^+} \right] \quad (43)$$

В формулах (39)-(43) используются следующие обозначения:

NT - число физических зон в реакторе (зон разного состава);

NT_i - номер i-го состава;

k - индекс расчетного узла;
 $K1$ - полное число расчетных узлов;
 $\delta\Sigma$ - возмущение соответствующего сечения, ($\delta\Sigma = \Sigma' - \Sigma$);
 $сарра^2 = (\pi/H_{эф})^2$, где $H_{эф}$ - эффективная высота реактора.

Коэффициенты $B1$ и $B2$ принимают значения, приведенные в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Значения коэффициентов $B1$ и $B2$

| Коэффициент | Трехмерный расчет | Двумерный расчет $сарра^2=0$ | Двумерный расчет, конечная высота |
|-------------|-------------------|---------------------------------|---|
| $B1$ | 1 | $HRR^{(*)}$ | $HRR/2 + \sin(сарра \times HRR)/2сарра$ |
| $B2$ | 0 | 0 | $HRR/2 - \sin(сарра \times HRR)/2сарра$ |

*) HRR - высота реактора (в двумерных расчетах), на которую интегрируются формулы теории возмущений

При выводе формул (39)-(43) теории возмущений допускались следующие предположения:

- значения $\chi_i, сарра, \gamma_{i,j}$ не возмущаются;
- в конечных формулах $\varphi' = \varphi, D' = D$.

В качестве $\delta\Sigma$ можно использовать микроскопические сечения любого из присутствующих в расчетной схеме элементов, и тогда $\Delta\rho$ - это коэффициенты чувствительности к концентрациям для соответствующего элемента для плотности его 10^{24} ядер/см³; либо это могут быть сами значения макроскопических сечений, и тогда $\Delta\rho$ это - коэффициенты чувствительности эффективного коэффициента размножения к макросвойствам или размерам реактора. Выражение (41) имеет смысл только для двумерных расчетов с заданным (ненулевым) значением $сарра^2$ и высотой HRR (высота, на которую требуется проинтегрировать формулы теории возмущений).

Для возможности дальнейшей обработки результатов расчетов по формулам теории возмущений в JARFR рассчитываются и выводятся на печать ряд интегральных функционалов от функций плотности потока нейтронов и ценности нейтронов:

$$(F \times Q^+)_j^i = \frac{B1}{CND \times K_{eff}} \sum_{k \in I_i} \varphi_{j,k} Q_{f_k}^+$$

$$\begin{aligned}
(F \times Q^+)_j &= \sum_{i=1}^{NT} (F \times Q^+)_j^i \\
(F \times F^+)_{j,g} &= \frac{B1}{\text{CND}} \sum_{k \in V_i} \varphi_{j,k} \varphi_{g,k}^+ \\
(F \times F^+)_{j,g} &= \sum_{i=1}^{NT} (F \times F^+)_{j,g}^i \\
(DF \times DF^+)_j &= \frac{B1}{\text{CND}} \sum_{k \in V_i} \left\{ \left[\frac{8}{Nh^2} \left(\sum_{i=1}^{N1_{\square}} \left(\frac{D_{j,k} D_{j,li}}{D_{j,k} + D_{j,li}} \right)^2 (\varphi_{j,li} - \varphi_{j,k}) (\varphi_{j,li}^+ - \varphi_{j,k}^+) + \sum_{i=1}^{N2_{\square}} D_{j,k}^2 \varphi_{j,k} \varphi_{j,k}^+ + \right. \right. \right. \\
&\left. \left. \left. \frac{h}{8} \sum_{i=1}^{N3_{\square}} \gamma_{j,i}^2 \varphi_{j,k} \varphi_{j,k}^+ \right) + \frac{2}{h_z^2} \left(\sum_{i=1}^{N1_{\square}} \left(\frac{D_{j,k} D_{j,li}}{D_{j,k} + D_{j,li}} \right)^2 (\varphi_{j,li} - \varphi_{j,k}) (\varphi_{j,li}^+ - \varphi_{j,k}^+) + \sum_{i=1}^{N2_{\square}} D_{j,k}^2 \varphi_{j,k} \varphi_{j,k}^+ + \frac{h_z}{8} \sum_{i=1}^{N3_{\square}} \gamma_{j,i}^2 \varphi_{j,k} \varphi_{j,k}^+ \right) \right] \right\} \\
(DF \times DF^+)_j &= \sum_{i=1}^{NT} (DF \times DF^+)_j^i
\end{aligned} \tag{44}$$

Здесь j - индекс энергетической группы;

i - индекс физической зоны;

V_i - объем, занимаемой физической зоной с номером i.

2.4.4 Расчет билинейного эффективного коэффициента размножения

JARFR реализована возможность расчета значения билинейного K_{eff} на основе решений прямой и сопряженной диффузионной задачи:

$$\begin{aligned}
\left(L^+ - K_{is}^+ - \frac{1}{K_{eff}^+} K^+ \right) \vec{\phi}^+ &= 0 \\
\left(L - K_{is} - \frac{1}{K_{eff}} K \right) \vec{\phi} &= 0
\end{aligned} \tag{45}$$

Стандартная процедура умножения прямой задачи на сопряженное решение и интегрирования по фазовому пространству приводит к формуле для определения билинейного K_{eff} :

$$\begin{aligned}
\langle \vec{\phi}^+, (L - K_{is}) \vec{\phi} \rangle &= \frac{1}{K_{eff}} \langle \vec{\phi}^+, K_f \vec{\phi} \rangle \\
K_{eff} &= \frac{\langle \vec{\phi}^+, \hat{K}_f \vec{\phi} \rangle}{\langle \vec{\phi}^+, (\hat{L} - \hat{K}_{is}) \vec{\phi} \rangle} = \frac{\text{CND}}{\langle \vec{\phi}^+, (\hat{L} - \hat{K}_{is}) \vec{\phi} \rangle}
\end{aligned} \tag{46}$$

Конечно-разностные формулы для расчета билинейного K_{eff} , получаемые в итоге на основе (46), идентичны приведенным ранее формулам, используемым в расчетах по теории возмущений.

2.4.5 Формулы обобщенной теории возмущений

В задаче определения сопряженной функции в рамках обобщенной теории возмущений решается неоднородное уравнение с источником вида:

$$\hat{M}^+ \psi^+(\vec{r}, E) = q^+(\vec{r}, E) \quad (47)$$

где \hat{M}^+ - оператор, описывающий критическое состояние реактора;

$\psi^+(\vec{r}, E)$ - сопряженная функция в точке пространства \vec{r} для энергии E ;

$q^+(\vec{r}, E)$ - источник нейтронов.

Вид источника определяется видом изучаемого дробно-линейного функционала DLF, а также требованием ортогональности этого источника и функции плотности потока нейтронов:

$$\langle q^+, \phi \rangle = 0, \quad (48)$$

где угловые скобки означают интегрирование по всем переменным - пространству и энергиям.

В предположении о постоянстве микроскопических и макроскопических сечений по физическим зонам, неоднородный источник является кусочно-гладкой функцией и для j -й энергетической группы и k -го расчетного узла имеет вид:

$$q_{j,k}^+ = \frac{\sum_{g(n)} \sum_{n(n)} \sum_{A(n)} \gamma_{A(n)}^{n(n)} \rho_{A(n)}^{n(n)} \sigma_{aA(n)}^{n(n),g(n)} \delta_{k,n(n)}^{j,g(n)}}{N_a^n} - \frac{\sum_{g(d)} \sum_{n(d)} \sum_{A(d)} \gamma_{A(d)}^{n(d)} \rho_{A(d)}^{n(d)} \sigma_{bA(d)}^{n(d),g(d)} \delta_{k,n(d)}^{j,g(d)}}{N_a^d} \quad (49)$$

Сопряженная функция для неоднородной задачи с источником ищется методом итерации источника, конечно-разностное групповое уравнение решается методом точечной верхней релаксации.

Процесс решения описан в [16] и производится следующим образом:

- решается методом итерации источника уравнение

$$(\hat{L}^+ - \hat{K}_{is}^+) \psi_n^+ = \frac{1}{K_{eff}} \hat{K}_f^+ \psi_{n-1}^+ + q^+, \quad (50)$$

Где \hat{K}_{is}^+ - оператор замедления;

\hat{L}^+ - оператор переноса нейтронов;

\hat{K}_f^+ - оператор размножения;

n - номер внешней итерации.

В качестве начального приближения принимается $\psi_0^+ \equiv 0$. Итерационный процесс заканчивается при выполнении условия

$$\frac{\|\psi_n^+ - \psi_{n-1}^+\|}{\|\psi_n^+\|} \leq \varepsilon, \quad (51)$$

где ε - точность, задаваемая во входных данных.

После окончания итерационного процесса (например, на M-ой итерации) осуществляется ортогонализация решения следующим образом:

$$\tilde{\psi}^+ = \psi_M^+ - \eta \varphi^+ \quad (52)$$

где φ^+ - решение однородного сопряженного уравнения;

$\tilde{\psi}^+$ - окончательное решение неоднородного сопряженного уравнения;

η - коэффициент, определяемый формулой:

$$\eta = \frac{\langle \hat{K}_f^+ \psi_n^+, \hat{K}_f^+ \varphi \rangle}{\langle \hat{K}_f^+ \varphi^+, \hat{K}_f^+ \varphi \rangle} \quad (53)$$

После определения функции $\tilde{\psi}^+$ рассчитываются коэффициенты чувствительности дробно-линейных функционалов по формулам (57)-(59) без восстановления критичности. Могут быть рассчитаны коэффициенты чувствительности дробно-линейного функционала к изменениям концентраций (тогда $\Delta\Sigma = \sigma$) или коэффициенты чувствительности к изменениям размеров (тогда $\Delta\Sigma = \Sigma$). При этом предполагается, что возмущение размеров подобно для всех зон реактора. Последние коэффициенты чувствительности являются также коэффициентами чувствительности к возмущениям макроскопических сечений.

Прямой коэффициент чувствительности $KЧ_{пр}$ рассчитывается при определении коэффициентов чувствительности к изменениям концентраций только для тех элементов и тех физических зон, которые присутствуют в DLF, спектральный компонент $KЧ_{СП}$ - для всех элементов и зон.

На основе обобщенной теории возмущений рассчитываются коэффициенты чувствительности дробно-линейных функционалов типа отношения скоростей реакций к изменениям концентраций элементов либо размеров реактора. Такими дробно-линейными

функционалами могут быть коэффициент воспроизводства реактора или активной зоны, отношение энерговыделений в различных областях реактора, отношение чисел захватов, деления различных материалов в различных областях реактора и т.д.

В общем виде любой дробно-линейный функционал представляется как:

$$DLF = \frac{N_a^n}{N_b^d} = \frac{\sum_{n(n)A(n)} \gamma_{A(n)}^{n(n)} N_{a,A(n)}^{n(n)}}{\sum_{n(d)A(d)} \gamma_{A(d)}^{n(d)} N_{b,A(d)}^{n(d)}} = \frac{\sum_{n(n)A(n)} \left[\gamma_{A(n)}^{n(n)} \sum_{g(n)} \left(\rho_{A(n)}^{n(n)} \sigma_{aA(n)}^{n(n),g(n)} F_{g(n)}^{n(n)} \right) \right]}{\sum_{n(d)A(d)} \left[\gamma_{A(d)}^{n(d)} \sum_{g(n)} \left(\rho_{A(d)}^{n(d)} \sigma_{bA(d)}^{n(d),g(d)} F_{g(d)}^{n(d)} \right) \right]} \quad (54)$$

Здесь а и b - любой из трех видов сечения : захват без деления, деление, захват с делением;

n - индекс числителя,

d - индекс знаменателя;

n(n), n(d) - номера физических зон (соответственно для числителя и знаменателя), которые участвуют в образовании дробно-линейного функционала, список номеров зон для числителя и знаменателя может быть разным;

A(n), A(d) - номера элементов (соответственно для числителя и знаменателя), которые участвуют в образовании дробно-линейного функционала, эти списки также могут быть разными;

g(n), g(d) - номера энергетических групп (соответственно для числителя и знаменателя), по которым производится суммирование, для числителя и знаменателя эти списки также могут быть разными;

$\rho_{A(n)}^{n(n)}$ - концентрация элемента A(n) в зоне n(n);

$\sigma_{aA(n)}^{n(n),g(n)}$ - микроскопическое сечение вида "a" для A(n)-го элемента в g(n)-й энергетической группе и n(n)-й зоне;

$\gamma_{A(n)}^{n(n)}$ - весовой фактор для для A(n)-го элемента в n(n)-й зоне. В качестве весового фактора могут быть использованы различные величины - всевозможные стоимостные коэффициенты, коэффициенты чувствительности и т.д.;

$F_{g(n)}^{n(n)}$ - интегральная плотность потока нейтронов в g(n)-й энергетической группе и n(n)-й зоне;

$$F_{g(n)}^{n(n)} = \int_{V_{n(n)}} \varphi_{g(n)}(r) d\vec{V} \quad (55)$$

где $\varphi_{g(n)}(\vec{r})$ - плотность потока нейтронов в точке \vec{r} для $g(n)$ -й энергетической группы;

$V_{n(n)}$ - объем $n(n)$ -й зоны.

Уравнение для определения относительного изменения дробно-линейного функционала состоит из двух слагаемых:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta(DLF)}{DLF} = & \frac{\frac{(N_a^n)' - N_a^n}{(N_b^d)' - N_b^d}}{\frac{N_a^n}{N_b^d}} = \frac{N_b^d}{(N_b^d)'} \left\{ \sum_{n(n)} \sum_{A(n)} \sum_{g(n)} \frac{(F_{g(n)}^{n(n)})'}{N_a^n} \left[(\rho_{A(n)}^{n(n)} \sigma_{a,A(n)}^{n(n),g(n)})' - (\rho_{A(n)}^{n(n)} \sigma_{a,A(n)}^{n(n),g(n)}) \right] - \right. \\ & \left. \sum_{n(d)} \sum_{A(d)} \sum_{g(d)} \frac{(F_{g(d)}^{n(d)})'}{N_b^d} \left[(\rho_{A(d)}^{n(d)} \sigma_{b,A(d)}^{n(d),g(d)})' - (\rho_{A(d)}^{n(d)} \sigma_{b,A(d)}^{n(d),g(d)}) \right] \right\} + \frac{N_b^d}{(N_b^d)'} \left\{ \sum_{n(n)} \sum_{A(n)} \sum_{g(n)} \frac{(F_{g(n)}^{n(n)})'}{N_a^n} \rho_{A(n)}^{n(n)} \sigma_{a,A(n)}^{n(n),g(n)} - \right. \\ & \left. \sum_{n(d)} \sum_{A(d)} \sum_{g(d)} \frac{(F_{g(d)}^{n(d)})'}{N_b^d} \rho_{A(d)}^{n(d)} \sigma_{b,A(d)}^{n(d),g(d)} \right\} \end{aligned} \quad (56)$$

где штрихи обозначают соответствующие возмущенные компоненты.

Первый член (прямая составляющая) зависит от разности возмущенных и невозмущенных параметров, величина второго члена (спектральной составляющей) зависит от того, насколько изменился поток нейтронов, и при $F' \equiv F$ второй член обращается в нуль.

Разностные формулы первого члена получаются элементарно, а для получения разностных формул для второго члена используется стандартная процедура, аналогичная процедурам, используемым при выводе формул теории возмущений первого порядка. В итоге формулы, используемые в программе JAR для определения коэффициента чувствительности дробно-линейного функционала, имеют следующий вид:

$$KЧ_{DLF} = \frac{\Delta(DLF)}{DLF} = KЧ_{\text{он}} + KЧ_{\text{пп}}; \quad (57)$$

$$\begin{aligned} KЧ_{\text{он}} = & B1 \sum_k \sum_g \left\{ \Delta v \sum_{f_{g,k}} \varphi_{g,k} \sum_j \chi_j \psi_{j,k}^+ + \sum_{j=g+1}^{NG} \Delta \Sigma_{in_k}^{g \rightarrow j} \varphi_{g,k} \psi_{j,k}^+ - \Delta \Sigma_{cf_{g,k}} \varphi_{g,k} \psi_{j,k}^+ + \right. \\ & \left. 3 \Delta \Sigma_{tr_{g,k}} \left[\frac{8}{Nh^2} \left(\sum_{i=1}^{N1\ddagger} \left(\frac{D_{g,k} D_{g,lj}}{D_{g,k} + D_{g,li}} \right)^2 (\varphi_{g,li} - \varphi_{g,k}) (\psi_{g,li}^+ - \psi_{g,k}^+) + \sum_{i=1}^{N2\ddagger} D_{g,k}^2 \varphi_{g,k} \psi_{g,k}^+ + \frac{h}{8} \sum_{i=1}^{N3\ddagger} \gamma_{g,i}^2 \varphi_{g,k} \psi_{g,k}^+ \right) + \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{2}{h_z^2} \left(\sum_{i=1}^{N1\Box} \left(\frac{D_{g,k} D_{g,lj}}{D_{g,k} + D_{g,li}} \right)^2 (\varphi_{g,li} - \varphi_{g,k}) (\psi_{g,li}^+ - \psi_{g,k}^+) + \sum_{i=1}^{N2\Box} D_{g,k}^2 \varphi_{g,k} \psi_{g,k}^+ + \frac{h_z}{8} \sum_{i=1}^{N3\Box} \gamma_{g,i}^2 \varphi_{g,k} \psi_{g,k}^+ \right) \right] \right\} + \quad (58) \\ & B2 \sum_k \sum_g 3 \Delta \Sigma_{tr_{g,k}} \text{сара}^2 D_{g,k}^2 \varphi_{g,k} \psi_{g,k}^+ \end{aligned}$$

$$KЧ_{пр} = B3 \sum_k \sum_j \left(\frac{\sum_{A(n)} \gamma_{A(n)}^{n(n)} \Delta(\rho_{A(n)}^{n(n)} \sigma_{a A(n)}^{n(n),g(n)}) \delta_{k,n(n)}^{j,g(n)}}{N_a^n} - \frac{\sum_{A(d)} \gamma_{A(d)}^{n(d)} \Delta(\rho_{A(d)}^{n(d)} \sigma_{b A(d)}^{n(d),g(d)}) \delta_{k,n(d)}^{j,g(d)}}{N_b^d} \right) \varphi_{j,k} \quad (59)$$

В формулах (57)-(59) приняты следующие обозначения:

$KЧ_{DLF}$ - коэффициент чувствительности дробно-линейного функционала;

$KЧ_{сп}$ - спектральная составляющая коэффициента чувствительности;

$KЧ_{пр}$ - прямая составляющая коэффициента чувствительности;

χ_g , $\nu \Sigma_{f,g,k}$, $\Sigma_{cfd,g,k}$, $\Sigma_{tr,g,k}$, $D_{g,k}$, $\Sigma_{in_k}^{g \rightarrow j}$ - соответственно доля спектра,

макроскопические сечения размножения, увода и транспортное, коэффициент диффузии для g-й группы и k-го расчетного узла и сечение неупругих переводов нейтронов из группы g в группу j для k-го расчетного узла;

$\varphi_{g,k}$ - плотность потока нейтронов в g-й группе и k-м расчетном узла;

$\psi_{g,k}^+$ - сопряженная функция для неоднородной задачи с источником для g-й группы и

K-го расчетного узла;

$sarra^2$ - геометрический параметр.

Последний член выражения (58) имеет смысл только для двумерных расчетов конечной высоты H, и тогда

$$sarra^2 = \left(\frac{\pi}{H_{eff}} \right)^2 = \left(\frac{\pi}{(H + 2\delta)} \right)^2, \quad (60)$$

H_{eff} - эффективная высота реактора;

h - расчетный шаг в плоскости;

h_z - расчетный шаг по высоте;

$N1b$ и $N1t$ - соответственно число внутренних боковых (б) и торцевых (т) граней расчетной ячейки;

$N2b$ и $N2t$ - соответственно число боковых (б) и торцевых (т) граней, находящихся на внешней границе расчетной ячейки, где задаются граничные условия "0" потока нейтронов.

$N3b$ и $N3t$ - соответственно число боковых (б) и торцевых (т) граней, находящихся на внешней границе расчетной ячейки, где задаются граничные условия с логарифмической производной;

$N=6,4,3$ соответственно для шестигранной, квадратной или треугольной расчетной ячейки;

NG - полное число энергетических групп;

$$d_{k,n(n)}^{j,g(n)} = \begin{cases} 1 - \text{если } j \text{ входит в список } g(n) \text{ и } k \text{ входит в список } n(n), \\ 0 - \text{в противном случае} \end{cases} \quad (61)$$

Коэффициенты B1, B2 и B3 принимают для различных размерностей расчета и разных геометрий значения, представленные в таблице 2.2.

Таблица 2.2 - Значения коэффициентов B1, B2, B3

| коэф- фициент | геометрия ячейки | трехмерный расчет | двумерный расчет, $cappa^2=0$ | двумерный расчет, конечная высота |
|------------------|---|----------------------|----------------------------------|--|
| B1 |  | $\sqrt{3}h^2h_z/2$ | $\sqrt{3}h^2HRR/2$ | $\sqrt{3}h^2/2(HRR/2+\sin(cappa \cdot HRR))/2cappa$ |
| |  | h^2h_z | h^2HRR | $h^2(HRR/2+\sin(cappa \cdot HRR))/2cappa$ |
| |  | $3\sqrt{3}h^2h_z/4$ | $3\sqrt{3}h^2HRR/4$ | $3\sqrt{3}h^2/4(HRR/2+\sin(cappa \cdot HRR))/2cappa$ |
| B2 |  | 0 | 0 | $\sqrt{3}h^2/2(HRR/2-\sin(cappa \cdot HRR))/2cappa$ |
| |  | 0 | 0 | $h^2(HRR/2-\sin(cappa \cdot HRR))/2cappa$ |
| |  | 0 | 0 | $3\sqrt{3}h^2/4(HRR/2-\sin(cappa \cdot HRR))/2cappa$ |
| B3 |  | $\sqrt{3}h^2h_z/2$ | $\sqrt{3}h^2HRR/2$ | $\sqrt{3}h^2/cappa \cdot \sin(cappa \cdot HRR/2)$ |
| |  | h^2h_z | h^2HRR | $2h^2/cappa \cdot \sin(cappa \cdot HRR/2)$ |
| |  | $3\sqrt{3}h^2h_z/4$ | $3\sqrt{3}h^2HRR/4$ | $3\sqrt{3}h^2/2cappa \cdot \sin(cappa \cdot HRR/2)$ |

Спектральная часть коэффициента чувствительности полностью совпадает с формулами теории возмущений первого порядка при ценности нейтронов деления ЦНД=1.

Расчет по модулям обобщенной теории возмущений производится для каждого дробно-линейного функционала в порядке их задания во входных данных. Для каждого дробно-линейного функционала могут рассчитываться групповые интегральные по объему физических зон значения:

$$B1(\varphi, Q^+), B1(\varphi, \varphi^+), B1(D\nabla \varphi, D\nabla \varphi^+),$$

а затем - коэффициенты чувствительности дробно-линейного функционала - сначала для изменения концентрации, затем - для изменения размеров (коэффициенты чувствительности от макросвойств).

2.5 Усовершенствованные методики решения системы диффузионных уравнений

2.5.1 Модифицированная крупносеточная методика Аскью-Такеды

В гексагональной и квадратной геометрии для аппроксимации пространственного зависимости плотности потока и ценности нейтронов возможно использование модифицированной крупносеточной методики Аскью-Такеды (с изменяемым размером вспомогательной подобласти [17]), уточненно учитывающей перетечки нейтронов между расчетными областями как в плоскости, так и по высоте.

Суть этого метода заключается в том, что когда в процессе решения конечно-разностного уравнения с заданной степенью точности найдены значения k_{ef} и плотности потока нейтронов, происходит формальная поправка макросечений физических зон и средних значений плотности потока нейтронов в них [18, 19].

Рассмотрим далее формализм этой нодальной схемы на примере трехмерной гексагональной геометрии. На рисунке 2.2 показаны две соседние расчетные ячейки.

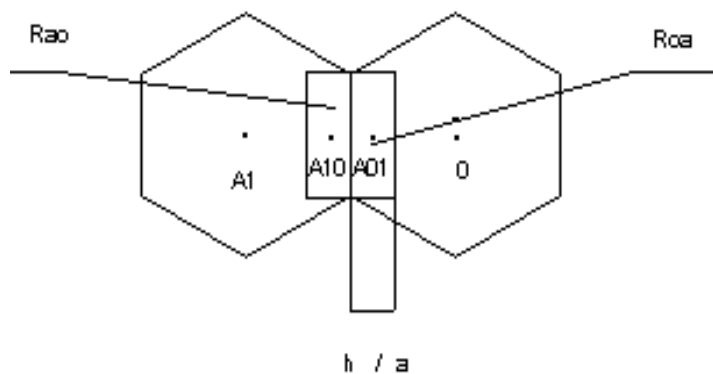


Рисунок 2.2 - Расположение вспомогательных узлов и подобластей в гексагональной геометрии

В приближении используемого метода утечка из расчетной ячейки через j -ю грань определяется выражением:

$$J_j^g = 2 \frac{D_o^g D_{a1}^g}{D_o^g + D_{a1}^g} \frac{\Phi_{a01}^g - \Phi_{a10}^g}{h/a} S_j, \quad (62)$$

где h – шаг расчетной ячейки в плане, a - произвольное положительное число, причем при $a=3$ реализуется традиционный метод Askew. Значения плотности потока нейтронов во

вспомогательных точках исключаются из расчета при помощи вспомогательного уравнения по подобласти Roa (и аналогичного по другой подобласти):

$$D_o^g \frac{2}{a-1} (\Phi_o^g - \Phi_{a01}^g) + 2 \frac{D_o^g D_{a1}^g}{D_o^g + D_{a1}^g} (\Phi_{a10}^g - \Phi_{a01}^g) + X_o^g \Phi_{a01}^g D_o^g = 0, \quad (63)$$

$$\text{где } X_o^g = \frac{h^2}{a^2 D_o^g} \left(\frac{\chi^g}{k_{eff}^{g'=1}} \sum_f \nu \sum_f \frac{\Phi_o^{g'}}{\Phi_o^g} + \sum_{g'=1}^{g-1} \sum_{g' \rightarrow g} \frac{\Phi_o^{g'}}{\Phi_o^g} - \Sigma_{ad}^g \right)$$

При аппроксимации утечки по высоте с неравномерным шагом выражение для нее выглядит как

$$\frac{2D_o^g D_{a1}^g (\Phi_{a10}^g - \Phi_{a01}^g)}{D_o^g \frac{h_{za1}}{h_{zo}} + D_{a1}^g} + \frac{2}{\tau-1} D_o^g (\Phi_o^g - \Phi_{a01}^g) + X_{zo}^g \Phi_{a01}^g D_o^g = 0, \quad (64)$$

где τ - параметр, характеризующий размер подобласти по третьему измерению (аналог параметра a в плане).

$$\text{Вводя обозначения (индекс группы опущен)} \quad D^* = D \frac{(2/(a-1)-X)}{(2/(a-1)-X/a)},$$

$$\Sigma^* = \Sigma(2/(a-1)-X), \quad \Phi^* = \frac{\Phi}{2/(a-1)-X}, \quad \Phi_z^* = \frac{\Phi}{2/(\tau-1)-X}, \quad D_z^* = D \frac{(2/(\tau-1)-X)}{(2/(\tau-1)-X/\tau)}, \quad \gamma = \Phi_z^* / \Phi^*,$$

$$\alpha = D_z^* / D^*$$

приходим к уравнению, аналогичному (7):

$$\frac{2}{a-1} \frac{A}{h^2} \sum_{i=1}^{N1} \frac{D_o^* D_{ai}^* (\Phi_o^* - \Phi_{ai}^*)}{D_o^* + D_{ai}^*} + \frac{2}{\tau-1} \frac{2}{h_{zo}} \sum_{j=1}^2 \frac{D_o^* \alpha_o D_{aj}^* \alpha_{aj} (\Phi_o^* \gamma_o - \Phi_{aj}^* \gamma_{aj})}{D_o^* \alpha_o h_{zaj} + D_{aj}^* \alpha_{aj} h_{zo}} + \Sigma_{ad}^* \Phi_o^* = Q \quad (65)$$

где $A=2$ для прямоугольной и $A=4/3$ для гексагональной геометрии. Коэффициенты α и γ учитывают отличие факторов коррекции по вертикали от факторов коррекции в плане. Это уравнение является аналогом обычного конечно-разностного уравнения диффузии, но с модифицированными коэффициентами, и решается по той же схеме. Другими словами, при расчётах с нодальной методикой решение уравнения диффузии проводится с использованием тех же итерационных схем, что и решение в конечно-разностном приближении.

В приведенных формулах разностной схемы коэффициенты учитывают поправку на ход плотности потока внутри расчетной ячейки. Значения этих поправок могут быть использованы для восстановления локальных полей в расчётной ячейке [20].

В частности, из совместного решения системы уравнений вида (63) для подобластей R_{ao} и R_{oa} следует выражение для значения плотности потока нейтронов в центре подобласти:

$$\Phi_{ao1} = \frac{2}{a-1} \left[\frac{(D_o + D_{a1})\Phi_o \left(\frac{2}{a-1} - X_{a1} \right) + 2(D_{a1}\Phi_{a1} + D_o\Phi_o)}{(D_o + D_{a1}) \left(\frac{2}{a-1} - X_o \right) \left(\frac{2}{a-1} - X_{a1} \right) + 2 \left(D_{a1} \left(\frac{2}{a-1} - X_{a1} \right) + D_o \left(\frac{2}{a-1} - X_o \right) \right)} \right] \quad (66)$$

Путём линейной интерполяции в горизонтальном сечении с использованием условия неразрывности тока нейтронов на границе расчётных ячеек определяются значения плотности потока нейтронов в центрах граней расчётной ячейки, а затем и в угловых точках ячейки (см. рисунок 2.3).

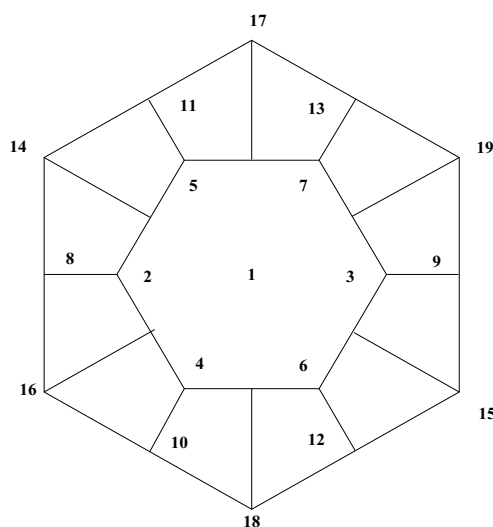


Рисунок 2.3 - Нумерация позиций по сечению гексагональной ячейки для восстановления локальных полей на основе расчета с использованием нодального метода (19-ти точечный шаблон)

В качестве альтернативного варианта может быть рассмотрено использование 25-ти точечного шаблона, представленного на рисунке 2.4.

В случае вычисления плотности потока в промежуточных точках по высоте необходимо учитывать разные размеры расчётных ячеек по вертикали:

$$\Phi_{ao1} = \frac{2}{\tau-1} \left[\frac{(D_o h_{z_{a1}} + D_{a1} h_{z_0})\Phi_o \left(\frac{2}{\tau-1} - X_{a1} \right) + 2(D_{a1}\Phi_{a1} h_{z_0} + D_o\Phi_o h_{z_{a1}})}{(D_o h_{z_{a1}} + D_{a1} h_{z_0}) \left(\frac{2}{\tau-1} - X_o \right) \left(\frac{2}{\tau-1} - X_{a1} \right) + 2 \left(D_{a1} h_{z_0} \left(\frac{2}{\tau-1} - X_{a1} \right) + D_o h_{z_{a1}} \left(\frac{2}{\tau-1} - X_o \right) \right)} \right] \quad (67)$$

В этом случае для двух приграничных подобластей совместно решалась система уравнений вида (64).

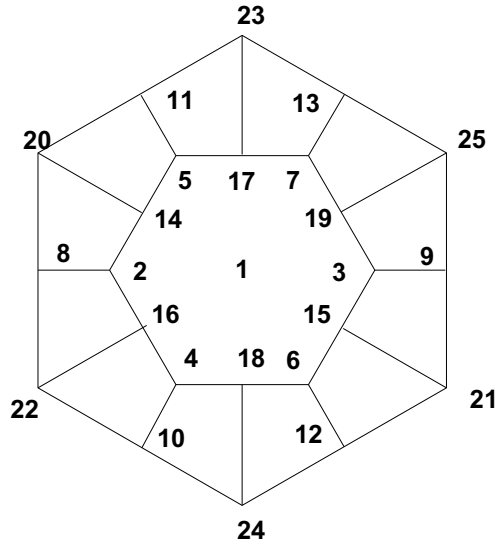


Рисунок 2.4 - Нумерация позиций по сечению гексагональной ячейки для восстановления локальных полей на основе расчета с использованием нодального метода (25-ти точечный шаблон).

Основная идея подхода заключается в том, чтобы использовать условие неразрывности тока нейтронов для определения значений плотности потока нейтронов в точках, расположенных на диагоналях расчетной ячейки. С учетом того, что внутри ячейки коэффициенты диффузии постоянны, формула соотношения неразрывности превращается в формулу усреднения значений плотности потока в центрах двух соседних подобластей, поэтому значения плотности потока нейтронов на диагоналях определяются по формуле:

$$\Phi_k = \frac{\Phi_i + \Phi_j}{2}, \text{ где } i \text{ и } j, \text{ номера центров соседних подобластей.}$$

Затем, записывая уравнение неразрывности для тока нейтронов:

$$\frac{\Phi_1 - \Phi_k}{(a-1) \cdot \sqrt{3} / (4a)} = \frac{\Phi_k - \Phi_{corner}}{(a+3) / (4a\sqrt{3})}$$

и, считая, что точка на диагонали является точкой «сшивки», получаем значение плотности потока нейтронов в угловой точке ячейки:

$$\Phi_{corner} = \frac{4a \cdot \Phi_k - (a+3)\Phi_1}{3(a-1)}$$

Затем, зная распределение плотности потока нейтронов внутри расчетной ячейки, можно рассчитать локальные коэффициенты неравномерности энерговыделения.

В настоящей версии JARFR оценка локальных коэффициентов неравномерности производится как по радиусу, так и по высоте расчетной ячейки. Следует отметить, что

применение аксиального восстановления полей энерговыделения является актуальным тогда, когда применяются шаги расчета по высоте порядка 10 или 20 см. При шагах порядка 2-3 см использование аксиального восстановления теряет смысл, поскольку при такой величине шага точности нодального метода и метода конечных разностей практически одинаковы.

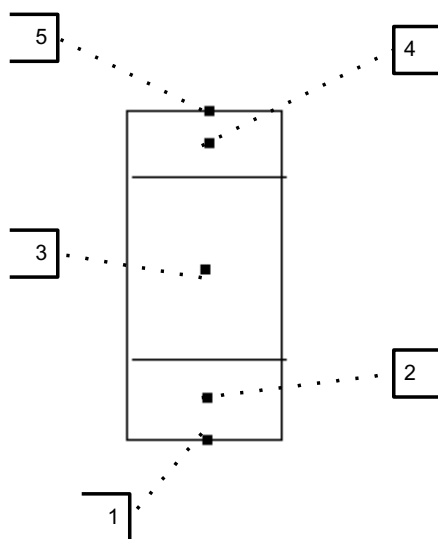


Рисунок 2.5 - Точки, в которых восстанавливается плотность потока нейтронов по высоте расчетной ячейки

Итоговая оценка коэффициента неравномерности по исходной расчетной ячейке производится по формуле:

$$K = K_r \times K_z$$

2.5.2 Реализация эффективной разностной схемы IIS в JARFR

Основы формализма

Разработанный в [21, 22] и реализованный (в настоящее время в тестовом режиме) в JARFR алгоритм эффективной разностной схемы IIS основан на характерном для нодальных методов подходе, когда в численную схему включается дополнительный набор неизвестных - односторонние поверхностные токи нейтронов, что позволяет корректно описать пространственное распределение функции плотности потока нейтронов в пределах расчетной ячейки и градиенты этой функции на гранях ячейки [23]. При этом схема IIS отличается тем, что вместо суммы полиномов по каждой из осей плотность потока нейтронов аппроксимируется рядом Тейлора как функция от трех переменных (в трехмерной геометрии) до членов со вторыми производными включительно, а баланс скоростей реакций записывается в виде одного уравнения, проинтегрированного по всему объему расчетной

ячейки, что позволяет легко и с достаточно высокой точностью определить среднеинтегральное по ячейке значение плотности потока нейтронов.

Представим кратко подход, используемый при выводе конечно-разностных уравнений схемы ПС на сетках с квадратными и гексагональными расчетными ячейками в применении к многогрупповому уравнению диффузии (пространственная зависимость опущена, обозначения общепринятые):

$$\begin{aligned} \nabla J_g + \Sigma_{cfd,g} \varphi_g &= \frac{1}{k_{eff}} \sum_{g'=1}^G \chi_g v \Sigma_{g'}^f \varphi_{g'} + \sum_{g' \neq g}^G \Sigma_{gg'}^s \varphi_{g'}, \\ J_g &= -D_g \nabla \varphi_g \end{aligned} \quad (68)$$

После ряда преобразований систему одногрупповых уравнений в векторно-матричном виде можно записать как

$$\begin{cases} \hat{H}_g \vec{J}_g + \hat{\Sigma}_g \vec{\varphi}_g = \vec{Q}_g \\ \hat{G}_g \vec{J}_g = \hat{F} \vec{\varphi}_g \end{cases} \quad (69)$$

Далее, систему многогрупповых диффузионных уравнений модифицированного алгоритма можно представить в виде:

$$\begin{cases} \hat{H} \vec{J} + (\hat{\Sigma} - \hat{K}_s) \vec{\varphi} = \frac{1}{k_{ef}} \hat{K}_f \vec{\varphi} \\ \hat{G} \vec{J} = \hat{F} \vec{\varphi} \end{cases} \quad (70)$$

Первое уравнение системы (70) отражает баланс скоростей реакций, второе - связь вектора односторонних поверхностных токов нейтронов, \vec{J} , с вектором средних по ячейкам плотностей потока нейтронов. Размерность вектора \vec{J} определяется произведением числа групп нейтронов на число расчетных ячеек сетки и число сторон расчетных ячеек. Направление компонент вектора \vec{J} на каждой грани расчетной ячейки совпадает с направлением нормали. Сначала рассчитываются односторонние токи нейтронов, по ним определяется вектор средних плотностей потока. Далее, вектор $\vec{\varphi}$ используется на следующей внешней итерации для пересчета источника нейтронов. Связь токов и потоков нейтронов выражается по закону Фика.

Для сеток с гексагональными в плане ячейками используется следующая пространственная аппроксимация по каждой из осей симметрии:

$$\varphi_g^k(x_i, z) = \varphi_{g,0}^k + a_{gx_i}^k x_i + c_{gx_i}^k \frac{x_i^2}{2} + a_{gz}^k z + c_{gz}^k \frac{z^2}{2},$$

где $i = 1, 2, 3$ – оси симметрии гексагональной ячейки в плане.

Среднее по гексагональной призме значение плотности потока нейтронов определяется, как:

$$\bar{\varphi}_g^k = \frac{\int_{-hz/2}^{hz/2} \varphi_{g,0,x,y}^k(z) dz}{h_z} = \varphi_{g,0}^k + \frac{h^2}{72} c_{g,x_i}^k + \frac{h_z^2}{24} c_{g,z}^k,$$

где $\varphi_{g,0,x,y}^k(z)$ - усредненное по плоскости (x, y) значение плотности потока нейтронов:

$$\varphi_{g,0,x,y}^k(z) = \frac{\sum_{i=1}^3 \frac{h\sqrt{3}}{6} \int_{-h/2}^{h/2} \varphi_g^k(x_i, z) dx_i}{S_k} = \varphi_{g,0}^k + \frac{h^2}{72} c_{g,x_i}^k + c_{g,z}^k \frac{z^2}{2}$$

Коэффициенты a_{g,x_i}^k , и c_{g,x_i}^k , определяются разностными выражениями:

$$\begin{cases} a_{g,x_i}^k = \frac{\varphi_{g,x_i+}^k - \varphi_{g,x_i-}^k}{h_i} \\ c_{g,x_i}^k = \frac{\varphi_{g,x_i+}^k + \varphi_{g,x_i-}^k - 2\varphi_{g,0}^k}{(h_i/2)^2} \end{cases}$$

Здесь за x_i+ , x_i- обозначены точки на оси i, находящиеся на расстояниях $+h/2$, $-h/2$ от центра расчетной ячейки (в центрах граней расчетной ячейки), h , h_z - шаги расчетной ячейки, точка (0, 0) лежит в центре ячейки.

Для каждой грани расчетной ячейки получается связь между односторонними токами, входящими в ячейку и выходящими из нее в точках пересечения координатных осей с гранями, и значением плотности потока нейтронов в центре ячейки:

$$\begin{cases} J_{gx+}^{out,k} = J_{gx+}^{in,k} b_g^k - J_{gx-}^{in,k} e_g^k + \varphi_{g,0}^k f_g^k \\ J_{gx-}^{out,k} = J_{gx-}^{in,k} b_g^k - J_{gx+}^{in,k} e_g^k + \varphi_{g,0}^k f_g^k \end{cases}$$

здесь $J_g^{out,k}$ и $J_g^{in,k}$ - односторонние выходящие и входящие токи для k-той ячейки.

Коэффициенты b_g^k , e_g^k и f_g^k определяются выражениями:

$$b_g^k = \frac{h^2 - 32(D_g^k)^2}{h^2 + 32D_g^{k2} + 12D_g^k h}; \quad e_g^k = \frac{4D_g^k h}{h^2 + 32D_g^{k2} + 12D_g^k h}; \quad f_g^k = \frac{16(D_g^k)^2 + 4D_g^k h}{h^2 + 32D_g^{k2} + 12D_g^k h},$$

Аналогично определяются коэффициенты b_{zg}^k , e_{zg}^k и f_{zg}^k с заменой h на h_z .

Модификация системы (70) приводит к традиционному виду записи многогруппового диффузионного уравнения, которое решается стандартным методом итерации источника:

$$\left(\hat{L} - \hat{K}_s \right) \bar{\phi} = \frac{1}{k_{ef}} \hat{K}_f \bar{\phi} \quad (71)$$

На каждой внешней итерации решается система групповых уравнений:

$$\begin{cases} \bar{\phi} = \hat{\Sigma}^{-1} (\bar{q} - \hat{H} \bar{J}) \\ \hat{W} \bar{J} = \hat{F} \bar{q} \end{cases} \quad (72)$$

При решении второго уравнения системы (2.5) использован метод точечной верхней релаксации, SOR:

$$\hat{W} = \hat{D} + (-\hat{R}) + (-\hat{R}^+) \quad (73)$$

$$\bar{J}_g^{(k)} = (1 - \omega_g) \bar{J}_g^{(k-1)} + \omega_g \hat{D}_g^{-1} [\hat{R}_g \bar{J}_g^{(k)} + \hat{R}_g^+ \bar{J}_g^{(k-1)} + \hat{F} \bar{q}_g] \quad (74)$$

В итоге, на каждой внутренней итерации последовательно определяются плотности потока нейтронов в центрах расчетных ячеек и средние по граням односторонние выходящие токи нейтронов. По окончании внутренних итераций рассчитываются средние по объемам ячеек групповые плотности потока нейтронов.

Дальнейшее решение многогрупповой диффузионной задачи осуществляется стандартным методом итерации источника, реализованным в JARFR. Сохранение стандартного вида итерационной схемы решения уравнения диффузии позволяет использовать реализованные в JARFR алгоритмы ускорения внешних итераций с помощью метода полиномов Чебышева по отношению к источнику деления, метод прогнозируемого ускорения и критерии сходимости итераций. В предложенном алгоритме сохраняется возможность использования имеющихся в JARFR критериев согласования точностей решения одnogрупповых уравнений с учетом вклада каждой энергетической группы нейтронов в источник деления.

Рассчитываемые значения односторонних токов могут быть полезны, например, при интерполяции плотностей потока нейтронов, задании адекватных задаче граничных условий, сшивки с более высоким приближением уравнения переноса нейтронов и т.п.

Следует отметить, что в простейшем случае использования разностной схемы IIS для решения условно-критической задачи, в JARFR требуется лишь модификация основного модуля расчета пространственно-энергетического распределения плотности потока нейтронов.

Особенности применения схемы IIS для решения задач теории возмущений

Отсутствие в расчетной схеме IIS высоких членов разложения пространственного распределения функции плотности потока нейтронов избавляет от необходимости

использования приближенных вычислений, что свойственно нодальным методам, использующим для описания одномерных функций пространственного распределения плотности потока нейтронов полиномы высоких порядков. В этом случае дискретные аналоги прямого и сопряженного диффузионного уравнения линейны, и все разностные выражения могут быть получены аналитически, что существенно упрощает вывод уравнений для решения сопряженной задачи.

Известно, что для расчета функции, сопряженной решению многогруппового диффузионного уравнения при использовании нодальных методов могут быть применены как «матричный» так и «операторный» формализмы, дающие так называемые «математически» и «физически» сопряженные решения [24]. В силу несимметричности и, следовательно, несамосопряженности операторов, действующих на односторонние токи нейтронов (в отличие от традиционных конечно-разностных операторов для плотностей потоков) эти два подхода дают различные решения.

Расчеты «математически сопряженной» функции, в ряде случаев могут требовать существенно больших расчетных затрат по сравнению с решением прямой задачи. Использование же в формулах теории возмущений не средних по ячейкам, а пространственно зависимых (в соответствии с используемым нодальным методом) функций делает «операторный» формализм предпочтительней [25], т.к. более правильно применить процедуру вывода формул ТВ непосредственно к дифференциальным непрерывным уравнениям.

На основе методики IIS могут быть одинаково легко найдены как «физически», так и «математически» сопряженные функции, что и было реализовано в усовершенствованной версии JARFR. В первом случае к сопряженному дифференциальному многогрупповому уравнению диффузии применяется та же процедура вывода конечно-разностных уравнений, что и в случае прямого уравнения. Во втором случае решается система уравнений, сопряженных к уравнениям (69), для чего блочные матрицы \hat{G} и \hat{H} транспонируются. В формулах теории возмущений, модифицированных с учетом использования разностной схемы IIS, используются скалярные произведения пространственно зависимых прямой и сопряженной функций плотности потока нейтронов и замена этих произведений на произведения средних по объемам ячеек функций будет загромождать расчеты. По этим причинам в версии JARFR-IIS расчеты проводятся с использованием системы линейных уравнений для «физического» сопряжения.

Применение расчетной схемы IIS к прямой и сопряженной многогрупповой диффузионной задачам дает в качестве решения пространственно-энергетическое

распределение функций плотности потока нейтронов и ценности нейтронов, а также прямых и сопряженных поверхностных односторонних токов нейтронов.

При выводе модифицированных формул теории возмущений используется стандартная процедура, когда прямое невозмущенное диффузионное уравнение умножается на функцию ценности, а сопряженное возмущенное уравнение - на функцию плотности потока нейтронов и полученная разница этих двух уравнений интегрируется по всему энергетическому интервалу и объему расчетной модели. В итоге, в приближении малых возмущений, выражение для абсолютного изменения реактивности при возмущении исходной модели может быть записано в следующем виде:

$$\Delta\rho = \frac{1}{K_{eff}} - \frac{1}{K'_{eff}} = \Delta\rho_v + \Delta\rho_{in} + \Delta\rho_{cfd} + \Delta\rho_D$$

В выражениях для расчета $\Delta\rho_v, \Delta\rho_{in}, \Delta\rho_{cfd}$ используется произведение средних по расчетным ячейкам значений плотности потока и ценности нейтронов, поэтому формулы для модифицированного по схеме IIS алгоритма расчета эффектов реактивности формально не изменятся, однако точность их будет существенно повышена, т.к. вместо приближенной замены средних значений данных функций значениями в центрах расчетных ячеек, в модифицированном алгоритме будут использоваться именно среднеинтегральные значения.

Иначе обстоит дело с компонентой эффекта реактивности, содержащей возмущение транспортного сечения (коэффициента диффузии), которая после ряда преобразований может быть представлена следующим образом:

$$\sum_{g=1}^G \iiint_{V_R} \delta D_g \Delta\varphi_g^+ \times \varphi_g dV = \sum_{g=1}^G \sum_{n=1}^N \iiint_{V_z} \delta D_g \Delta\varphi_g^+ \times \varphi_g dV = \sum_{g=1}^G \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \iiint_{V_k} \delta D_g \Delta\varphi_g^+ \times \varphi_g dV$$

где G – число групп, N - число зон, K - число расчетных ячеек в n -й зоне.

Интеграл по объему расчетной ячейки, входящий в это выражение, преобразуется к разнице поверхностного и объемного интегралов:

$$\iiint_{V_k} \delta D_g \Delta\varphi_g^+ \times \varphi_g dV = -\delta D_g \left[\iiint_{V_k} grad\varphi_g^+ \times grad\varphi_g dV - \iint_{S_k} \varphi_g \times \frac{\partial\varphi_g^+}{\partial\vec{n}} d\vec{S} \right] \quad (75)$$

В традиционном конечно-разностном алгоритме расчета эффектов реактивности суммарный интеграл по поверхностям расчетных ячеек в пределах объема модели реактора считается равным нулю, т.к. коэффициент диффузии на границах зон определяется как среднегеометрическое значение коэффициентов диффузии этих зон и возмущения этого среднегеометрического значения считается равным для соседних ячеек как с возмущенными, так и с не возмущенными константами. Однако, из выражения (75) видно, что данный

интеграл отвечает за возмущение перетечек нейтронов на границах зон различного состава и на внешней границе реактора, и имеет существенное значение, особенно для тех зон, где относительно велико соотношение площади поверхности зоны к ее объему (например для поглощающих стержней).

Необходимые для аппроксимации поверхностного интеграла пространственные распределения функций плотности потока и ценности нейтронов при использовании расчетной схемы IIS известны и позволяют определить как производную по нормали, так и значение на поверхности ячейки любой из этих функций. Довольно просто аппроксимируется интеграл от произведения $grad\varphi_g^+ \times grad\varphi_g$ по объему квадратной в плане ячейки. Определенные сложности возникают при интегрировании произведения градиентов по объему шестигранной призмы, однако, как и при расчете среднеинтегральных по ячейкам значений плотности потока или ценности нейтронов, эта проблема может быть решена. В итоге, оба интеграла, входящие в выражение (75) сводятся к конечно-разностным уравнениям относительно известных прямых и сопряженных плотностей потоков и токов нейтронов.

Следует отметить, что в простейшем случае использования разностной схемы IIS для решения задач теории возмущений, в JARFR требуется модификация основного модуля расчета пространственно-энергетического распределения ценности нейтронов и модуля расчета компоненты эффекта реактивности, содержащей возмущение транспортного сечения (коэффициента диффузии).

3 Программно-технические характеристики JARFR

3.1 Общие сведения

Для расчетов с применением программы рекомендуется персональный компьютер с тактовой частотой процессора не ниже 2 ГГц, объемом оперативной памяти не менее 1 Гб и объемом дискового пространства от 200 Мб. Операционная система – Windows (версии 2000, 2003, XP, 7), Debian GNU/Linux 10, язык программирования – Фортран (среды Lahey Fortran F90 и Intel Fortran).

Время счета зависит от количества расчетных узлов задачи, количества энергетических групп и физических зон, используемых в модели реактора, от заданных точностей расчета пространственно-энергетических распределений плотности потока и ценности нейтронов, а также от объема решаемых задач.

JARFR депонирован в Центре по организации экспертизы программных средств (Отраслевой фонд алгоритмов и программ для расчета ядерных реакторов, ОФАП-ЯР), регистрационный номер №00662 от 22.10.2008.

Самостоятельные модули, входящие в состав депонированного программы для ЭВМ JARFR (модуль подготовки констант CONSYST 0601 с оболочкой PRECONS и библиотеки ядерных данных БНАБ-93: 28-групповая ABBN93g.01a и 299-групповая ABBN93m.01a), зарегистрированы под № 00572 от 11.06.2004.

3.2 Блок-схема программного средства

Схематически структура работы JARFR представлена на рисунке 3.1. В каждом блоке указан управляющий модуль и основные расчетные модули, реализующие функцию блока.

Приведенная последовательность работы программы справедлива при участии в расчете всех расчетных блоков, т.е. при "полномасштабном" расчете с использованием всех возможностей, предоставляемых программой (см. раздел 1).

Количество блоков, принимающих участие в каждом конкретном расчете, определяется пользователем во входных данных. Обязательным для любого расчетного варианта является блок расчета плотности потока нейтронов.

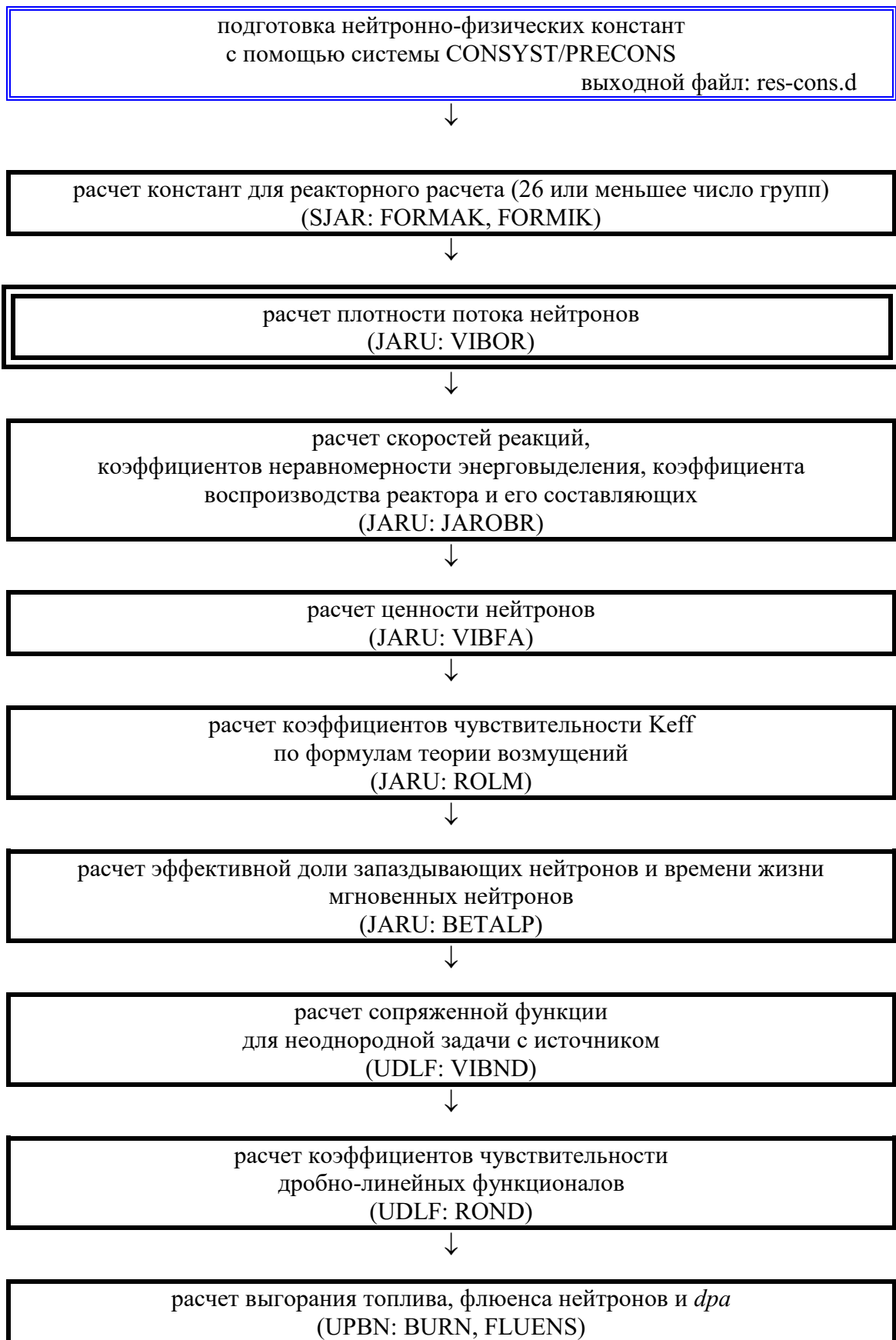


Рисунок 3.1 - Принципиальная блок-схема JARFR

3.3 Структура построения программы

Структура построения программы иллюстрируется деревом вызова модулей программы (рисунок 4.2) с таблицей 3.1, показывающей соответствие нумерации и имен подпрограмм. Таблица 3.2 показывает, из каких модулей вызывается каждая подпрограмма. Эта служебная информация получена в автоматическом режиме анализатором текстов программ на Фортране и используется разработчиками программы при его модификации и развитии путем добавления новых функциональных возможностей или замены модулей.

```
1 main
2   |====>time
3   |====>delcom
4   |====>tablro
5   |====>atves
6   |====>jar26
7   |         |====>rwd1
8   |         |====>jaru26
9   |         |         |====>rwd1
10  |         |         |====>pechat
11  |         |         |====>itr
12  |         |         |         |====>rwd
13  |         |         |         |====>fpfr
14  |         |         |         |         |====>rwd1
15  |         |         |         |         |====>rwd
16  |         |         |         |         |====>uch
17  |====>rdwrtd
18  |====>dpacon
19  |         |====>dsp
20  |====>rwd
21  |====>sjar
22  |         |====>formak
23  |         |         |====>rdwrtd
24  |         |         |====>rwd
25  |         |         |====>rwd
26  |         |         |====>formik
27  |         |         |         |====>rwd
28  |         |         |         |====>rdwrtd
29  |====>sjarp1
30  |         |====>mikp1
31  |         |         |====>rdwrtd
32  |         |         |====>rwd
33  |         |         |====>makp1
34  |         |         |         |====>rdwrtd
35  |         |         |         |====>rwd
36  |====>sigom
37  |         |====>rwd
38  |         |         |====>sgomp1
39  |         |         |         |====>rwd
40  |====>jar
41  |         |====>rwd1
42  |         |====>jaru
43  |         |         |====>rwd1
44  |         |         |====>pechat
45  |         |         |====>mimjar
46  |         |         |         |====>rwd
```

Рисунок 3.2 – Дерево вызовов модулей JARFR

```

47 |====>drob36
48 |====>drtr36
49 |====>drob30
50 |====>drtr30
51 |====>drob60
52 |====>drtr60
53 |====>rwd
54 |====>sigcf
55 |     |====>rwd
56 |====>point
57 |     |====>pntg30
58 |     |====>pntk45
59 |     |====>pntt30
60 |     |====>pnt360
61 |     |====>pntg12
62 |     |====>pntg60
63 |     |====>pntk90
64 |     |====>pntt60
65 |     |====>pnt60t
66 |====>itr           cm    11
67 |====>vibor
68 |     |====>qfis
69 |     |     |====>rwd
70 |     |====>qtot
71 |     |     |====>rwd
72 |     |====>rwd
73 |====>jap3d
74 |     |====>rwd
75 |     |====>qfis           cm    68
76 |     |====>qtot           cm    70
77 |====>fin36
78 |     |====>rwd
79 |     |====>fidr
80 |====>fin30
81 |     |====>rwd
82 |     |====>fidr
83 |====>mak11
84 |     |====>rwd
85 |     |====>sigcf           cm    54
86 |====>prof
87 |     |====>mak11           cm    83
88 |     |====>point           cm    56
89 |     |====>vibor           cm    67
90 |     |====>qfis           cm    68
91 |     |====>pach
92 |     |     |====>pechat
93 |     |====>gelg
94 |     |====>rwd
95 |====>fpfr           cm    13
96 |====>kras
97 |     |====>axialkz
98 |     |====>rwd
99 |     |====>qfis           cm    68
100 |====>pchmax
101 |     |====>pechat
102 |====>kx1
103 |====>tablro
104 |====>anorm
105 |     |====>rwd
106 |     |====>uch

```

Рисунок 3.2 (продолжение) – Дерево вызовов модулей JARFR


```

107 | | | |====>probr
108 | | | |====>pecht1
109 | | | |====>qfis          cm   68
110 | | | |====>pech
111 | | | | |====>pechat
112 | | | | |====>probr
113 | | | | |====>sbor36
114 | | | | | |====>pechat
115 | | | | |====>sbtr36
116 | | | | | |====>sbor36      cm  113
117 | | | | |====>sbor30
118 | | | | | |====>pechat
119 | | | | |====>sbtr30
120 | | | | | |====>sbor30      cm  117
121 | | | | |====>rwd
122 | | | |====>intg
123 | | | | |====>rwd
124 | | | | |====>ech
125 | | | |====>kr
126 | | | | |====>uch
127 | | | | |====>rasnt
128 | | | |====>jarobr
129 | | | | |====>koefnr
130 | | | | |====>skre
131 | | | | | |====>rwd
132 | | | | |====>probr
133 | | | | |====>norm
134 | | | | | |====>pechat
135 | | | | |====>kv
136 | | | | | |====>skin
137 | | | | | | |====>skre      cm  130
138 | | | | | |====>rwd
139 | | | | | |====>uch
140 | | | |====>ikb
141 | | | | |====>uch
142 | | | | |====>skin          cm  136
143 | | | |====>vibfa
144 | | | | |====>qfisa
145 | | | | | |====>rwd
146 | | | | |====>qtota
147 | | | | | |====>rwd
148 | | | | |====>rwd
149 | | | |====>japtv
150 | | | | |====>rwd
151 | | | | |====>qfism
152 | | | | | |====>rwd
153 | | | | |====>qtotn
154 | | | | | |====>rwd
155 | | | | |====>qfisa          cm  144
156 | | | |====>pechf
157 | | | | |====>rwd
158 | | | | |====>pechat
159 | | | |====>anf
160 | | | | |====>qfis          cm   68
161 | | | | |====>qfism
162 | | | | | |====>rwd
163 | | | | |====>ech
164 | | | |====>rolm
165 | | | | |====>rwd
166 | | | | |====>roa

```

Рисунок 3.2 (продолжение) – Дерево вызовов модулей JARFR

```

167 | | | |====>ronuf
168 | | | |    |====>rwd
169 | | | |====>ech
170 | | | |====>pecht1
171 | | | |====>rocf
172 | | | |    |====>rwd
173 | | | |====>roin
174 | | | |    |====>rwd
175 | | | |====>rodif
176 | | | |    |====>rwd
177 | | | |====>roi
178 | | | |    |====>rwd
179 | | | |====>rwd
180 | | | |====>fqri
181 | | | |    |====>rwd
182 | | | |    |====>ech
183 | | | |====>betalp
184 | | | |    |====>rwd
185 | | | |    |====>ech
186 | | | |====>rach
187 | | | |    |====>rwd
188 | | | |    |====>ech
189 | | | |    |====>pecht1
190 | | | |    |====>rwd1
191 | | | |====>rkf
192 | | | |    |====>rakf
193 | | | |    |====>rocf      CM 171
194 | | | |    |====>roin      CM 173
195 | | | |    |====>rdkf
196 | | | |    |    |====>rwd
197 | | | |    |====>roi      CM 177
198 | | | |    |====>ech
199 | | | |====>udlf
200 | | | |    |====>rwd
201 | | | |    |====>tvsig
202 | | | |    |====>rwd
203 | | | |    |====>ech
204 | | | |    |====>nusf
205 | | | |    |====>rwd
206 | | | |    |====>fqrind
207 | | | |    |====>rwd
208 | | | |    |====>ech
209 | | | |    |====>ach1
210 | | | |    |====>rwd
211 | | | |    |====>itr      CM 11
212 | | | |    |====>point  CM 56
213 | | | |    |====>vibnd
214 | | | |    |====>qfisb   CM 161
215 | | | |    |====>qtdl
216 | | | |    |    |====>rwd
217 | | | |    |====>qtota   CM 146
218 | | | |    |====>rwd
219 | | | |    |====>anf     CM 159
220 | | | |    |====>ech
221 | | | |    |====>japotv
222 | | | |    |====>rwd
223 | | | |    |====>qfism
224 | | | |    |    |====>rwd
225 | | | |    |====>qtdl   CM 215
226 | | | |    |====>qtotn  CM 153
227 | | | |    |====>anf   CM 159

```

Рисунок 3.2 (продолжение) – Дерево вызовов модулей JARFR

```

228 | | | | |====>qfisa      cm 144
229 | | | | |====>rond
230 | | | | |====>rwd
231 | | | | |====>roand
232 | | | | |====>ronuf      cm 167
233 | | | | |====>ech
234 | | | | |====>pecht1
235 | | | | |====>roctd      cm 171
236 | | | | |====>roin      cm 173
237 | | | | |====>rodif     cm 175
238 | | | | |====>roi       cm 177
239 | | | | |====>roadl
240 | | | | |====>rwd
241 | | | | |====>pecht1
242 | | | | |====>ech
243 | | | | |====>upbnl
244 | | | | |====>rwd
245 | | | | |====>fluens
246 | | | | |====>rwd
247 | | | | |====>uch
248 | | | | |====>pecht1
249 | | | | |====>burn
250 | | | | |====>rwd
251 | | | | |====>uch
252 | | | | |====>matbur
253 | | | | |====>number
254 | | | | |====>rkdrv
255 | | | | |====>derivs
256 | | | | |====>rkqc
257 | | | | |====>rk4
258 | | | | |====>derivs
259 | | | | |====>derivs
260 | | | | |====>burnmz
261 | | | | |====>rwd
262 | | | | |====>uch
263 | | | | |====>rkgs
264 | | | | |====>fct
265 | | | | |====>outp
266 | | | | |====>bnvkg
267 | | | | |====>rwd
268 | | | | |====>uch
269 | | | | |====>rkgs      cm 263
270 | | | | |====>makl1     cm 83
271 | | | | |====>point     cm 56
272 | | | | |====>vibor     cm 67
273 | | | | |====>jap3d     cm 73
274 | | | | |====>anorm     cm 104
275 | | | | |====>qfis      cm 68
276 | | | | |====>pech      cm 110
277 | | | | |====>kr        cm 125
278 | | | | |====>jarobr    cm 128
279 | | | | |====>ikb       cm 140
280 | | | | |====>under
281 | | | | |====>pntund
282 | | | | |====>pechat
283 | | | | |====>spmak
284 | | | | |====>rwd
285 | | | | |====>spmik
286 | | | | |====>splmak
287 | | | | |====>rwd
288 | | | | |====>splmik

```

Рисунок 3.2 (продолжение) – Дерево вызовов модулей JARFR

Таблица 3.1 - Соответствие нумерации и имен подпрограмм

| Подпрограмма | Позиция | Подпрограмма | Позиция |
|--------------|---------|--------------|---------|
| ach1 | 209 | pnt60t | 65 |
| Anf | 159 | pntg12 | 61 |
| Anorm | 104 | pntg30 | 57 |
| Atves | 5 | pntg60 | 62 |
| axialkz | 97 | pntk45 | 58 |
| Betalp | 183 | pntk90 | 63 |
| Bnvkg | 266 | pntt30 | 59 |
| Burn | 249 | pntt60 | 64 |
| burnmz | 260 | pntund | 281 |
| delcom | 3 | point | 56 |
| derivs | 255 | probr | 107 |
| dpacon | 18 | prof | 86 |
| Drob30 | 49 | qfis | 68 |
| Drob36 | 47 | qfisa | 144 |
| Drob60 | 51 | qfisb | 161 |
| Drtr30 | 50 | qfism | 223 |
| Drtr36 | 48 | qfisn | 151 |
| Drtr60 | 52 | qtdl | 215 |
| Dsp | 19 | qtot | 70 |
| Ech | 124 | qtota | 146 |
| Fct | 264 | qtotn | 153 |
| Fidr | 79 | rach | 186 |
| fin30 | 80 | rakf | 192 |
| fin36 | 77 | rasnt | 127 |
| fluens | 245 | rdkf | 195 |
| formak | 22 | rdwrt | 17 |
| formik | 26 | rk4 | 257 |
| Fpfr | 13 | rkdrv | 254 |
| Fqri | 180 | rkf | 191 |
| fqrind | 206 | rkgs | 263 |
| Ikb | 140 | rkqc | 256 |
| Intg | 122 | roa | 166 |
| Itr | 11 | roadl | 239 |
| jap3d | 73 | roand | 231 |
| japotv | 221 | roefd | 171 |
| japtv | 149 | rodif | 175 |
| Jar | 40 | roi | 177 |
| jar26 | 6 | roin | 173 |
| jarobr | 128 | rolm | 164 |
| Jaru | 42 | rond | 229 |
| Jaru26 | 8 | ronuf | 167 |
| koefnr | 129 | rwd | 12 |
| Kr | 125 | rwd1 | 7 |
| Kras | 96 | sbor30 | 117 |
| Kv | 135 | sbor36 | 113 |
| kx1 | 102 | sbtr30 | 119 |
| Main | 1 | sbtr36 | 115 |
| mak11 | 83 | sigcf | 54 |
| Makpl | 33 | sigom | 36 |
| matbur | 252 | sjar | 21 |
| mikpl | 30 | sjarpl | 29 |
| mimjar | 45 | skin | 136 |
| norm | 133 | skre | 130 |
| number | 253 | splmak | 286 |
| nusf | 204 | splmik | 288 |
| outp | 265 | spmak | 283 |
| pach | 91 | spmik | 285 |
| pchmax | 100 | tablro | 4 |
| pech | 110 | time | 2 |
| pechat | 10 | tvsig | 201 |
| pechf | 156 | uch | 16 |
| pecht1 | 108 | udlf | 199 |
| pnt360 | 60 | under | 280 |
| upbn1 | 243 | vibfa | 143 |
| vibnd | 213 | vibor | 67 |

Таблица 3.2 – Вызов отдельных подпрограмм

| Подпрограмма | Вызывается из: | | | | | |
|--------------|----------------|--------|--------|--------|--------|-------|
| ach1 | udlf | | | | | |
| anf | japstv | vibnd | jaru | | | |
| anorm | upbn1 | jaru | | | | |
| atves | main | | | | | |
| axialkz | kras | | | | | |
| betalp | jaru | | | | | |
| bnvkg | upbn1 | | | | | |
| burn | upbn1 | | | | | |
| burnmz | upbn1 | | | | | |
| delcom | main | | | | | |
| derivs | rkqc | rk4 | rkdrv | | | |
| dpacon | main | | | | | |
| drob30 | jaru | | | | | |
| drob36 | jaru | | | | | |
| drob60 | jaru | | | | | |
| drtr30 | jaru | | | | | |
| drtr36 | jaru | | | | | |
| drtr60 | jaru | | | | | |
| dsp | dpacon | | | | | |
| ech | roadl | roand | vibnd | fqrind | tvsig | rakf |
| | rach | betalp | fqri | roa | anf | intg |
| fct | rkgs | | | | | |
| fidr | fin30 | fin36 | | | | |
| fin30 | jaru | | | | | |
| fin36 | jaru | | | | | |
| fluens | upbn1 | | | | | |
| formak | sjar | | | | | |
| formik | sjar | | | | | |
| fpfr | jaru | jaru26 | | | | |
| fqri | jaru | | | | | |
| fqrind | udlf | | | | | |
| ikb | upbn1 | jaru | | | | |
| intg | jaru | | | | | |
| itr | udlf | jaru | jaru26 | | | |
| jap3d | upbn1 | jaru | | | | |
| japstv | udlf | | | | | |
| japstv | jaru | | | | | |
| jar | main | | | | | |
| jar26 | main | | | | | |
| jarobr | upbn1 | jaru | | | | |
| jaru | jar | | | | | |
| jaru26 | jar26 | | | | | |
| koefnr | jarobr | | | | | |
| kr | upbn1 | jaru | | | | |
| kras | jaru | | | | | |
| kv | jarobr | | | | | |
| kx1 | jaru | | | | | |
| main | | | | | | |
| mak11 | upbn1 | prof | jaru | | | |
| makpl | sjarpl | | | | | |
| matbur | burn | | | | | |
| mikpl | sjarpl | | | | | |
| mimjar | jaru | | | | | |
| norm | jarobr | | | | | |
| number | matbur | | | | | |
| nusf | udlf | | | | | |
| outp | rkgs | | | | | |
| pach | prof | | | | | |
| pachmax | jaru | | | | | |
| pech | upbn1 | jaru | | | | |
| pechat | pntund | pechf | norm | sbor30 | sbor36 | pech |
| | pachmax | pach | jaru | jaru26 | | |
| pechf | jaru | | | | | |
| pecht1 | fluens | roadl | roand | rach | roa | anorm |
| pnt360 | point | | | | | |
| pnt60t | point | | | | | |
| pntg12 | point | | | | | |
| pntg30 | point | | | | | |
| pntg60 | point | | | | | |
| pntk45 | point | | | | | |
| pntk90 | point | | | | | |
| pntt30 | point | | | | | |
| pntt60 | point | | | | | |
| pntund | jaru | | | | | |

Таблица 3.2 (продолжение) – Вызов отдельных подпрограмм

| | | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| point | upbn1 | udlf | prof | jaru | | |
| qfis | upbn1 | anf | jaru | kras | prof | jap3d |
| | vibor | | | | | |
| qfisa | japotv | japtv | vibfa | | | |
| qfisp | vibnd | anf | | | | |
| qfism | japotv | | | | | |
| qfisn | japtv | | | | | |
| qtdl | japotv | vibnd | | | | |
| qtot | jap3d | vibor | | | | |
| qtota | vibnd | vibfa | | | | |
| qtotn | japotv | japtv | | | | |
| rach | jaru | | | | | |
| rakf | rkf | | | | | |
| rasnt | kr | | | | | |
| rdkf | rakf | | | | | |
| rdwrtd | makpl | mikpl | formik | formak | main | |
| rk4 | rkqc | | | | | |
| rkdrv | burn | | | | | |
| rkf | jaru | | | | | |
| rkgs | bnvkg | burnmz | | | | |
| rkqc | rkdrv | | | | | |
| roa | rolm | | | | | |
| roadl | rond | | | | | |
| roand | rond | | | | | |
| rocfd | roand | rakf | roa | | | |
| rodif | roand | roa | | | | |
| roi | roand | rakf | roa | | | |
| roin | roand | rakf | roa | | | |
| rolm | jaru | | | | | |
| rond | udlf | | | | | |
| ronuf | roand | roa | | | | |
| rwd | splmak | spmak | bnvkg | burnmz | burn | fluens |
| | upbn1 | roadl | rond | qfism | japotv | vibnd |
| | qtdl | achl | fqrind | nusf | tvsig | udlf |
| | rdkf | rach | betalp | fqri | roa | roi |
| | rodif | roin | rocfd | ronuf | rolm | qfisp |
| | pechf | qtotn | qfisp | japtv | vibfa | qtota |
| | qfisa | kv | skre | intg | pech | anorm |
| | kras | prof | makl1 | fin30 | fin36 | jap3d |
| | vibor | qtot | qfis | sigcf | jaru | mimjar |
| | sgompl | sigom | sjarpl | mikpl | formik | sjar |
| | formak | main | fpfr | itr | | |
| rwld | rach | jaru | jar | fpfr | jaru26 | jar26 |
| sbor30 | sbtr30 | pech | | | | |
| sbor36 | sbtr36 | pech | | | | |
| sbtr30 | pech | | | | | |
| sbtr36 | pech | | | | | |
| sgompl | sigom | | | | | |
| sigcf | makl1 | jaru | | | | |
| sigom | main | | | | | |
| sjar | main | | | | | |
| sjarpl | main | | | | | |
| skin | ikb | kv | | | | |
| skre | skin | jarobr | | | | |
| splmak | spmak | | | | | |
| splmik | splmak | | | | | |
| spmak | main | | | | | |
| spmik | spmak | | | | | |
| tablro | jaru | main | | | | |
| time | main | | | | | |
| tvsig | udlf | | | | | |
| uch | bnvkg | burnmz | burn | fluens | ikb | kv |
| | kr | anorm | fpfr | | | |
| udlf | jaru | | | | | |
| under | jaru | | | | | |
| upbn1 | jaru | | | | | |
| vibfa | jaru | | | | | |
| vibnd | udlf | | | | | |
| vibor | upbn1 | prof | jaru | | | |

4 Инструкция для пользователя JARFR

4.1 Инструкция по запуску

(1) Для работы JARFR с системой константного обеспечения CONSYST (ver.0601)/PRECONS и библиотекой ядерных данных БНАБ-93.01а в корневом каталоге рабочей директории \JARFR должны находиться пять подкаталогов:

1. Подкаталог ..\Consyst_LF.0601, содержащий все необходимые для формирования выполняемого модуля системы подготовки констант: объектные библиотеки модулей системы CONSYST ver.0601 и исходные тексты (Фортран) вызывающих программ.
2. Подкаталог ..\ABBN93.LIB с библиотекой ядерных данных БНАБ-93.01а в бинарном виде.
3. Подкаталог ..\TEMP для временных файлов, формирующихся при работе системы подготовки констант CONSYST.
4. Подкаталог ..\JARFR.txt с исходными текстами (Фортран) JARFR.
5. Подкаталог ..\EXEC, в котором находятся командные файлы, управляющие работой программ, производятся вычисления и формируются выходные файлы после работы CONSYST и JARFR.

Все подкаталоги имеют внутри файл **Readme** с необходимыми разъяснениями. Исполняемые модули в подкаталогах ..\Consyst_LF.0601 и ..\JARFR.txt могут быть созданы запуском командных файлов **#MkCalpre.bat** и **#MkJARFR.bat**, соответственно (приведен пример для транслятора LAHEY FORTRAN 90).

(2) В подкаталоге ..\EXEC должны находиться

- исполняемые модули вызова системы CONSYST - **Calpre90.exe** и JARFR - **Jarfr.exe**,
- файл конфигурации **Config.ini** и файл редактирования задания **thm.ini** для системы CONSYST
- файл исходных данных **input.d**, в котором находится вся необходимая информация для решения конкретной задачи нейтронно-физического расчета. Этот файл является входным и для системы CONSYST, и для JARFR.

(3) Запуск на выполнение в подкаталоге ..\EXEC осуществляется командным файлом **JAR_CON.bat**, который последовательно вызывает командные файлы **EXE_CONS.bat** и **EXE_JAR.bat**. Эти командные файлы, в свою очередь, вызывают исполняемые модули CONSYST и JARFR.

(4) Вся выходная информация для пользователя после расчета содержится в подкаталоге ..\EXEC.

Она обязательно включает в себя файл **Out-cons.d** – протокол работы CONSYST и файл **Out-jar.d** – листинг выдачи JARFR в соответствии с заданием, описанным в **input.d**.

Дополнительно, в случае расчета задачи с выгоранием, образуются файл **Out-burn.d** со служебной информацией для расчета выгорания и выдачей концентраций изотопов по всем физическим зонам на каждом шаге по выгоранию, а также файл **Kef-burn.dat**, в котором приведено изменение K_{eff} в зависимости от времени кампании.

(5) С помощью командных файлов **del_CONS.bat** и **del_JAR.bat** можно удалить промежуточные рабочие файлы программ CONSYST и JARFR, расположенные в подкаталоге **..EXEC**, для высвобождения дискового пространства.

При этом не удаляется бинарный файл CONSYST **Res-cons.d**, содержащий библиотеку макро- и микроконстант, подготовленную CONSYST для конкретных конфигурации и материального состава рассчитываемого объекта. Это позволяет проводить расчеты нескольких задач для этого объекта с одной библиотекой групповых констант и экономить время за счет отсутствия необходимости повторного обращения к системе CONSYST.

Такая необходимость возникает, например, при включении в задание на расчет по JARFR при повторном пуске каких-либо функционалов плотности потока нейтронов и ценности, дополнительных к уже рассчитанным в предыдущем пуске.

Для сохранения возможности использования при работе JARFR начальных приближений для плотности потока и ценности нейтронов с диска не удаляются файлы прямого доступа **f03.dat** и **f04.dat**.

4.2 Входная информация

Вся входная информация, используемая в JARFR, вводится с помощью именованных операторов ввода **NAMELIST** языка программирования FORTRAN. Операторы ввода **NAMELIST** задаются во входном файле программы - **input.d**.

Кроме того, при расчете с подготовкой констант по системе CONSYST требуется наличие в рабочей директории выходного файла системы CONSYST - **out-cons.d**.

Всего в JARFR используется девять именованных операторов ввода **NAMELIST**:

NAMELIST /MIM/, **NAMELIST /D26/**, **NAMELIST /DAN/**, **NAMELIST /OBR/**,
NAMELIST /TVZ/, **NAMELIST /VNESH/**, **NAMELIST /OTVZ/**, **NAMELIST /UPBN/**,
NAMELIST /TVZB/.

Каждый из операторов ввода **NAMELIST** отвечает за определенную функциональную часть входной информации.

Вся информация, необходимая для расчета многогрупповой диффузионной задачи, задается во входных данных в операторах ввода под именами NAMELIST /MIM/, NAMELIST /D26/ и NAMELIST /DAN/. В случае расчета с задаваемыми макросечениями в операторе ввода NAMELIST /MIM/ необходимо определить только режим работы программы с макроконстантами (JPRO=-1), а оператор ввода NAMELIST /D26/ не задается.

Расчеты с выгонкой K_{eff} на заданное значение производятся в случае определения в операторе ввода NAMELIST /DAN/ параметра KXR=1. Информация, необходимая для проведения расчетов с выгонкой K_{eff} на заданное значение, задается в операторе ввода NAMELIST /DAN/.

Расчет с внешним источником осуществляется в случае определения в операторе ввода под именем NAMELIST /DAN/ параметра IIST≠0. Внешний источник задается в малогрупповой части расчета, когда уже окончательно готовы все константы. Информация, необходимая для проведения расчета с внешним источником, содержится в операторе ввода NAMELIST /VNESH/.

Информация, необходимая для расчета скоростей реакций деления и захвата задается во входных данных в операторе ввода под именем NAMELIST /OBR/.

Информация, необходимая для расчета коэффициентов неравномерности энерговыделения, задается во входных данных в операторе ввода под именем NAMELIST /OBR/.

Информация, необходимая для расчета коэффициента воспроизводства реактора и его составляющих задается во входных данных в операторе ввода под именем NAMELIST /OBR/.

Решение сопряженной задачи производится в случае определения в операторе ввода NAMELIST /DAN/ параметра JTV>0. Информация, необходимая для расчета ценности нейтронов, задается в операторе ввода NAMELIST /TVZ/.

Расчет эффективной доли запаздывающих нейтронов и времени жизни мгновенных нейтронов производится в случае определения в операторе ввода NAMELIST /MIM/ параметра JPRO=3 и в операторе ввода NAMELIST /DAN/ параметра JTV>0.

Расчеты по формулам теории возмущений производятся в случае определения в операторе ввода NAMELIST /DAN/ параметра JTV>0. Информация, необходимая для расчета коэффициентов чувствительности задается в операторе ввода NAMELIST /TVZ/.

JARFR реализована возможность повторного расчета по формулам теории возмущений после расчета выгорания топлива. Информация, необходимая для повторного расчета коэффициентов чувствительности, задается в операторе ввода NAMELIST /TVZB/.

Повторные расчеты по формулам теории возмущений производятся в случае определения в операторе ввода NAMELIST /DAN/ параметра JTV>0, в операторе ввода NAMELIST /DAN/ параметра JUPBN=1 и в операторе ввода NAMELIST /TVZB/ параметра JTVB=2.

Расчет билинейного Keff осуществляется автоматически при определении в операторе ввода NAMELIST /DAN/ параметра JTV>0.

Расчеты по обобщенной теории возмущений производятся в случае определения в операторе ввода NAMELIST /DAN/ параметра JTV=3 и в операторе ввода NAMELIST /TVZ/ параметра JTV2>0. Информация, необходимая для расчетов по формулам теории возмущений, содержится в операторах ввода NAMELIST /TVZ/ и NAMELIST /OTVZ/.

Расчет выгорания топлива производится в случае определения в операторе ввода NAMELIST /DAN/ параметра JUPBN=1. Информация, необходимая для расчетов, содержится в операторе ввода NAMELIST /UPBN/.

Расчет флюенса нейтронов и уровней радиационных повреждений конструкционных материалов производится в случае определения в операторе ввода NAMELIST /MIM/ параметра JDPA>0. Информация, необходимая для расчетов флюенса нейтронов и уровней радиационных повреждений содержится в операторе ввода NAMELIST /UPBN/.

Входными данными могут быть как скалярные величины, так и массивы целого и вещественного типа. Ввод некоторых данных является обязательным, некоторых - необязательным, т.к. часть данных определяется внутри программы "по умолчанию". Передавать величины, заданные по умолчанию, необходимо только если их значения отличаются от значений, определенных в программе.

Включение всех операторов ввода NAMELIST во входной файл является также необязательным и определяется пользователем согласно целям расчета. Обязательным для любой цепочки расчета является присутствие во входном файле именованных операторов ввода NAMELIST /MIM/, NAMELIST /DAN/ и NAMELIST /OBR/.

Далее приводится список входных величин, входящих в каждый из операторов NAMELIST.

Последовательность расположения операторов ввода при определении входной информации для "полномасштабного" расчета с максимальным использованием функциональных возможностей JARFR представлена на рисунке 4.1.

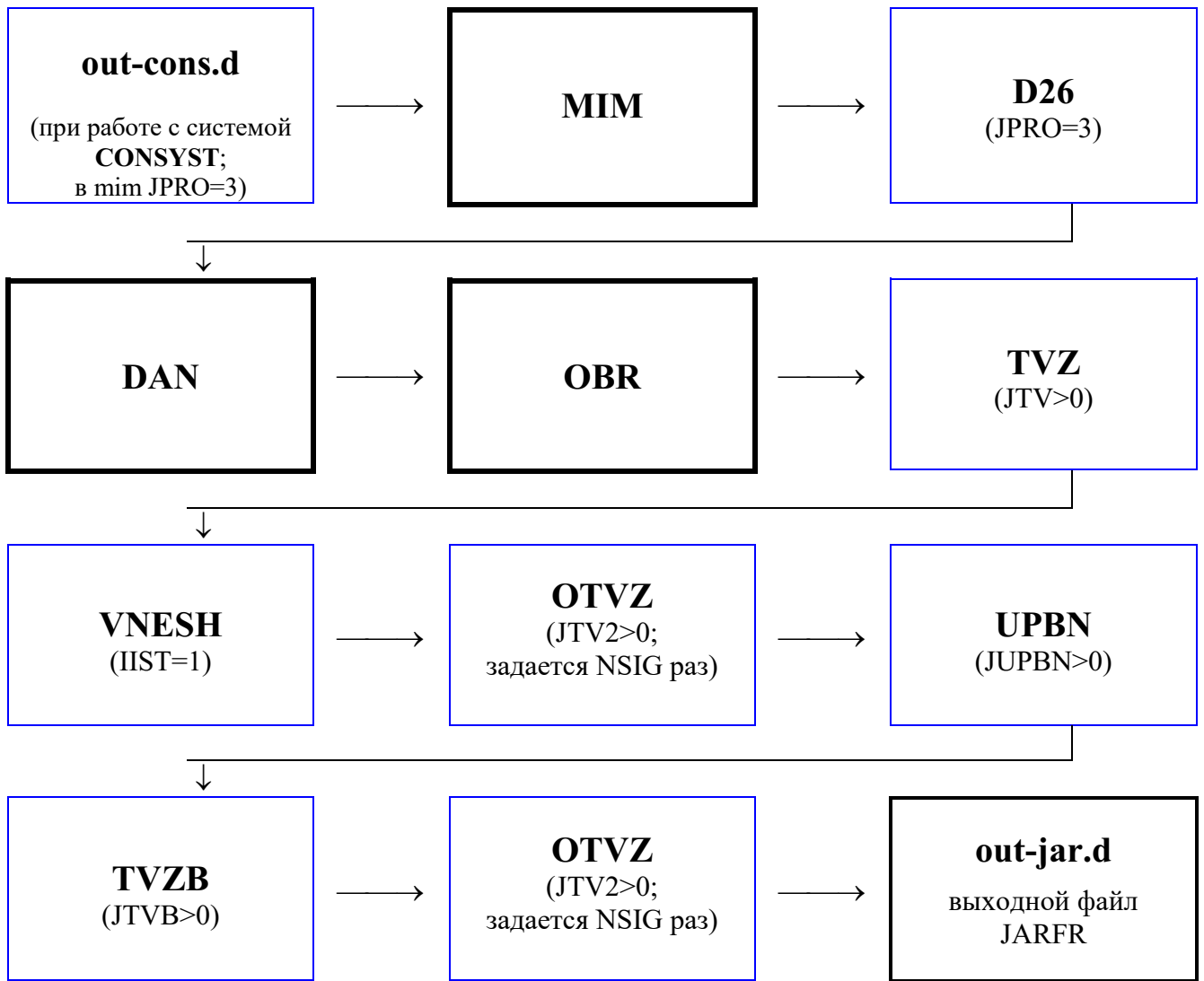


Рисунок 4.1 - Блок-схема ввода-вывода информации при работе JARFR

4.3 Содержание операторов ввода NAMELIST

I. NAMELIST /MIM/

Оператор ввода NAMELIST /MIM/ содержит входную информацию, необходимую для определения режима работы программы с нейтронно-физическими константами.

1. РЕЖИМ РАБОТЫ ПРОГРАММЫ С МАКРОКОНСТАНТАМИ

JPRO Задание режима работы программы с макроконстантами.
-1 - макроконстанты вводятся в качестве исходных данных;
3 - подготовка макроконстант с помощью собственных блоков программы после работы системы CONSYST.

По умолчанию JPRO=3.

!!

Дальнейшая информация необходима только в случае определения JPRO = 3

!!

2. ОПИСАНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

2.1. СОСТАВ

| | |
|--------------|---|
| M1 | Общее число физических зон. |
| NF | Число физических зон с делящимся материалом. |
| M1V | Число физических зон, для которых вводятся концентрации. |
| NER1 | Число нуклидов, участвующих в расчете. По умолчанию NER1=13. |
| NRED | Число делящихся нуклидов, участвующих в расчете. По умолчанию NER1=6. |
| SOSTAV(NER1) | Номера нуклидов, присутствующих в расчете. Сначала перечисляются делящиеся нуклиды. Должно быть однозначное соответствие расстановки нуклидов в массивах SOSTAV и AD. |
| AD(NER1,M1V) | Массив вводимых концентраций (по зонам, для каждой зоны все элементы). На первом месте - концентрации для делящихся нуклидов, зоны с делящимися нуклидами должны вводиться первыми. |
| NZON(M1) | Вектор соответствия вводимых концентраций физическим зонам. |
| TEM(M1) | Температура по физическим зонам, К. |

2.2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАЗБИЕНИЕ

NG Число энергетических групп (для расчета констант).
По умолчанию NG=26.

NOG Номер старшей группы в которую есть переводы нейтронов - матрица переводов для расчета констант.
 11 - расчет без водорода;
 26 - расчет с водородом.
 По умолчанию NOG=11.

MNG Число энергетических групп малогруппового разбиения.
 По умолчанию MNG=4.

MNOG Номер старшей группы, куда есть переводы нейтронов, в малогрупповом разбиении (матрица переводов).
 По умолчанию MNOG=3.

NCOL(MNG) Массив малогруппового объединения энергетических групп из 26-групповой системы констант. NCOL(I) - номер последней группы из 26-групповой системы констант, входящей в I-ю малогрупповую систему.
 По умолчанию NCOL=4,7,13,26.

3. РАСЧЕТНЫЕ ОПЦИИ И ПЕЧАТЬ

3.1 ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ

JDPA Признак расчета флюенса нейтронов и уровня радиационных повреждений.
 0 - нет расчета;
 1 - расчет флюенса с печатью всей картограммы по узлам на каждом шаге по выгоранию;
 2 - расчет флюенса с печатью только максимальных значений по физическим зонам;
 3 - объединение печати при JDPA=1 и JDPA=2.
 По умолчанию JDPA=0.

3.2. ПЕЧАТЬ

JPFR Признак печати весов и коэффициентов правки сечений упругого замедления на форму спектра внутри группы.
 0 - нет печати;
 1 - есть печать;
 2 - печать при JPFR=1 и дополнительная печать таблицы списка элементов и их обозначений в исходных каталогах CONSYST.
 По умолчанию JPFR=0.

II. NAMELIST /D26/

Оператор ввода NAMELIST /D26/ содержит входную информацию, необходимую для подготовки констант с помощью программы.

1. ОПИСАНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

1.1 ГЕОМЕТРИЯ

| | |
|---------|---|
| NDM | Размерность расчетной модели. 2 - двумерная расчетная модель; 3 - трехмерная расчетная модель. По умолчанию NDM=2. |
| NGE | Геометрия расчетной ячейки в плане. 1 - шестигранная; 2 - квадратная; 3 - треугольная. По умолчанию NGE=1. |
| ISDV | Тип симметрии 0 - "поворотом" (зеркальное отражение относительно оси симметрии); 1 - "сдвигом" (поворот сектора симметрии относительно центра симметрии на угол симметрии). По умолчанию ISDV=0. |
| IEOM | Угол симметрии расчетной модели. 1 - 360; 2 - 180; 3 - 120; 4 - 90; 5 - 60; 6 - 45; 7 - 30. По умолчанию IEOM=1. |
| NR1 | Число рядов расчетных узлов в плоскости расчетной модели (нумерация рядов осуществляется снизу вверх). |
| NR2 | Число расчетных узлов в вертикальном направлении (число плоскостей) для трехмерного расчета. По умолчанию NR2=1. |
| NS(NR1) | Количество расчетных ячеек в каждом ряду расчетной модели на плоскости. |

1.2. ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ

| | |
|-----|--|
| NLG | Признак задания логарифмических производных плотности потока на внешних границах модели. 0 - не задаются; 1 - задаются. По умолчанию NLG=0. |
|-----|--|

1.3. СОСТАВ

| | |
|--------|---|
| NT | Число физических зон (NT=M1, см. п. I. 2.1.) |
| NF | Число физических зон, содержащих делящиеся нуклиды (зоны с делящимися нуклидами должны быть пронумерованы первыми). |
| NK(K1) | Картограмма физических зон по пространственным узлам расчетной модели реактора. |

$NK(i)$ - номер физической зоны для i -го расчетного узла, где $i=1, \dots, K1$; $K1=K2*N$ - общее число расчетных узлов в картограмме.

$K2$ - число расчетных узлов в плоскости;

N - число плоскостей с различными картограммами для трехмерной расчетной модели (число вводимых картограмм). Для трехмерной расчетной модели картограммы задаются по плоскостям, причем одинаковые для разных плоскостей картограммы можно задавать только один раз, их расстановка по высоте расчетной модели производится с помощью вектора $NSLZ$. После расстановки в соответствии со значениями вектора $NSLZ$ общее число расчетных узлов модели равно $K1=K2*NR2$.

Нумерация физических зон для расчетных узлов в картограммах производится по плоскостям, а в плоскости по рядам, начиная с нижнего ряда; внутри ряда ячейки нумеруются слева направо. Для расчетных моделей с углами симметрии 120 и 60 для треугольной и гексагональной геометрий расчетных ячеек при симметрии поворотом ряды в плоскости нумеруются не снизу вверх, а под углом - от правого угла влево (см. приложение).

Для расчетных моделей с углами симметрии 360 и 180 картограммы в плоскости должны иметь вертикальную ось симметрии.

Нумерация физических зон в картограммах проводится в первую очередь для зон с делящимся материалом, а среди них - сначала для относящихся к активной зоне, а затем - к экранам; потом в том же порядке нумеруются зоны без делящегося материала - для активной зоны, для экранов и для остальных зон расчетной модели.

$NSLZ(NR2)$ Вектор расстановки задаваемых (для плоскостей по высоте расчетной модели) картограмм физических зон.

Для двумерной модели следует определять $NSLZ(1)=1$.

По умолчанию $NSLZ(1)=1$.

NA Число изотопов, участвующих в расчете ($NA=NER1$, см. п. I. 2.1.)

NAD Число делящихся изотопов, участвующих в расчете ($NAD=NRED$, см. п. I. 2.1.)

1.4. ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАЗБИЕНИЕ

NG Число энергетических групп исходной 26-групповой системы констант.

По умолчанию $NG=26$.

MG Номер старшей группы, в которую имеются переводы нейтронов (матрица переводов).

Номер старшей группы MG должен соответствовать величине NOG ($MG=NOG$, см. п. I. 2.2.)

По умолчанию $MG=11$.

2. МЕТОДЫ И ТОЧНОСТИ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА

JTR Признак выбора начального приближения.

1 - стандартное начальное приближение (начальное значение плотности потока по всем расчетным узлам задается равным 1);

0 - начальное приближение считывается с МД

(режим продолжения счета).
 По умолчанию JTR=1.
 JDRO Признак расчета с автоматическим дроблением гексагональной
 расчетной сетки на треугольную при проведении малогруппового
 расчета (см. п. III.2.1.)
 0 - нет дробления;
 1 - есть дробление.
 Автоматическое дробление картограммы производится только в
 случае определения NGE=1 и IEOM=1,5 или 7.
 По умолчанию JDRO=0.

III. NAMELIST /DAN/

Оператор ввода NAMELIST /DAN/ содержит входную информацию, необходимую для проведения малогруппового расчета пространственного распределения плотности потока нейтронов.

1. ОПИСАНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

1.1 ГЕОМЕТРИЯ

NDM 2) Размерность расчетной модели.
 2 - двумерная расчетная модель;
 3 - трехмерная расчетная модель.
 По умолчанию NDM=2.

NGE 2) Геометрия расчетной ячейки в плане.
 1 - шестигранная;
 2 - квадратная;
 3 - треугольная.
 По умолчанию NGE=1.

ISDV 2) Тип симметрии
 0 - "поворотом" (зеркальное отражение относительно оси симметрии);
 1 - "сдвигом" (поворот сектора симметрии относительно центра симметрии на угол симметрии).
 По умолчанию ISDV=0.

IEOM 2) Сектор симметрии расчетной модели.
 1 - 360;
 2 - 180;
 3 - 120;
 4 - 90;
 5 - 60;
 6 - 45;
 7 - 30.
 По умолчанию IEOM=1.

NR1 2) Число рядов расчетных узлов в плоскости расчетной модели

| | |
|-----------------------|---|
| | (нумерация рядов осуществляется снизу вверх). |
| NR2 ²⁾ | Число расчетных узлов в вертикальном направлении (число плоскостей) для трехмерного расчета. По умолчанию NR2=1. |
| NS(NR1) ²⁾ | Количество расчетных ячеек в каждом ряду расчетной модели на плоскости. |
| H | Шаг расчетной ячейки в плоскости, см. |
| HZR(NR2) | Шаги расчетной модели по высоте для каждой плоскости. Для двумерного расчета - высота, на которой производится интегрирование по высоте результатов расчета (например, нормировка на мощность). |
| NTR | Расположение центральной треугольной ячейки в первом ряду на плоскости (только для NGE=3 и IEOM=1). 1 - вершиной вверх; -1 - вершиной вниз. По умолчанию NTR=1. |
| ISM | Количество расчетных ячеек на плоскости по нижней оси симметрии для расчетной модели с симметрией 120 и для случая, когда по второй оси симметрии на плоскости это число иное (в этом случае следует также задавать IEOM=-3). |

1.2 ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ

| | |
|-------------------|---|
| CAPZ(NT) | Геометрический параметр в нерасчетном направлении (при NDM=2). По умолчанию CAPZ(...)=0. |
| NSM(6) | Тип граничных условий на внешней границе расчетной модели. |
| NSM(1) - | левая граница в плоскости; |
| NSM(2) - | правая граница в плоскости; |
| NSM(3) - | нижняя граница в плоскости; |
| NSM(4) - | верхняя граница в плоскости; |
| NSM(5) - | нижняя торцевая граница; |
| NSM(6) - | верхняя торцевая граница. |
| NSM(i)=0 - | условие равенства нулю тока нейтронов на i-й границе. |
| NSM(i)=1 - | условие равенства нулю потока нейтронов (либо задаются значения логарифмической производной потока нейтронов) на i-й границе. |
| NLG ²⁾ | Признак задания логарифмических производных плотности потока на внешних границах модели. 0 - не задаются; 1 - задаются. |
| GAM(2NR1,NG) | Массив логарифмических производных плотности потока нейтронов на боковых границах расчетной модели (при NLG.NE.0). При NDM=3 предполагается, что значения GAM по высоте реактора не меняются. Значения GAM задаются по группам, а для каждой группы - по рядам: сначала для левой, а затем для правой границы. Для верхнего и нижнего рядов эти значения распространяются соответственно на левую и правую половину ряда. По умолчанию GAM(...)=0.9389... (граница с вакуумом). |
| GM(2,NG) | Массив логарифмических производных плотности потока нейтронов |

для нижнего - $GM(1,NG)$ и верхнего - $GM(2,NG)$ торцов расчетной модели (при $NLG.NE.0$ и $NDM=3$).
По умолчанию $GM(...)=0.9389...$ (граница с вакуумом).

1.3. СОСТАВ

- NT 2) Число физических зон ($NT=M1$, см. п. I. 2.1.)
- NF 2) Число физических зон, содержащих делящиеся нуклиды (зоны с делящимися нуклидами должны быть пронумерованы первыми).
- NK(K1) 2) Картограмма физических зон по пространственным узлам расчетной модели реактора.
- NK(i) - номер физической зоны для i -го расчетного узла, где $i=1, \dots, K1$;
 $K1=K2*N$ - общее число расчетных узлов в картограмме.
 $K2$ - число расчетных узлов в плоскости;
 N - число плоскостей с различными картограммами для трехмерной расчетной модели (число вводимых картограмм). Для трехмерной расчетной модели картограммы задаются по плоскостям, причем одинаковые для разных плоскостей картограммы можно задавать только один раз, их расстановка по высоте расчетной модели производится с помощью вектора $NSLZ$. После расстановки в соответствии со значениями вектора $NSLZ$ общее число расчетных узлов модели равно $K1=K2*NR2$.
- Нумерация физических зон для расчетных узлов в картограммах производится по плоскостям, а в плоскости по рядам, начиная с нижнего ряда; внутри ряда ячейки нумеруются слева направо. Для расчетных моделей с углами симметрии 120 и 60 для треугольной и гексагональной геометрий расчетных ячеек при симметрии поворотом ряда в плоскости нумеруются не снизу вверх, а под углом - от правого угла влево (см. приложение).
- Для расчетных моделей с углами симметрии 360 и 180 картограммы в плоскости должны иметь вертикальную ось симметрии.
- Нумерация физических зон в картограммах проводится в первую очередь для зон с делящимся материалом, а среди них - сначала для относящихся к активной зоне, а затем - к экранам; потом в том же порядке нумеруются зоны без делящегося материала - для активной зоны, для экранов и для остальных зон расчетной модели.
- NSLZ(NR2) 2) Вектор расстановки задаваемых (для плоскостей по высоте расчетной модели) картограмм физических зон.
Для двумерной модели следует определять $NSLZ(1)=1$.
По умолчанию $NSLZ(1)=1$.
- NA 2) Число изотопов, участвующих в расчете ($NA=NER1$, см. п. I. 2.1).
- NAD 2) Число делящихся изотопов, участвующих в расчете.
($NAD=NRED$, см. п. I. 2.1.)
- NAC(NA) 1) Массив номеров элементов, участвующих в расчете.
Массив NAC должен соответствовать массиву $SOSTAV$ (см. п. I. 2.1) и определяться при необходимости расчета коэффициента воспроизводства и/или выгорания в случае ввода в исходных данных массивов макро- и микроконстант. Если макро- и

микромконстанты рассчитываются внутри программы, массив NAC можно не вводить, он определяется автоматически.

1.4. ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАЗБИЕНИЕ

- NG ²⁾ Число энергетических групп исходной 26-групповой системы констант.
По умолчанию NG=26.
- MG ²⁾ Номер старшей группы, в которую имеются переводы нейтронов (матрица переводов). Номер старшей группы MG должен соответствовать величине NOG (MG=NOG, см. п. I. 2.2).
По умолчанию MG=11.
-
-

1.5. МАССИВЫ МАКРОСКОПИЧЕСКИХ КОНСТАНТ ¹⁾

- DIF(NT,NG) Массив коэффициентов диффузии, см.
- SAD(NT,NG) Массив макроскопических сечений увода нейтронов, см⁻¹.
- STR(NT,NG*
*(NG-1)/2) Массив макроскопических сечений перевода нейтронов из группы в группу в результате упругого и неупругого рассеяния, см⁻¹.
Порядок расположения сечений следующий: сначала вектор из NT значений для $\Sigma_{1 \rightarrow 2}$ (переводы из 1-ой группы во 2-ю), затем вектора из NT значений для $\Sigma_{1 \rightarrow 3}$, $\Sigma_{2 \rightarrow 3}$, $\Sigma_{1 \rightarrow 4}$, ..., $\Sigma_{1 \rightarrow NG}$, ..., $\Sigma_{NG-1 \rightarrow NG}$.
- SF(NF,NG) Массив макроскопических сечений деления, см⁻¹.
- SFN(NF,NG) Массив макроскопических сечений размножения, см⁻¹.
- XI(NG) Массив спектров нейтронов деления.
-
-

1.6. МОЩНОСТЬ

- PW Мощность реактора, МВт. Для двумерной модели нормировка на мощность производится без учета вклада от торцевых экранов.

2. МЕТОДЫ И ТОЧНОСТИ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА

2.1. МЕТОДЫ РАСЧЕТА

- JTR ²⁾ Признак выбора начального приближения.
1 - стандартное начальное приближение (начальное значение плотности потока по всем расчетным узлам задается равным 1);
0 - начальное приближение считывается с МД (режим продолжения счета).
По умолчанию JTR=1.
- JDRO ²⁾ Признак расчета с автоматическим дроблением гексагональной расчетной сетки на треугольную при проведении малогруппового расчета.
0 - нет дробления;
1 - есть дробление.

| | |
|------|--|
| | Автоматическое дробление картограммы производится только в случае определения $NGE=1$ и $IEOM=1$ или 7. |
| JML | <p>По умолчанию $JDRO=0$.</p> <p>Признак продолжения дробления треугольной расчетной сетки (каждая треугольная ячейка в плане дробится на 4 треугольника; таким образом, если $JML=1$, исходная гексагональная ячейка раздробится на 24 треугольника и т.д.). Признак определяется только в случае $JDRO.NE.0$.</p> <p>0 - нет дробления;</p> <p>.NE.0 - есть дробление JML раз.</p> |
| JFIN | <p>По умолчанию $JML=0$.</p> <p>Признак автоматического перехода от "грубой" расчетной сетки (1 расчетный узел на гексагональную ячейку в плане) к "более точной" расчетной сетке (6 расчетных узлов на ячейку в плане) с расчетом начального приближения для ускорения счета. Режим автоматического перехода к "точной" расчетной сетке выполняется только в случае определения $NGE=1$ и $IEOM=1, 7$.</p> <p>0 - нет автоматического перехода;</p> <p>1 - есть автоматический переход;</p> <p>2-7 признаки режимов продолжения счета в случае его прерываний на различных этапах расчета (для продолжения счета необходимо переопределить значение признака JFIN в соответствии со значением, напечатанным в выходной информации прерванного варианта).</p> |
| JJAP | <p>При определении $JFIN.NE.0$ следует определить $JDRO=0$.</p> <p>По умолчанию $JFIN=0$.</p> <p>Признак малогруппового расчета по японской методике. Расчет по японской методике проводится только в случаях $NGE=1,2$.</p> <p>0 - японская методика не используется;</p> <p>1 - расчет по японской методике.</p> <p>2 - продолжение расчета по японской методике.</p> |
| J2X | <p>По умолчанию $JJAP=0$.</p> <p>Метод, используемый во внутренних и внешних итерациях.</p> <p>0 - метод верхней релаксации для внутренних итераций;</p> <p>1 - метод прогнозируемого ускорения для внутренних итераций;</p> <p>2 - метод прогнозируемого ускорения для внешних итераций;</p> <p>3 - метод прогнозируемого ускорения для внутренних и внешних итераций.</p> |
| JEQF | <p>По умолчанию $J2X=0$.</p> <p>Признак изменения точности внутренних итераций по энергетическим группам (при $MAXI=0$).</p> <p>0 - во всех энергетических группах точность внутренних итераций равна $EPS1$;</p> <p>1 - точность внутренних итераций в каждой группе изменяется в зависимости от "ценности" ее вклада в источник деления.</p> |
| JEPV | <p>По умолчанию $JEQF=0$.</p> <p>Признак согласования точностей расчета по внутренним итерациям с ходом сходимости внешнего итерационного процесса. Согласование используется для ускорения общего многослойного итерационного процесса.</p> |

| | | |
|-----------|-----|--|
| | 0 - | нет согласования; |
| | 1 - | есть согласование. |
| AEPV | | По умолчанию JEPV=0. Параметр, согласующий точность расчета по внутренним итерациям со сходимостью внешнего итерационного процесса. Используется при JEPV.NE.0. Оптимальная величина AEPV зависит от типа рассчитываемого реактора. При расчете быстрых реакторов рекомендуемое значение AEPV=0.3. |
| JUCH | | По умолчанию AEPV=0.3. Признак ускорения внешних итераций методом двухслойной Чебышевской экстраполяции (в случае определения J2X=0). |
| | 0 - | нет ускорения; |
| | 1 - | есть ускорение. |
| ACH | | По умолчанию JUCH=0. Значение ускоряющего параметра метода двухслойной Чебышевской экстраполяции. Рекомендуемое значение ACH=0.9. |
| NBLN | | По умолчанию ACH=0.9. Размерность массива последовательности ускоряющих параметров для метода двухслойной Чебышевской экстраполяции. Рекомендуемое значение NBLN=20. |
| BLN(NBLN) | | Массив последовательности ускоряющих параметров метода двухслойной Чебышевской экстраполяции. Рекомендуемая последовательность ускоряющих параметров определена в программе с помощью оператора DATA. |
| IT | | Признак расчета ускоряющих параметров метода верхней релаксации: |
| | 0 - | рассчитываются; |
| .NE.0 - | | вводятся или считываются с МД (режим продолжения счета). По умолчанию IT=0. |
| OM(NG) | | Значения ускоряющих параметров метода точечной верхней релаксации (в случае ввода в качестве входных параметров). |
| ITE | | Число внутренних итераций, необходимых для определения ускоряющих параметров метода верхней релаксации. По умолчанию ITE=5. |

2.2. ТОЧНОСТИ РАСЧЕТА

| | | |
|---------|-----|---|
| EPS1 | | Точность внутренних итераций По умолчанию EPS1=0.0005. |
| EPS2 | | Точность внешних итераций по Keff. По умолчанию EPS2=0.0005. |
| EPS3 | | Точность внешних итераций по локальным значениям источника деления. По умолчанию EPS3=0. |
| MAXI | | Число внутренних итераций в каждой группе: |
| | 0 - | внутренние итерации заканчиваются при достижении точности EPS1; |
| .NE.0 - | | в каждой энергетической группе делается MAXI внутренних итераций на одну внешнюю. По умолчанию MAXI=0. |

EPJS Точность внутренних итераций для метода прогнозируемого ускорения. Рекомендуемая точность EPJS=0.1.
По умолчанию EPJS=0.1.

EPJQ Точность определения параметров метода прогнозируемого ускорения для внешних итераций. Рекомендуемая точность EPJQ=0.08.
По умолчанию EPJQ=0.08.

3. РАСЧЕТНЫЕ ОПЦИИ И ПЕЧАТЬ

3.1 ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ

NNAZ Номер плоскости, соответствующей началу активной зоны, для трехмерной расчетной модели (NDM=3). Номер плоскости определяется в случае необходимости расчета коэффициентов неравномерности (KR) полей энерговыделения, интегральных по высоте расчетной модели в соответствии с указанием массива JPLH, и интегрального по всей высоте расчетной модели.
0 - нет расчета;
.NE.0 - есть расчет.
По умолчанию NNAZ=0.

NCAZ Номер плоскости, соответствующей центру активной зоны для трехмерной расчетной модели (NDM=3). Номер плоскости определяется в случае необходимости расчета коэффициента неравномерности (KRAZ) поля энерговыделения по центральной плоскости активной зоны.
0 - нет расчета;
.NE.0 - есть расчет (KRAZ).
По умолчанию NCAZ=0.

JTV Признак расчета коэффициентов чувствительности Кэфф по теории возмущений (ТВ) и чувствительности дробно-линейных функционалов по обобщенной теории возмущений (ОТВ). Все коэффициенты чувствительности рассчитываются по отношению к изменениям концентраций изотопов и размеров реактора.
0 - нет расчета ТВ и ОТВ;
1 - есть расчет ТВ;
2 - режим продолжения счета для ТВ;
3 - режим продолжения счета для ОТВ (расчет неоднородной сопряженной задачи).
По умолчанию JTV=0.

JUPBN Признак расчета временного изменения изотопного состава и пространственного распределения поля энерговыделения.
0 - нет расчета;
1 - есть расчет.
По умолчанию JUPBN=0.

JAP1 Признак расчета и печати коэффициентов неравномерности поля энерговыделения по тепловыделяющим сборкам Ктвс при использовании японской методики (в случае JJAP.NE.0 и NGE=1).
0 - нет расчета и печати;

- 1 - есть только расчет $K_{твс}$ для каждой тепловыделяющей сборки без печати;
- 2 - есть расчет $K_{твс}$ и печать только максимального значения $K_{твс}$ по реактору;
- 3 - есть расчет $K_{твс}$, печать при $JAP1=2$ и печать максимальных значений $K_{твс}$ по физическим зонам реактора с различным делящимся составом;
- 4 - есть расчет $K_{твс}$, печать при $JAP1=3$ и печать картограммы $K_{твс}$ по тепловыделяющим сборкам.
 Для каждой тепловыделяющей сборки рассчитываются 19 значений $K_{твс}$ в дополнительных узлах.
 По умолчанию $JAP1=0$.
- JAP2 Признак расчета и печати максимальных значений энерговыделений по тепловыделяющим сборкам (на основе $K_{твс}$, см. определение $JAP1$) при использовании японской методики (в случае $JJAP.NE.0$ и $NGE=1$).
- 0 - нет расчета и печати;
- 1 - есть расчет и печать максимальных интегральных энерговыделений по активной зоне, экранам и реактору;
- 2 - есть расчет; печать при $JAP2=1$ и печать картограммы максимальных значений энерговыделений по тепловыделяющим сборкам.
 По определению $JAP2=0$.
- PIST Признак расчета с заданным дополнительным внешним источником (внешний источник задается в малогрупповой части расчета, когда уже окончательно готовы все константы).
- 0 - нет внешнего источника;
- >0 - внешний источник задается.
 По умолчанию $PIST=0$.
- KXR Признак выгонки на заданное $K_{эфф}$ с помощью изменения концентрации топлива.
- 0 - нет выгонки;
- 1 - есть выгонка.
 По умолчанию $KXR=0$.
- EFR Значение $K_{эфф}$, на которое следует выгонять задачу.
 Задается в случае $KXR>0$.
- EPSR По умолчанию $EFR=1$.
 Точность выгонки на значение EFR .
 Задается в случае $KXR>0$.
- ALFR По умолчанию $EPSR=0.00001$).
 Коэффициент чувствительности $K_{эфф}$ к обогащению по топливу.
 Задается в случае $KXR>0$.
- KNR По умолчанию $ALFR=0.5$).
 Количество зон с делением, с помощью которых производится выгонка на заданное значение $K_{эфф}$.
 Задается в случае $KXR>0$.
- KONR(KNR) Перечень номеров зон с делением, с помощью которых производится выгонка на заданное значение $K_{эфф}$.
 Задается в случае $KXR>0$.

3.2. ПЕЧАТЬ

| | |
|-----------|---|
| JFIZ | Признак печати картограммы с расстановкой номеров зон по расчетным ячейкам. 0 - нет печати; 1 - есть печать; По умолчанию JFIZ=0. |
| JNUM | Признак печати картограммы с нумерацией расчетных ячеек. 0 - нет печати; 1 - есть печать; По умолчанию JNUM=0. |
| JPRI | Признак печати групповых макро- и микроконстант для списка элементов массива NSPEL (см. п. IV. 1.1.). 0 - нет печати; 1 - печать макроконстант; 2 - печать микроконстант. По умолчанию JPRI=1. |
| IPR | Признак печати пространственных распределений энерговыделения и нормированных значений плотности потока нейтронов по группам: 0 - нет печати; 1 - печать картограммы энерговыделения; 2 - печать при IPR=1 и печать картограмм нормированной на мощность плотности потока нейтронов; 3 - печать при IPR=2 и печать картограмм нормированной на единицу плотности потока нейтронов. По умолчанию IPR=1. |
| NPRH | Признак печати интегральных по высоте трехмерной модели (NDM=3) энерговыделений и радиальных коэффициентов неравномерности (KR) поля энерговыделения. 0 - нет печати; .NE.0 - есть печать. По умолчанию NPRH=0. |
| JPRW(NR2) | Массив признаков печати пространственных распределений энерговыделения и плотности потока нейтронов по группам в соответствии с определением величины IPR для трехмерной расчетной модели (NDM=3). JPRW(J)=0 - нет печати; JPRW(J)=1 - есть печать для J-ой плоскости по высоте трехмерной расчетной модели. По умолчанию JPRW(...)=1. |
| JPLH(NR2) | Вектор-метка плоскостей, входящих в интеграл по высоте трехмерной расчетной модели (NDM=3) для печати интегральных энерговыделений и радиальных коэффициентов неравномерности (KR) в случае определения NPRH.NE.0. JPLH(i)=0 - i-я плоскость не входит в интеграл по высоте JPLH(i)=K - i-я плоскость входит в K-ый интеграл по высоте расчетной модели (K=1,...,NPRH; K - индекс зоны по высоте расчетной модели; сначала - активной зоны, экранов и т.д.). По умолчанию JPLH(...)=0. |

KPR Число узлов на плоскости, лежащих в основании вертикальных направлений, по которым необходимо вывести на печать распределение по высоте реактора интегрального по энергии значения плотности потока нейтронов (без нормировки на мощность). По каждому из выбранных вертикальных направлений выводится NR2 значений плотности потока нейтронов. Максимальное значение KPR=10.

KPRM(KPR) По умолчанию KPR=0. Массив номеров расчетных узлов на плоскости, лежащих в основании вертикальных направлений, по которым необходимо вывести на печать распределение по высоте реактора интегрального по энергии значения плотности потока нейтронов. Задается в случае KPR>0. KPRM(I)=J, I=1,...KPR; J=1,...,K2.

!!

- 1) параметры необходимо вводить только в случае работы программы с вводимыми макроконстантами (JPRO=-1).
- 2) параметры необходимо вводить только в случае работы программы с вводимыми макроконстантами (JPRO=-1). При определении JPRO=3 данные параметры должны быть определены в операторе ввода NAMELIST /D26/ и повторно могут не вводиться.

В случае необходимости расчета коэффициентов воспроизводства и/или выгорания при работе программы с вводимыми макроконстантами наряду с определением массива NAC необходимо определить в операторе NAMELIST /OBR/ массивы групповых микросечений SIG и концентрации ROAR и ROEL.

!!

IV. NAMELIST /OBR/

Оператор ввода NAMELIST /OBR/ содержит входную информацию, необходимую для работы обрабатывающих подпрограмм, рассчитывающих коэффициенты неравномерности поля энерговыделения, коэффициент воспроизводства и его составляющие, скорости реакций и т.п.

1. ОПИСАНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

1.1. СОСТАВ

NAZ Число физических зон с делящимся материалом, относящихся к активной зоне реактора. При определении NAZ<0 работа всех обрабатывающих подпрограмм блокируется, поэтому всю последующую входную информацию оператора ввода NAMELIST /OBR/ определять не нужно.

NTNZ(K)=4- k-я физическая зона принадлежит реактору;
 =1 - активной зоне;
 =2 - боковому экрану;
 =3 - торцевому экрану.
 По умолчанию NTNZ(...)=0.

NKSF(JKSF) Массив номеров физических зон для топливных компенсаторов (при JKSF.NE.0).
 По умолчанию NKSF(...)=0.

DOL(NAD) Массив весов делящихся нуклидов для расчета избыточного коэффициента воспроизводства (ИКВ).
 По умолчанию DOL(...)=1.

ROAR(NA,NT)¹⁾ Массив концентраций нуклидов (в случае необходимости расчета скоростей реакций и КВ при вводе в исходных данных массивов констант).

ROEL(NAD,NF)¹⁾ Массив концентраций делящихся нуклидов по физическим зонам с делящимся материалом (в случае необходимости расчета выгорания при вводе в исходных данных массивов констант).

SIG(NT,NG, (NDEL+NA+2))¹⁾ Массив микросечений деления и захвата (в случае необходимости расчета скоростей реакций и КВ при вводе в исходных данных массивов констант).
 Порядок расположения сечений следующий: в массив заносятся вектора из NT чисел, объединенные в блоки по числу (NG) энергетических групп; сначала, для первого элемента из списка NSPEL засылается микроскопическое сечение захвата, затем - деления; далее - то же самое для 2-го элемента из списка NSPEL и т.д.
 После заполнения сечений для делящихся элементов заполняются микроскопические сечения захвата для остальных элементов из списка NSPEL. В конце массива также заполняются макроскопические сечения: сначала захвата, потом деления.

2. РАСЧЕТНЫЕ ОПЦИИ И ПЕЧАТЬ

2.1 РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ НЕРАВНОМЕРНОСТИ, КВ И СКОРОСТЕЙ РЕАКЦИЙ

NKR Признак режима расчета коэффициентов неравномерности поля энерговыделения.
 NKR - трехзначное число: разряд единиц относится к активной зоне, разряд десятков - к экранам, разряд сотен - к реактору.
 Каждый разряд принимает значение 0 или 1.
 0 - нет расчета;
 1 - есть расчет.
 По умолчанию NKR=111.

NKV Признак режима расчета КВ.
 NKV - двухзначное число: разряд единиц относится к активной зоне, разряд десятков - к реактору.
 Каждый разряд принимает значение 0 или 1.
 0 - нет расчета;

1 - есть расчет.
 По умолчанию NKV=111.
 NMKR Признак расчета и печати нормированных на максимальное значение скоростей реакций захвата и деления.
 0 - нет расчета;
 1 - есть расчет и печать для элементов списка NSPEL;
 2 - расчет при NMKR=1 и дополнительно - для макроскопических свойств.
 По умолчанию NMKR=0.

2.2.

ПЕЧАТЬ

JPFZ(NT) Массив признаков печати скоростей реакций и одногрупповых констант для элементов списка NSPEL по физическим зонам.
 JPFZ(K)=0 - нет печати;
 JPFZ(K)=1 - есть печать для K-ой физической зоны.
 При JPFZ(...)=0 на печать выводятся только интегралы по активной зоне, экранам и реактору.
 По умолчанию JPFZ(...)=0.

!!

1) параметры задаются только в случае работы программы с вводимыми макроконстантами (JPRO=-1) при необходимости расчета коэффициента воспроизводства, его составляющих и выгорания топлива.

!!

V. NAMELIST /TVZ/

Оператор ввода NAMELIST /TVZ/ содержит входную информацию, необходимую для расчета коэффициентов чувствительности (КЧ) $K_{эфф}$ к изменению концентраций элементов и размеров реактора по теории возмущений (ТВ).

1. ОПИСАНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

1.1 ГЕОМЕТРИЯ

HRR 1) Значение высоты реактора (активной зоны) для интегрирования КЧ в случае двумерной расчетной модели (NDM=2).
 По умолчанию HRR=HZR(1).

1.2. СОСТАВ

NCOM Число элементов, для изменения концентраций которых рассчитываются значения КЧ.
 0 - нет расчета;
 .NE.0 - есть расчет для NCOM изотопов.
 Максимальное значение величины NCOM равно NA.
 По умолчанию NCOM=NAD.

NRO(NCOM) 1) Массив номеров элементов, для которых рассчитываются КЧ.
По умолчанию NRO(...)=NAC(NAD).

2. МЕТОДЫ И ТОЧНОСТИ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА

2.1. МЕТОДЫ РАСЧЕТА

- JTV1 1) Признак режима работы при расчете КЧ для Кэфф.
1 - начало работы;
2 - продолжение расчета.
По умолчанию JTV1=1.
- JT1 1) Признак выбора начального приближения для расчета сопряженной функции.
0 - начальное приближение считывается с МД (режим продолжения счета);
1 - используется стандартное начальное приближение (сопряженная функция по всем узлам задается равной 1).
По умолчанию JT1=1.
- JJAR 1)2) Признак малогруппового расчета по японской методике. Расчет по японской методике проводится только в случаях NGE=1,2.
0 - японская методика не используется;
1 - расчет по японской методике.
2 - продолжение счета по японской методике.
По умолчанию JJAR=0.
- J2X 1)2) Метод, используемый во внутренних и внешних итерациях.
0 - метод верхней релаксации для внутренних итераций;
1 - метод прогнозируемого ускорения для внутренних итераций;
2 - метод прогнозируемого ускорения для внешних итераций;
3 - метод прогнозируемого ускорения для внутренних и внешних итераций.
По умолчанию J2X=0.
- JUCH 1)2) Признак ускорения внешних итераций методом двухслойной чебышевской экстраполяции (в случае определения J2X=0).
0 - нет ускорения;
1 - есть ускорение.
По умолчанию JUCH=0.
- JEQ1 1) Аналогично по смыслу JEQF (см. п. III. 2.1.) при расчете сопряженной задачи.
По умолчанию JEQ1=JEQF.
- JEQ2 1) Аналогично по смыслу JEQF (см. п. III. 2.1.) при расчете неоднородной сопряженной задачи.
По умолчанию JEQ2=JEQF.

2.2. ТОЧНОСТИ РАСЧЕТА

MAXI 1)2) Число внутренних итераций в каждой группе:

- 0 - внутренние итерации заканчиваются при достижении точности EPS1
- .NE.0 - в каждой энергетической группе делается не более чем MAXI внутренних итераций на одну внешнюю.
По умолчанию MAXI=0.

3. РАСЧЕТНЫЕ ОПЦИИ И ПЕЧАТЬ

3.1 РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ.

- JTV2 1) Признак режимов работы при расчете по обобщенной теории возмущений (ОТВ) коэффициентов чувствительности для дробно-линейных функционалов.
0 - нет расчета по ОТВ;
1 - начало расчета по ОТВ;
2 - продолжение расчета по ОТВ (КЧ для Кэфф уже рассчитаны).
По умолчанию JTV2=0.
- JTVB 1) Признак повторного расчета КЧ после расчета выгорания топлива (в случае определения JUPBN.NE.0, см. п. III. 3.1.)
0 - нет расчета;
1 - начало повторного расчета;
2 - продолжение повторного расчета.
По умолчанию JTVB=0.
- NSIG 1) Число дробно-линейных функционалов при расчете по ОТВ (в случае определения JTV2.NE.0).
По умолчанию NSIG=1.

3.2. ПЕЧАТЬ

- JPFS 1) Признак печати сопряженного решения.
0 - нет печати;
1 - есть печать.
В случае трехмерной расчетной модели (NDM=3) печать производится в соответствии с определением массива JPRW (см п. III. 3.2.).
По умолчанию JPFS=0.
- NPR1 Признак печати КЧ по компонентам (размножение, захват, диффузия, переводы нейтронов и т.п.)
0 - нет печати;
1 - есть печать.
По умолчанию NPR1=0.
- NPR2 Признак печати пространственного распределения КЧ.
0 - нет печати;
1 - есть печать.
По умолчанию NPR2=0.
- NPR3 Признак печати интегральных по физическим зонам и реактору значений КЧ.

0 - нет печати;
 1 - есть печать.
 По умолчанию NPR3=1.
 NPR4 Признак печати КЧ для изменения размеров реактора (вариация сечений равна изменению макросвойств среды).

0 - нет печати;
 1 - есть печать.
 По умолчанию NPR4=1.
 NRO1(21) ¹⁾ Массив признаков печати КЧ по элементам.
 NRO1(K) - признак печати для K-го элемента из списка массива
 NRO:

0 - нет печати;
 1 - есть печать.

Компонента массива NRO1(21) является признаком расчета и печати различных интегралов теории возмущений (ТВ):

0 - нет расчета интегралов ТВ;
 1 - есть расчет, нет печати;
 2 - есть расчет и печать интеграла по объему FI*FI+;
 3 - есть расчет и печать интегралов по объему FI*FI+ и FI*Q+;
 4 - расчет и печать при NRO1(21)=3 и печать интеграла по объему $D \text{ grad FI} * D \text{ grad FI}+$;
 где FI - плотность потока нейтронов,
 FI+ - сопряженная функция,
 Q+ - сопряженный источник.
 По умолчанию NRO1(...)=0.

!!

- 1) в случае определения NCOM=0 параметры могут не вводиться
- 2) параметры относятся только к расчету сопряженной задачи;
 в случае сохранения их значений, заданных в NAMELIST /DAN/, указанные параметры можно не вводить.

!!

VI. NAMELIST /TVZB/

Оператор ввода NAMELIST /TVZB/ определен с целью возможности проведения повторного расчета коэффициентов чувствительности после расчета выгорания топлива, таким образом ввод входной информации данного оператора имеет смысл только в случае определения JTV.NE.0 и JUPBN.NE.0.

Вся входная информация данного оператора повторяет входную информацию оператора ввода NAMELIST /TVZ/, поэтому в NAMELIST /TVZB/ следует вводить только параметры, отличающиеся от входной информации в NAMELIST /TVZ/.

VII. NAMELIST /VNESH/

Оператор ввода NAMELIST /VNESH/ содержит входную информацию, необходимую для проведения малогруппового расчета с внешним источником.

Оператор ввода NAMELIST /VNESH/ нужно располагать после NAMELIST /TVZ/ столько раз, сколько задано групп для малогруппового расчета.

RT(K1) Внешний источник по всем узлам для одной группы
(порядок перебора узлов стандартный).

VIII. NAMELIST /OTVZ/

Оператор ввода NAMELIST /OTVZ/ содержит входную информацию, необходимую для решения неоднородной сопряженной задачи с источником и расчета по обобщенной теории возмущений (ОТВ) коэффициентов чувствительности для заданных дробно-линейных функционалов (ДЛФ).

1. ОПИСАНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

1.1. СОСТАВ

| | |
|--------------|--|
| IZV | Число физических зон в делителе ДЛФ. По умолчанию IZV=NF. |
| NVS | Массив номеров физических зон в делителе ДЛФ. По умолчанию NVS(...)=1,...,NF. |
| IZD | Число физических зон в знаменателе ДЛФ. По умолчанию IZD=NF. |
| NDL(IZD) | Массив номеров физических зон в знаменателе ДЛФ. По умолчанию NDL(...)=1,...,NF. |
| INV | Число элементов в числителе ДЛФ. По умолчанию INV=NVEL. |
| NAVS(INV) | Массив номеров элементов для числителя ДЛФ. По умолчанию NAVS(...)=NVOS(...). |
| IND | Число элементов в знаменателе ДЛФ. По умолчанию IND=NGEL. |
| NADL(IND) | Массив номеров элементов для знаменателя ДЛФ. По умолчанию NADL(...)=NGOR(...). |
| VVS(IZV,INV) | Массив весов элементов по физическим зонам для числителя ДЛФ. По умолчанию VVS(...)=1. |
| VDL(IZD,IND) | Массив весов элементов по физическим зонам для знаменателя ДЛФ. По умолчанию VDL(...)=1. |
| NTP1 | Признак типа микросечений, используемых в числителе ДЛФ. 1 - сечение захвата без деления; 2 - сечение деления; |

| | | |
|------|-----|--|
| NTP2 | 3 - | сечение захвата с делением. По умолчанию NTP1=1. |
| | | Признак типа микросечений, используемых в знаменателе ДЛФ. |
| | 1 - | сечение захвата без деления; |
| | 2 - | сечение деления; |
| | 3 - | сечение захвата с делением. По умолчанию NTP1=3. |

1.2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАЗБИЕНИЕ

| | |
|------|--|
| IGV | Число энергетических групп для числителя ДЛФ. По умолчанию IGV=NG. |
| IGVN | Номер начальной энергетической группы для числителя ДЛФ. В числителе, начиная с энергетической группы с номером IGVN, используется IGV групп. По умолчанию IGVN=1. |
| IGD | Число энергетических групп для знаменателя ДЛФ. По умолчанию IGD=NG. |
| IGDN | Номер начальной энергетической группы для знаменателя ДЛФ. В знаменателе, начиная с энергетической группы с номером IGDN, используется IGD групп. По умолчанию IGDN=1. |

2. МЕТОДЫ И ТОЧНОСТИ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА

2.1. МЕТОДЫ РАСЧЕТА

| | |
|---------|---|
| JJAP | Признак малогруппового расчета по японской методике. Расчет по японской методике проводится только в случае NGE=1. 0 - японская методика не используется; 1 - расчет по японской методике; 2 - продолжение счета по японской методике. По умолчанию JJAP=0. |
| J2X 1) | Метод, используемый во внутренних и внешних итерациях. 0 - метод верхней релаксации для внутренних итераций; 1 - метод прогнозируемого ускорения для внутренних итераций; 2 - метод прогнозируемого ускорения для внешних итераций; 3 - метод прогнозируемого ускорения для внутренних и внешних итераций. По умолчанию J2X=0. |
| JUCH 1) | Признак ускорения внешних итераций методом двухслойной чебышевской экстраполяции (в случае определения J2X=0). 0 - нет ускорения; 1 - есть ускорение. По умолчанию JUCH=0. |
| JEQ2 1) | Аналогично по смыслу JEQF (см. п. III. 2.1.) при решении неоднородной сопряженной задачи. По умолчанию JEQ2=JEQF. |

2.2. ТОЧНОСТИ РАСЧЕТА

- MAXI 1) Число внутренних итераций в каждой группе:
0 - внутренние итерации заканчиваются при достижении точности EPS1
.NE.0 - в каждой энергетической группе делается MAXI внутренних итераций на одну внешнюю.
По умолчанию MAXI=0.
EPS1 Точность внутренних итераций при решении неоднородного сопряженного уравнения с источником.
Рекомендуемая точность EPS1=0.01÷0.001.
По умолчанию EPS1=0.001.
EPS2 Точность внешних итераций при решении неоднородного сопряженного уравнения с источником. Рекомендуемая точность EPS2=0.001÷0.0001.
По умолчанию EPS2=0.001.

3. РАСЧЕТНЫЕ ОПЦИИ И ПЕЧАТЬ

3.1. ПЕЧАТЬ

- NRO1(21) 1) Массив признаков печати КЧ по элементам.
NRO1(K) - признак печати для K-го элемента из списка массива
NRO:
0 - нет печати;
1 - есть печать.
- Компонента массива NRO1(21) является признаком расчета и печати различных интегралов теории возмущений (ТВ):
0 - нет расчета интегралов ТВ;
1 - есть расчет, нет печати;
2 - есть расчет и печать интеграла по объему FI*FI+;
3 - есть расчет и печать интегралов по объему FI*FI+ и FI*Q+;
4 - расчет и печать при NRO1(21)=3 и печать интеграла по объему $D \text{ grad FI} * D \text{ grad FI}+$;
где FI - плотность потока нейтронов,
FI+ - сопряженная функция,
Q+ - сопряженный источник.
По умолчанию NRO1(...)=0.

!!

- 1) параметры относятся только к неоднородной сопряженной задаче;
в случае сохранения их значений, заданных в NAMELIST /DAN/, указанные параметры можно не вводить.

Входные параметры, указанные в описании NAMELIST /OTVZ/ должны приводиться для каждого из задаваемых дробно-линейных функционалов, т.е. NSIG раз (см. описание к

NAMELIST /TVZ/). После ввода входных параметров для первого функционала, для последующих функционалов можно вводить только изменяемые параметры.
 !!!

IX. NAMELIST /UPBN/

Оператор ввода NAMELIST /UPBN/ содержит входную информацию, необходимую только при расчете временного изменения изотопных полей и поля энерговыделения.

2.1. ОПИСАНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

2.1.1. СОСТАВ

| | |
|-----------------|--|
| NCP | Число изотопов в цепочке выгорания, для которых пересчитываются концентрации. |
| NCP1(NCP) | Массив номеров элементов в цепочке выгорания. На последнем месте цепочки выгорания помещается номер изотопа, соответствующий осколкам деления. |
| ALA(NCP-1) | Массив постоянных распада изотопов. |
| WAYS(4,NCP-1) | Двумерный массив вероятностей выходов возможных реакций образования изотопов, выраженных в целых процентах. Для каждого изотопа должно быть задано четыре числа-идентификатора: (i,j,k,l) , которые принадлежат интервалу $[0,100]$, где i - вероятность образования изотопа через захват нейтрона; j - вероятность образования изотопа путем β^+ распада; k - вероятность образования изотопа путем β^- распада; l - вероятность образования изотопа путем α распада. Если вероятность задана равной 99%, то это эквивалентно заданию 100%. |
| ICHAIN(3,NCP-1) | Двумерный массив, описывающий образования изотопов по каналам, определенным в идентификаторе WAYS. Массив ICHAIN состоит из трех чисел-идентификаторов для каждого изотопа (n,m,p) , где n - порядковый номер изотопа в списке; m - натуральное число, количество разрядов которого совпадает с количеством путей образования изотопа. Каждый разряд определяет одну из реакций, образующих рассматриваемый изотоп: 1 - радиационный захват; 2 - β^+ реакция; 3 - β^- реакция; 4 - α распад. 5 - $(n,2n)$ реакция. Таким образом, m может иметь от одного до четырех разрядов, заполненных целыми цифрами из интервала $[1,5]$; p - идентификатор, содержащий порядковые номера изотопов- |

предшественников, из которых получается изотоп с порядковым номером n при помощи реакций, описанных в идентификаторе m , соответственно. Идентификатор p должен содержать четное количество разрядов (по два разряда на изотоп).

| | |
|--------------------------|--|
| JKSF ¹⁾ | Признак наличия в реакторе топливных компенсаторов реактивности. Признак вводится при расчете KR только по тепловыделяющим сборкам (без учета топливных компенсаторов). |
| 0 - | нет компенсаторов; |
| .NE.0 - | в активной зоне находится JKSF типов топливных компенсаторов. По умолчанию JKSF=0. |
| NKSF(JKSF) ¹⁾ | Массив номеров физических зон для топливных компенсаторов (при JK.NE.0). По умолчанию NKSF(...)=0. |
| JVKG ²⁾ | Признак наличия в расчетной модели тепловыделяющих сборок с внутрикассетной гетерогенностью (ТВС ВКГ-типа). |
| 0 - | нет ТВС ВКГ-типа; |
| .NE.0 - | присутствует JVKG штук ТВС ВКГ-типа. |
| NVK1(JVKG) ²⁾ | Массив номеров физических зон с ТВС ВКГ-типа. |
| EVME(JVKG) ²⁾ | Массив объемных долей сырьевого топлива в ТВС ВКГ-типа. |
| EPLU ²⁾ | Массив изотопного состава плутония в топливе ТВС ВКГ-типа. Предполагается, что изотопный состав плутония одинаков для всех ТВС ВКГ-типа. |
| XME9(JVKG) ²⁾ | Массив обогащений по изотопам плутония 239 и 241 сырьевого топлива в ТВС ВКГ-типа (в долях). |
| ETO(JVKG) ²⁾ | Массив объемных долей топлива в ТВС ВКГ-типа. |
| ROME(JVKG) ²⁾ | Массив эффективных ядерных концентраций сырьевого топлива в ТВС ВКГ-типа. Расчет концентраций сырьевого топлива осуществляется по следующей формуле: $r(i)=ROME(i)*ETO(i)$, где i - номер зоны с ТВС ВКГ-типа. |
| XU5 ²⁾ | Величина обогащения по урану-235 сырьевого топлива в ТВС ВКГ-типа. Предполагается, что содержание урана-235 в сырьевом топливе одинаково для всех ТВС ВКГ-типа. |

2.2 МЕТОДЫ И ТОЧНОСТИ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА

2.2.1. МЕТОДЫ РАСЧЕТА

| | |
|------|--|
| JJAP | Признак использования японской методики при расчете выгорания. |
| 0 - | японская методика не используется; |
| 1 - | японская методика используется. |
| | По умолчанию JJAP=0. |

2.2.2. ТОЧНОСТИ РАСЧЕТА

| | |
|-----|---|
| EPS | Точность решения системы дифференциальных уравнений методом |
|-----|---|

Рунге-Кутта при расчете изменения изотопного состава.
По умолчанию EPS=0.001.

2.3. РАСЧЕТНЫЕ ОПЦИИ И ПЕЧАТЬ

2.3.1 РАСЧЕТ ВРЕМЕННОГО ИЗМЕНЕНИЯ ИЗОТОПНЫХ ПОЛЕЙ И ПОЛЯ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ

| | |
|---------------|---|
| T | Суммарный временной интервал выгорания (в сутках), в течение которого рассчитываются изменения изотопного состава. |
| NDT | Число шагов выгорания внутри интервала времени T. В течение интервала времени $t=T/NDT$ изотопный состав считается неизменным, по истечении каждого интервала t он пересчитывается. |
| HX | Начальный шаг интегрирования (в сутках). По умолчанию HX=0.001. |
| T_USR | Интервал выдачи результатов в файл. Он должен соответствовать задаваемым в начале (T,NDT). |
| JFMAX | Признак режима расчета изменения изотопного состава. 0 - расчет в средней плотности потока нейтронов; 1 - расчет в средней и в максимальной плотности потока нейтронов. По умолчанию JFMAX=0. |
| HZR(2+NT*NDT) | Массив признаков режима изменения значений геометрического параметра CAPZ(NT) (см. п. III. 1.2. в [1]) по временным шагам выгорания (в случае определения NDM=2, см. п. III. 1.1.). |
| HZR(1) - | значение ячейки массива аналогично его определению в п. III. 1.1. |
| HZR(2)=0 - | геометрический параметр в процессе выгорания не изменяется (аналогичен определению в п. III. 1.1.); |
| HZR(2)=1 - | необходим перерасчет значений геометрического параметра на шагах выгорания. В этом случае компоненты массива HZR в ячейках от HZR(3) до HZR(2+NT) задаются равными значениям $CAPZ(K)^t$ в конце кампании. На временном шаге t значение параметра CAPZ(K) рассчитывается с помощью следующей интерполяционной формулы: $CAPZ(K)^t = CAPZ(K)^{t-1} + (CAPZ(K)^t - CAPZ(K)^0) / NDT$; где: K - номер физической зоны в массиве CAPZ; $CAPZ(K)^0$ - значения геометрического параметра в начале кампании (определенные в п. III. 1.2.); |
| HZR(2)=2 - | геометрические параметры по физическим зонам задаются для всех шагов выгорания. В этом случае компоненты массива HZR в ячейках от HZR(3) до HZR(NT*NDT+2) должны содержать информацию о геометрических параметрах по шагам выгорания (вектор из NT чисел на каждый шаг). По умолчанию HZR(2)=0. |
| NNAZ 1) | Номер плоскости, соответствующей началу активной зоны, для трехмерной расчетной модели (NDM=3). Номер плоскости определяется в случае необходимости расчета коэффициентов неравномерности (KR) полей энерговыделения, интегральных по высоте расчетной модели в соответствии с указанием массива JPLH, |

| | | |
|---------|---------|--|
| | | и интегрального по всей высоте расчетной модели. |
| | 0 - | нет расчета; |
| | .NE.0 - | есть расчет. По умолчанию NNAZ=0. |
| NCAZ 1) | | Номер плоскости, соответствующей центру активной зоны для трехмерной расчетной модели (NDM=3). Номер плоскости определяется в случае необходимости расчета коэффициента неравномерности (KРаз) поля энерговыделения по центральной плоскости активной зоны. |
| | 0 - | нет расчета; |
| | .NE.0 - | есть расчет (KРаз). |

2.3.2. ПЕЧАТЬ

| | | |
|-----------|-----|--|
| JPRN(NDT) | | Массив признаков печати результатов расчета по временным интервалам. Для k-го интервала времени значение JPRN(K) означает: |
| | 0 - | нет печати; |
| | 1 - | печать поля энерговыделения; |
| | 2 - | печать поля энерговыделения KR и KB; |
| | 3 - | печать поля энерговыделения KR, KB, избыточного коэффициента воспроизводства и его составляющих. |
| JDPAS | | Признак режима печати максимальных значений флюенса нейтронов и уровня радиационных повреждений по физическим зонам, относящихся к активной зоне и экранам, для трехмерной расчетной модели (в случае определения NDM=3, и JDPA.NE.0, см. п. I. 3.1. и III. 1.1.). |
| | 0 - | печать в каждой плоскости по высоте расчетной модели, |
| | 1 - | печать только максимальных значений. По умолчанию JDPAS=0. |
| JDPT(NDT) | | Массив признаков печати флюенса нейтронов и уровня радиационных повреждений по временным шагам выгорания (в случае определения JDPA.NE.0, см. п. I. 3.1.). Для K-го временного шага значение JDPT(K) означает: |
| | 0 - | нет печати; |
| | 1 - | печать флюенса нейтронов; |
| | 2 - | печать при JDPT(K)=1 и печать числа смещений на атом; |
| | 3 - | печать при JDPT(K)=2 и печать числа смещений на грамм. По умолчанию JDPT(...)=1. |
| IPR 1) | | Признак печати пространственных распределений энерговыделения и нормированных значений плотности потока нейтронов по группам: |
| | 0 - | нет печати; |
| | 1 - | печать картограммы энерговыделения; |
| | 2 - | печать при IPR=1 и печать картограмм нормированной на мощность плотности потока нейтронов; |
| | 3 - | печать при IPR=2 и печать картограмм нормированной на единицу плотности потока нейтронов. По умолчанию IPR=1. |

- NPRH 1) Признак печати интегральных по высоте трехмерной модели (NDM=3) энерговыделений и радиальных коэффициентов неравномерности (KR) поля энерговыделения.
 0 - нет печати;
 .NE.0 - есть печать.
 По умолчанию NPRH=0.
- JPRW(NR2) 1) Массив признаков печати пространственных распределений энерговыделения и плотности потока нейтронов по группам в соответствии с определением величины IPR для трехмерной расчетной модели (NDM=3).
 JPRW(J)=0 - нет печати;
 JPRW(J)=1 - есть печать для J-ой плоскости по высоте трехмерной расчетной модели.
 По умолчанию JPRW(...)=1.
- JPLH(NR2) 1) Вектор-метка плоскостей, входящих в интеграл по высоте трехмерной расчетной модели (NDM=3) для печати интегральных энерговыделений и радиальных коэффициентов неравномерности (KR) в случае определения NPRH.NE.0.
 JPLH(i)=0 - i-я плоскость не входит в интеграл по высоте
 JPLH(i)=K - i-я плоскость входит в K-ый интеграл по высоте расчетной модели (K=1,...,NPRH; K - индекс зоны по высоте расчетной модели; сначала - активной зоны, экранов и т.д.).
 По умолчанию JPLH(...)=0.

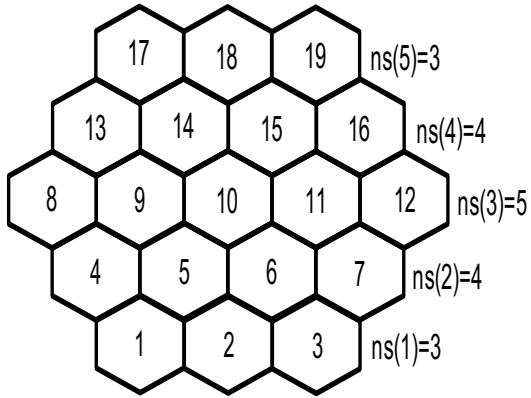
!!

- 1) параметры присутствуют с целью возможности управления печатью выходной информации на шагах выгорания. После окончания расчета выгорания значения этих параметров восстанавливаются к исходным.
- 2) параметры вводятся только в случае присутствия в расчетной модели ТВС ВКГ-типа (при JVKG.NE.0) при необходимости расчета характеристик выгорания отдельно по топливным и сырьевым тепловыделяющим элементам.

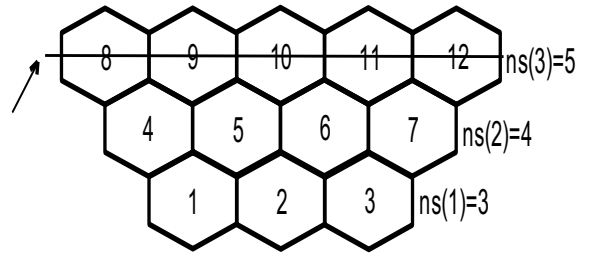
!!

4.4 Картограммы расчетных моделей

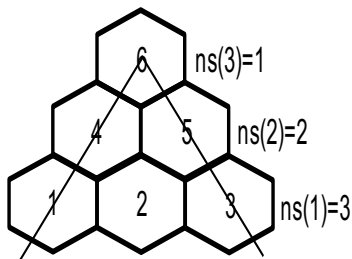
На рисунках 4.1 – 4.3 приведены примеры, иллюстрирующие правила задания картограмм моделей реактора для различных геометрий расчетных ячеек, а также секторов и типов симметрии модели.



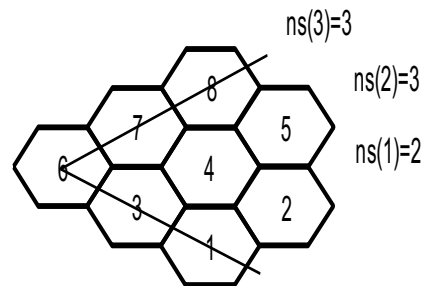
Полное сечение реактора.



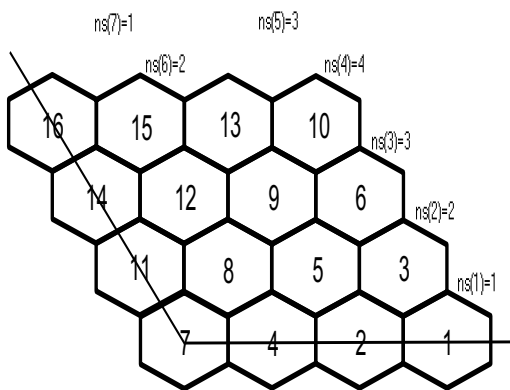
1/2 сечения реактора; зеркальное отражение.



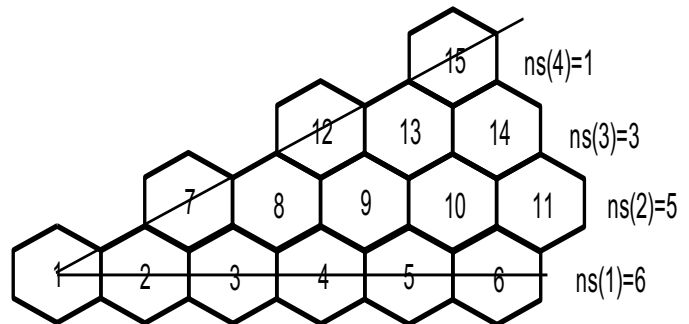
Симметрия 60° - зеркальное отражение.



Симметрия 60° сдвигом.

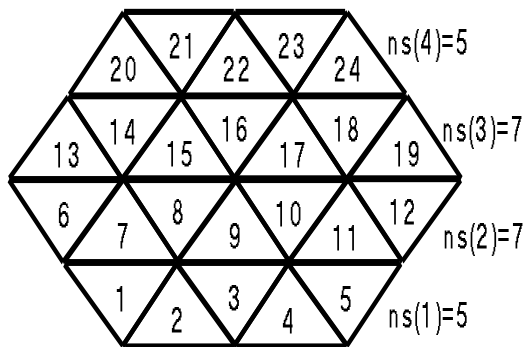


Симметрия 120°; сдвигом.

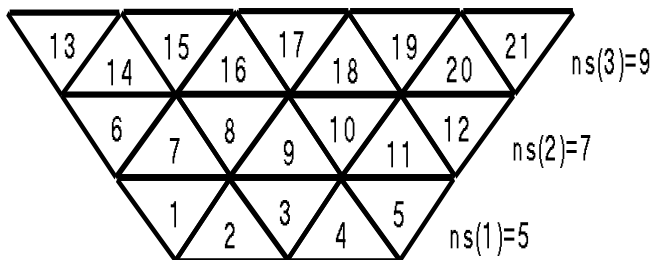


Симметрия 30°; зеркальное отражение

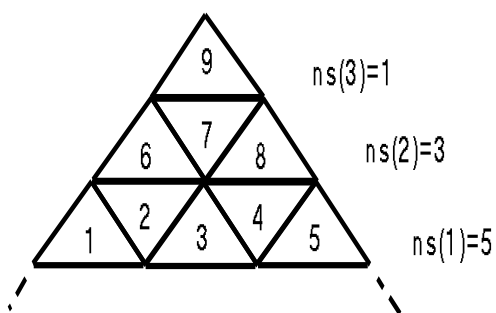
Рисунок 4.2 – Нумерация рядов и ячеек для шестигранной геометрии ячеек



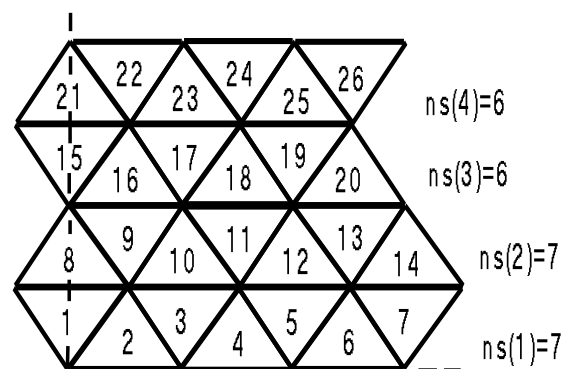
Полное сечение реактора



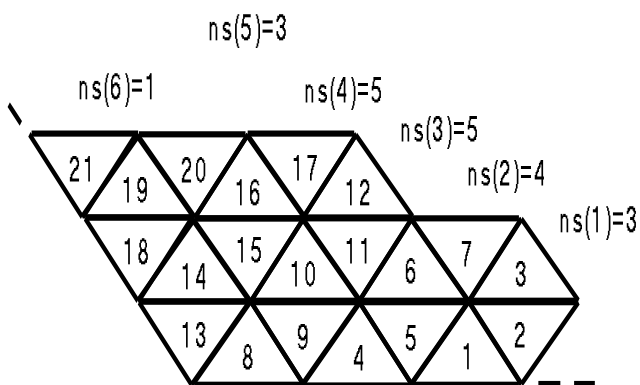
1/2 сечения реактора; зеркальное отражение.



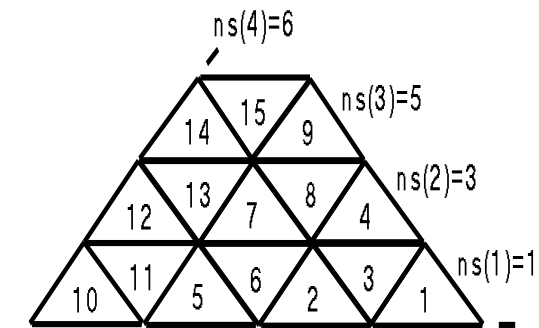
Симметрия 60°; зеркальное отражение.



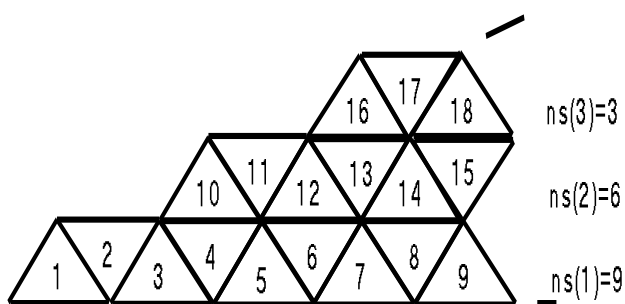
Симметрия 90°; зеркальное отражение.



Симметрия 120°; сдвигом.

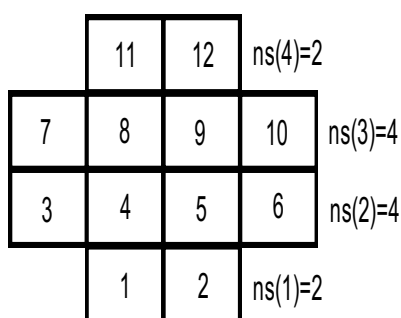


Симметрия 60°; сдвигом.

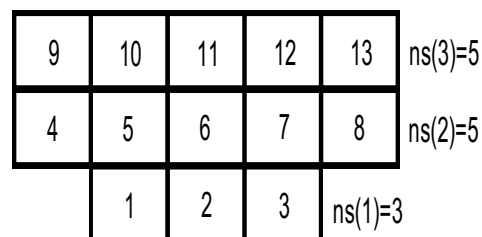


Симметрия 30°; зеркальное отражение.

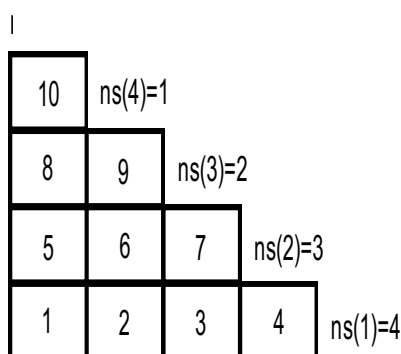
Рисунок 4.3 – Нумерация рядов и ячеек для треугольной геометрии ячеек



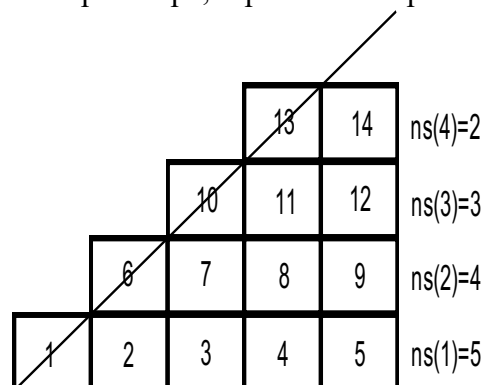
Полное сечение реактора.



1/2 сечения реактора; зеркальное отражение.



Симметрия 90°; зеркальное отражение или сдвиг.



Симметрия 45°; зеркальное отражение.

Рисунок 4.4 – Нумерация рядов и ячеек для квадратной геометрии ячеек

4.5 Выходная информация

После ввода каждого из именованных операторов ввода введенные данные распечатываются. Вся информация, выводимая на печать, снабжается заголовками и пояснениями. Картограммы всех распределений печатаются с сохранением, по возможности, геометрического вида расчетной модели.

Порядок общего вывода на печать результатов расчета при работе программы следующий:

1. Входная информация оператора НЛ с именем MIM;
2. Входная информация оператора НЛ с именем D26;
3. Входная информация оператора НЛ с именем DAN;
4. Картограмма с нумерацией расчетных ячеек и расстановкой номеров физических зон;

5. Макроскопические константы для всех физических зон и энергетических групп;
6. Значения K_{eff} по внешним итерациям;
7. Пространственное распределение нормированных на мощность энерговыделения и плотности потока нейтронов;
8. Концентрации физических зон, необходимые для вывода K_{eff} на заданное значение;
9. Входная информация оператора НЛ с именем OBR;
10. Микроскопические сечения захвата и деления по группам и физическим зонам для всех элементов списка NSPEL;
11. Коэффициенты неравномерности поля энерговыделения
12. Скорости реакций захвата и деления по элементам;
13. Значения коэффициента воспроизводства и его составляющих;
14. Входная информация оператора НЛ с именем TVZ;
15. Значения K_{eff} сопряженной задачи по внешним итерациям;
16. Пространственное распределение ценности нейтронов;
17. Коэффициенты чувствительности K_{eff} к изменению концентраций элементов и к изменению размеров;
18. Интегралы теории возмущений, ЦНД;
19. Время жизни мгновенных нейтронов и эффективная доля запаздывающих нейтронов;
20. Значение билинейного K_{eff} ;
21. Входная информация оператора НЛ с именем OTVZ;
22. Критерии сходимости неоднородной сопряженной задачи с источником;
23. Коэффициенты чувствительности дробно-линейного функционала к изменению концентраций элементов и к изменению размеров (печать спектральных компонентов, суммы спектрального и прямого компонентов).

Печать выходной информации пунктов 21-23 повторяется по числу дробно-линейных функционалов (NSIG раз).

24. Входная информация оператора НЛ с именем UPBN;
25. Параметры выгорания по временным интервалам;
26. Начальные и конечные концентрации элементов, участвующих в процессе выгорания, пошаговые концентрации;

27. Флюенс нейтронов и уровни радиационных повреждений по временным интервалам;

28. Входная информация оператора НЛ с именем TVZB;

29. Коэффициенты чувствительности K_{eff} к изменению концентраций элементов и к изменению размеров после расчета выгорания;

30. Входная информация оператора НЛ с именем OTVZ, в случае повторного расчета коэффициентов чувствительности дробно-линейного функционала после расчета выгорания;

31. Коэффициенты чувствительности дробно-линейного функционала к изменению концентраций элементов и к изменению размеров (печать спектральных компонентов, суммы спектрального и прямого компонентов) после расчета выгорания;

Печать выходной информации пунктов 30-31 повторяется по числу дробно-линейных функционалов (NSIG раз).

В зависимости от целей расчета и от определения во входной информации признаков режима расчета и печати, объем выводимой выходной информации по желанию пользователя может быть изменен.

5 Разработка графического модуля задания и редактирования картограмм

5.1 Общее описание

В предыдущих разделах проиллюстрированы широкие возможности JARFR по созданию геометрических моделей рассчитываемых объектов. Вместе с тем, создание и редактирование картограмм является кропотливой работой, требующей контроля. Поэтому в рамках совершенствования применения программы было принято решение о необходимости применения для этого автоматизированных программных средств.

Назначение редактора картограмм VIZAGIST – визуализация, редактирование и преобразование картограмм для реакторных расчетов с гексагональными, треугольными и квадратными ячейками.

Работа над проектом была начата с исследования известных авторам программ визуализации и редактирования расчетных моделей [26]. Были рассмотрены около десяти программ-редакторов и сделаны следующие выводы:

- рассмотренные программы идеально подходят для решения задач, с которыми работают их создатели, но эти задачи в основном довольно специфичны;
- доработать или переработать рассмотренные программы под нужды проекта не представляется возможным, в основном из-за отсутствия документации и доступа к исходным текстам.

Параллельно с исследованием готовых решений в области визуализации и редактирования расчетных моделей были составлены собственные функциональные требования к редактору и оформлены в виде технического задания.

Из результатов исследования стало ясно, что для обеспечения функциональных требований проекта оптимальным решением является разработка собственного редактора расчетных моделей, а также появилось еще одно нефункциональное требование: редактор должен стать открытым для сторонних разработчиков.

В настоящее время состояние разработок следующее.

Функциональные возможности редактора:

- визуализация расчетных моделей,
- редактирование элементов модели,
- преобразования моделей из гексагональной геометрии в треугольную,
- автоматизированное утачивание треугольной и квадратной сеток,
- импорт и экспорт моделей в файл, в том числе преобразованных.

Принципы отображения модели:

- элементам модели сопоставлены наборы параметров;
- цвет элемента определяется значением выбранного параметра и заданной палитрой.

Возможности отображения модели:

- сдвиги и повороты изображения модели относительно осей координат,
- раскраска модели на основании значений параметров, приписанных ее элементам,
- задание палитры вручную или автоматически по разбросу значений выбранного параметра.

Возможности по редактированию элементов модели:

- редактирование параметров выбранного элемента в табличном виде,
- копирование параметров выбранного элемента в другие.

Возможности импорта и экспорта моделей:

- внутреннее представление модели (массив элементов) не зависит от формата файла хранения;
- реализован механизм импорта/экспорта моделей в файлы формата JARFR и интеллектуальной программной системы ShIPR [27] для математического моделирования ядерных реакторов;
- редактор открыт для реализации иных форматов хранения.

Редактор реализован в архитектуре Model-View-Controller на основе открытого (open source) программного обеспечения. Используются следующие технологии реализации:

- редактор реализован на языке Java;
- для построения изображений используется библиотека jogl – реализация стандарта OpenGL для Java;
- для хранения конфигурации приложения и его инициализации используется библиотека Spring и файлы формата XML.

Все необходимые для работы редактора VIZAGIST программы – как специально разработанные, так и дополнительные необходимые программные пакеты - включены непосредственно в поставляемый набор программ и не требуют специального процесса инсталляции дополнительных программных средств.

Порядок инсталляции редактора на компьютере следующий:

1. Скопировать в удобное место каталог с файлами редактора (около 100 Мб).
2. Запустить выполняемый файл vizagist.bat. По умолчанию наборы данных с информацией по конкретным картограммам находятся в директории TMP, находящейся на том же уровне, что и директория VIZAGIST.

3. В настоящее время реализован запуск из специализированной оболочки Sh_VIZ, в базе знаний которой хранится вся необходимая для визуализации информация о картограммах.

Образец основного BAT-файла vizagist.bat:

```
:Переход в каталог редактора
cd vizagist\
:Запуск редактора
cd meshed2\run\
call _run.bat
```

Все программы редактора VIZAGIST находятся в отдельной директории \Sh_VIZ\vizagist\.

5.2 Принципы работы и архитектура редактора

В редакторе VIZAGIST реализован следующий принцип построения изображения расчетной модели. Редактор отображает модель как сетку, ячейки которой расцветены в соответствии со значениями приписанных им параметров. Для реализации этого принципа задается палитра с указанием:

- имени параметра, по значениям которого будут выбраны цвета для ячеек сетки;
- набора правил, сопоставляющих интервалы значения параметра и цвета ячеек;

Принцип отображения модели поясняет рисунок 5.1.

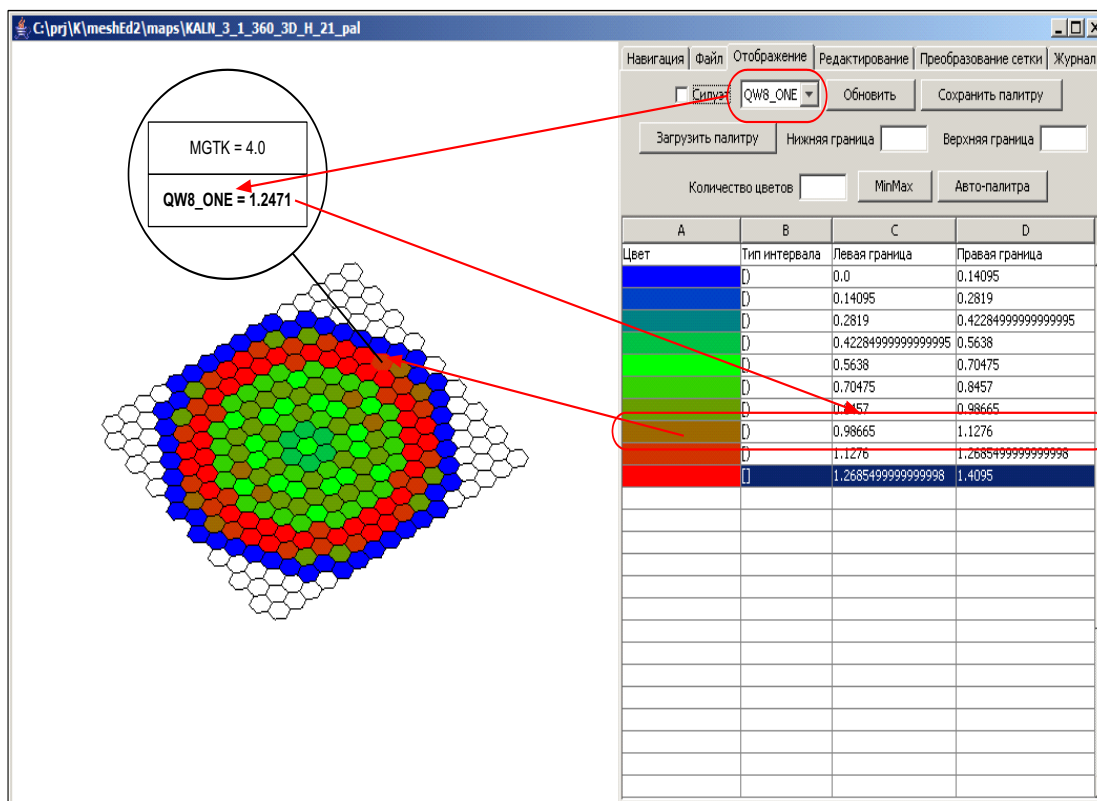


Рисунок 5.1 - Принцип построения изображения модели

Редактор расчетных моделей предоставляет следующие функциональные возможности:

а) визуализация расчетной модели:

- задание палитры для отображения модели, как вручную, так и автоматически по разбросу значений выбранного параметра;
- повороты, сдвиги изображения модели относительно осей координат и изменение его масштаба.

б) редактирование в табличном виде значений параметров, приспанных выбранному элементу модели:

- поэлементно;
- копированием.

в) преобразование модели:

- изменение размеров модели;
- изменение геометрии элементов модели - автоматизированное учащение треугольной и квадратной сеток;
- выборка секторов симметрии (вручную).

г) Импорт и экспорт переменных модели:

- реализован механизм импорта/экспорта моделей в файлы формата интеллектуальной программной системы ShIPR для математического моделирования ядерных реакторов и программы JAR-HTGR;

- для самостоятельной работы с картограммами на основе оболочки ShIPR создана система Sh_VIZ, в которой хранятся наборы данных с картограммами и из которой вызывается VIZAGIST.

Редактор реализован в архитектуре Model-View-Controller (см. рисунок 5.2).

Ядром редактора является компонент Controller, отвечающий за связь всех остальных компонентов и маршрутизацию потоков данных между ними. View — это компонент, обеспечивающий отрисовку изображения модели и пользовательского интерфейса. Компонент Model отвечает за хранение данных модели и их предоставление остальным модулям. Компоненты Plugin обрабатывают события пользовательского интерфейса и выполняют связанную с ними бизнес-логику. Каждая функциональная возможность редактора реализована одним plugin'ом.

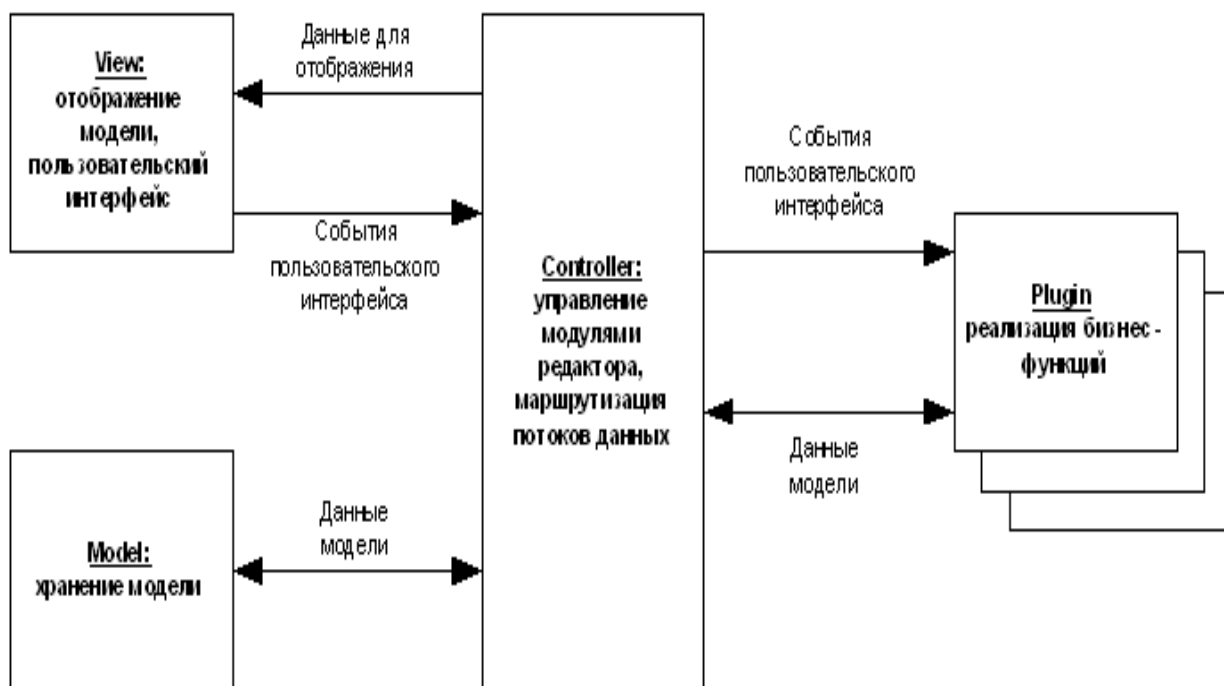


Рисунок 5.2 - Архитектура редактора VIZAGIST

Редактор реализован на языке Java. Для построения трехмерных изображений используется библиотека `jogl` — реализация интерфейса OpenGL для Java. Для хранения конфигурации приложения и его инициализации используется библиотека Spring.

В начале разработки редактора была декларирована цель: создать открытый гибкий продукт, ориентированный на доработки даже сторонними разработчиками. Благодаря архитектуре редактора, системная часть, отвечающая за хранение и отображение модели, отделена от бизнес-логики (см описание архитектуры). Таким образом, для реализации новых функциональных возможностей необходимо разрабатывать только новые `plugin`'ы — элементы бизнес-логики. Разработка `plugin`'а выполняется на языке `java`, в дружелюбном программном контексте, предоставляющем доступ к элементам модели `get`- и `set`- методами по двумерному индексу.

Например, группа специалистов начинает использование редактора при подготовке данных для расчетов и просмотре их результатов. В этом случае потребуется выполнить следующие доработки редактора. Прежде всего, будет необходимо реализовать `plugin` импорта/экспорта моделей из нового формата хранения. Возможно, возникнет необходимость в реализации специфичных возможностей редактирования и преобразования моделей, если имеющихся окажется недостаточно. После этого редактор будет готов к использованию в конкретном приложении.

5.3 Последовательность отображения, преобразования и коррекции картограмм

5.3.1 Загрузка исходного файла

1. После запуска редактора (файл vizagist.bat) раскрыть его окно во весь экран. При запуске VIZAGIST файл с набором данных, на котором находится фокус, с картограммой и соответствующей вспомогательной информацией автоматически копируется в файл в директорию \TMP. При первом запуске нужно самостоятельно найти директорию \Sh_VIZ\TMP, в которую скопирован файл с набором данных. При следующем запуске VIZAGIST будет выходить в эту директорию.
2. Информация в этом файле представлена в виде Namelist'a с комментариями, начинающимися с восклицательного знака '!'. У каждой переменной не должно быть больше одного примечания, поэтому все комментарии, находящиеся в поле значений СВ-параметров НД, автоматически убираются из файла при его копировании в директорию \TMP. Из этого файла реально используются следующие переменные (стандартные величины), приведенные в таблице 5.1. Наличие в наборе данных СВ, не используемых при построении картограммы, на результат не влияет.
3. Выбрать файл: окно <Файл>, три точки ..., и открыть выбранный файл (кнопка <Открыть>, см. рисунок 5.3). Предварительно желательно упорядочить файлы по дате (Date modif...), тогда нужный файл будет стоять первым в списке. Эта возможность есть в последних версиях ОС Windows.
4. Нажать кнопку <Загрузить>.
5. Перейти на страницу 'Навигация' и раздвинуть картограмму до необходимого размера.
6. Перейти на страницу 'Отображение' и при необходимости изменить палитру. Если палитра (переменная PALETTE) в НД отсутствует, то с помощью кнопки <MinMax> выбрать диапазон значений и задать число цветов.
7. Нажать кнопку <Обновить>.
8. Если картограмма не появляется, то нужно перейти на страницу 'Журнал' и посмотреть протокол загрузки с диагностикой возможных ошибок. Если ошибок нет, то нужно задать палитру (см. п.6).
9. При загрузке треугольной картограммы возможно временное неправильное отображение треугольников. В этом случае нужно перейти на страницу 'Преобразование сетки' и увеличить поле отображения (нажав кнопку <+Ширина>).

Таблица 5.1 – Используемые стандартные величины

| | |
|---------------|--|
| CNCHAR(LCHAR) | Имя Lchar-й стандартной величины, печатаемой в картограмме (31 байт) |
| H | Размер правильной элементарной ячейки в плоскости XY |
| IB | Число соседей в плоскости для расчетной ячейки. IB=3 при NGEOM=4. IB=4 при NGEOM =1. IB=6 при NGEOM=5 |
| IEOM | Угол симметрии в плоском сечении (градусы). |
| MCHAR | Число печатаемых характеристик в каждой ячейке картограммы |
| MGNK(NK) | Порядковый номер NK-й ячейки в плоскости(=NK). MGNK(NK)=NK |
| MGTK(NK) | Тип кассеты у NK-й ячейки в плоскости |
| MTK | Число типов кассет в реакторе (в расчетной модели). Число типов соответствует числу разных распределений физзон по высоте кассеты. Кассеты одного типа имеют одинаковый состав в соответствующей зоне по высоте кассеты. |
| NCASS | Геометрический номер ячейки, являющейся центральной в полной (360 градусов) двумерной картограмме. Используется для проверки правильности неполных картограмм |
| NGEOM | Система координат: 1-XY, 4-треугольная, 5-HEX |
| NKT | Число ячеек в двумерной картограмме |
| NREGY | Число слоев в двумерной картограмме |
| NRX(NRY) | Число ячеек в слое NRY |
| PALETTE | Палитра |

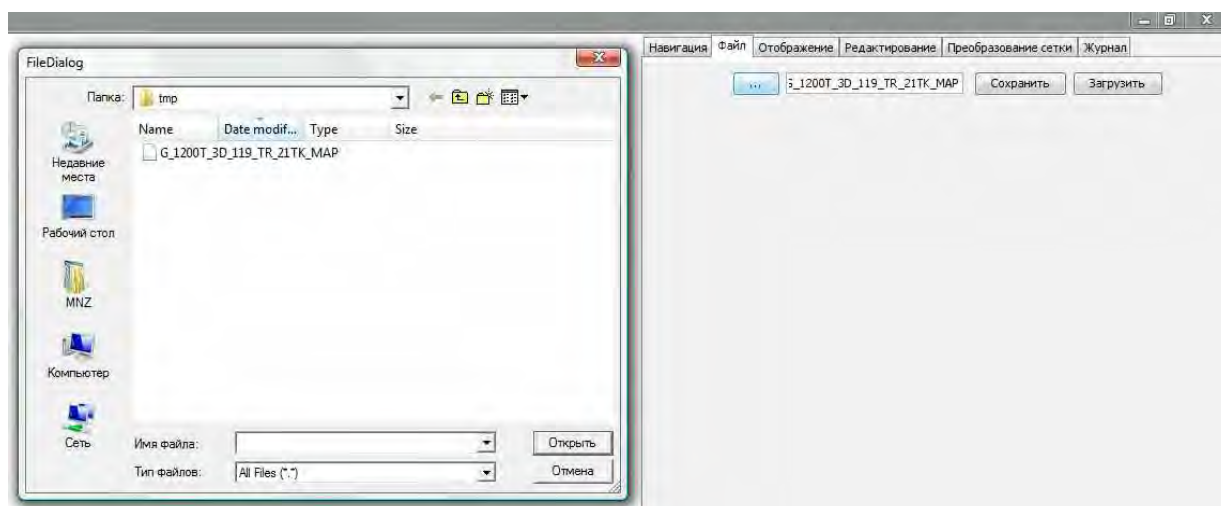


Рисунок 5.3 – Открытие файла

Пример картограммы показан на рисунке 5.4.

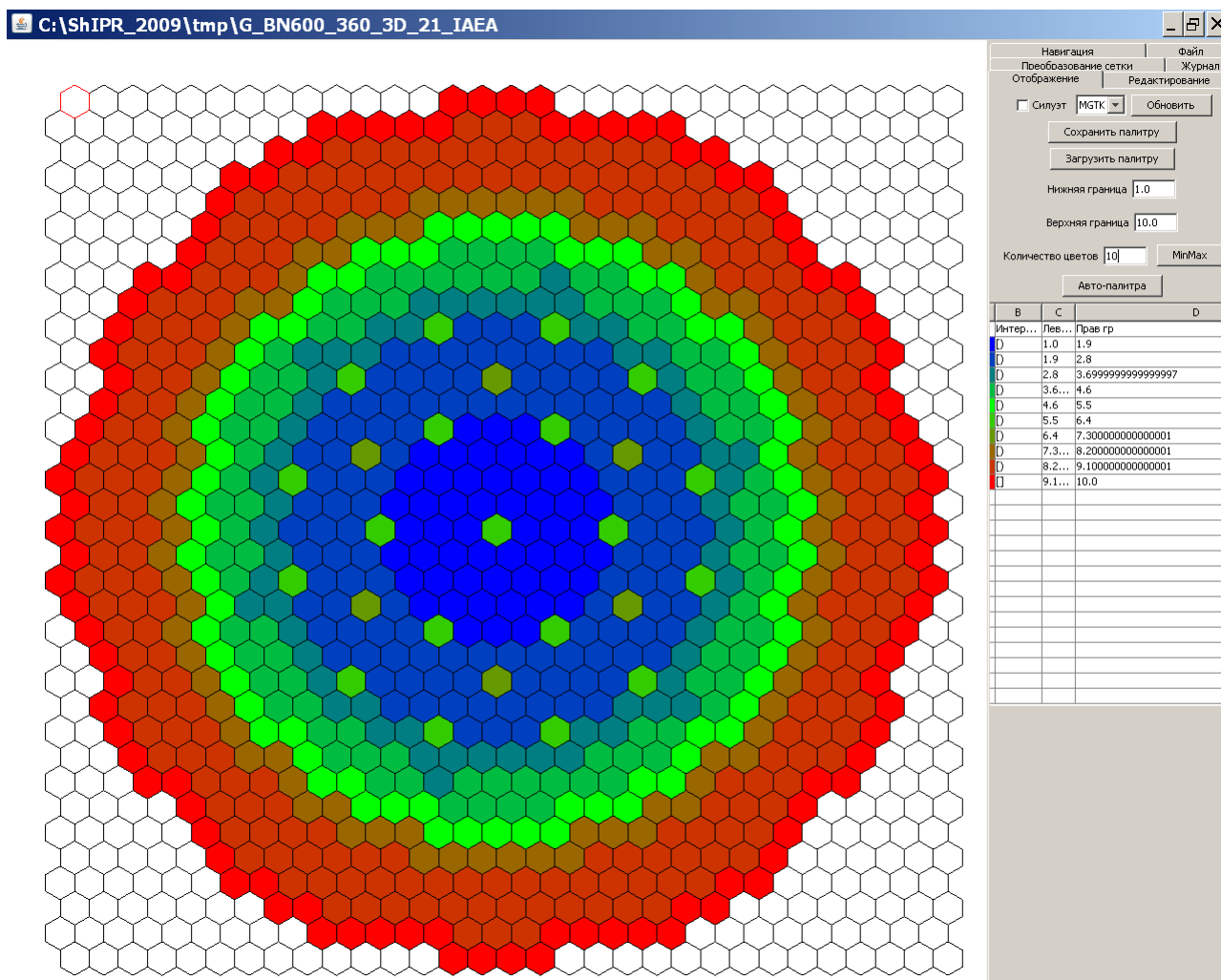


Рисунок 5.4 – Пример картограммы - гексагональная геометрия, 360°

5.3.2 Преобразование гексагональной картограммы в треугольную

Преобразование гексагональной картограммы в треугольную рекомендуется делать для симметрии 360°. Исходную картограмму править и сдвигать по горизонтали и вертикали в этом сеансе не рекомендуется. Менять можно только масштаб.

Для преобразования гексагональной картограммы в треугольную требуется следующая последовательность действий:

После загрузки исходной гексагональной картограммы 360° (см. предыдущий раздел) переходим на страницу 'Преобразование сетки' и нажимаем кнопку <Разбиение>. Будет получена картограмма, показанная на рисунке 5.5.

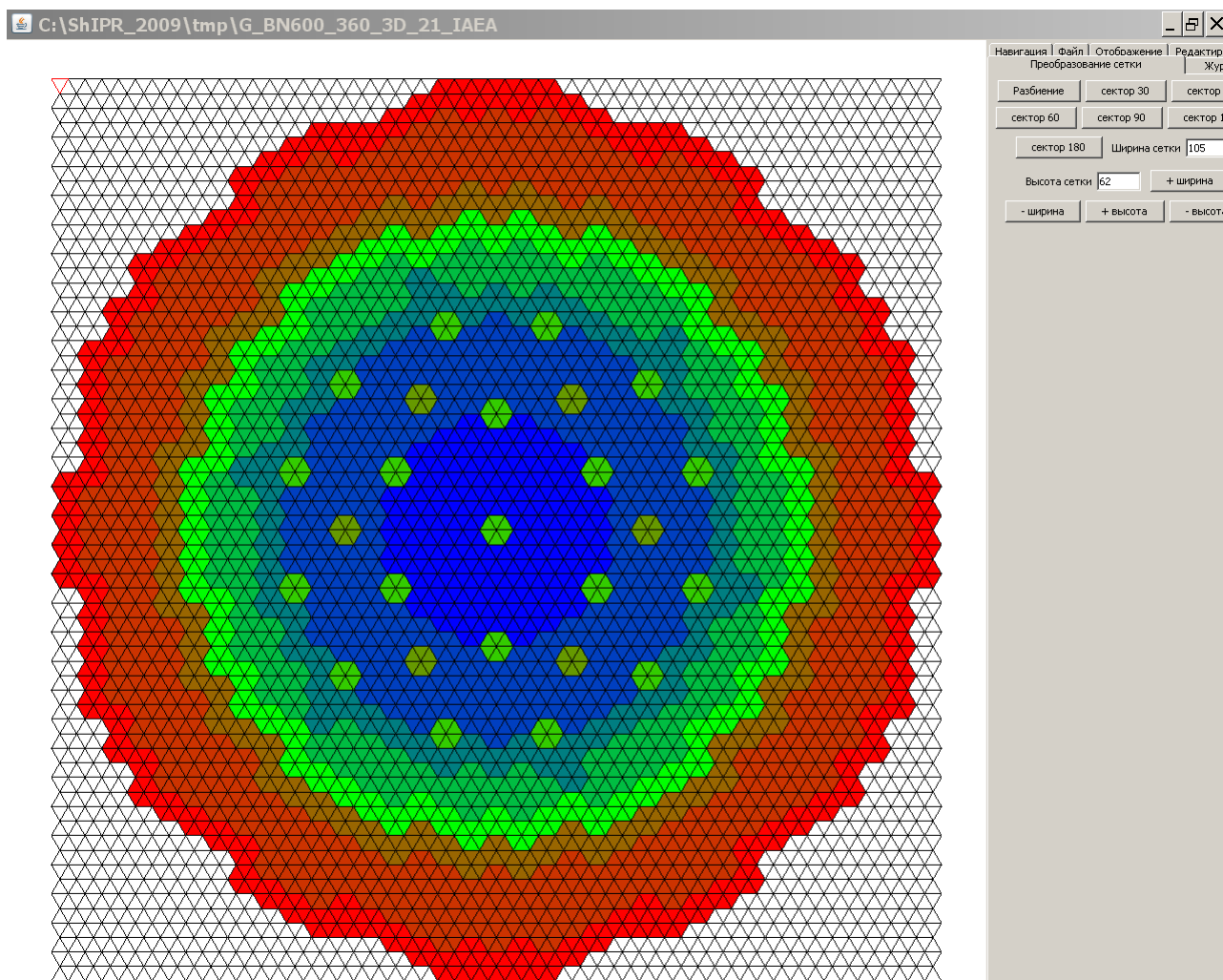


Рисунок 5.5 – Пример картограммы, автоматически полученной редактором VIZAGIST из гексагональной картограммы 360°

Плоские «полочки» на горизонтальных рядах достроены автоматически – иначе расчёт в треугольной геометрии с помощью программ типа JARFR не пойдёт. Достройка требуется в случаях, когда исходная картограмма в гексагональной геометрии имеет неровные внешние границы. Если исходная картограмма правильная, то дополнительной ручной корректировки не требуется. При желании полученная картограмма для треугольной геометрии может быть вручную с помощью редактора VIZAGIST достроена по границам для обеспечения геометрической симметрии.

Информация о полученной картограмме должна быть сохранена.

Для этого переходим на страницу 'Файл', меняем имя набора данных (например, добавляем букву Т в имя файла) и нажимаем кнопку <Сохранить>. При этом меняют свои значения следующие переменные, указанные в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Изменяемые стандартные величины

| | |
|-------------|---|
| H | Размер правильной элементарной ячейки в плоскости XY |
| IB | Число соседей в плоскости для расчетной ячейки. IB=3 при NGEOM=4. IB=4 при NGEOM =1. IB=6 при NGEOM=5 |
| IEOM | Угол симметрии в плоском сечении (градусы). |
| MGNK(NK) | Порядковый номер NK-й ячейки в плоскости(=NK). MGNK(NK)=NK |
| NCASS | Геометрический номер ячейки, являющейся центральной в полной (360 градусов) двумерной картограмме. Используется для проверки правильности неполных картограмм |
| NKT | Число ячеек в двумерной картограмме |
| NREGY | Число слоев в двумерной картограмме |
| NRX(NRY) | Число ячеек в слое NRY |
| MGK_HEX(LK) | Номер гексагональной кассеты (ячейки), которой принадлежит треугольная LK-я ячейка в плоскости |

Дополнительно рассчитываемая и выдаваемая в тот же файл переменная MGK_HEX (LK) может использоваться для приведения реакторных характеристик, рассчитанных в треугольной геометрии, к гексагональной геометрии.

5.3.4 Работа с неполными картограммами

1. Получение неполной картограммы из полной с помощью редактора VIZAGIST. Возможны следующие варианты преобразований.

Гексагональная и треугольная геометрии:

$$360^{\circ} \rightarrow 180^{\circ};$$

$$360^{\circ} \rightarrow 120^{\circ};$$

$$360^{\circ} \rightarrow 60^{\circ}.$$

Квадратная геометрия:

$$360^{\circ} \rightarrow 180^{\circ};$$

$$360^{\circ} \rightarrow 90^{\circ}.$$

2. Обратный процесс – получение картограмм с **большим** сектором симметрии из **меньшего** - должен реализовываться с помощью вычислительных модулей и не входит в функции редактора VIZAGIST.

Рассмотрим пример получения неполной картограммы при преобразовании $360^{\circ} \rightarrow 60^{\circ}$. После загрузки картограммы 360° переходим на страницу ‘Преобразование сетки’ и нажимаем кнопку <Сектор 60° >. Будет получена картограмма, показанная на рисунке 5.6.

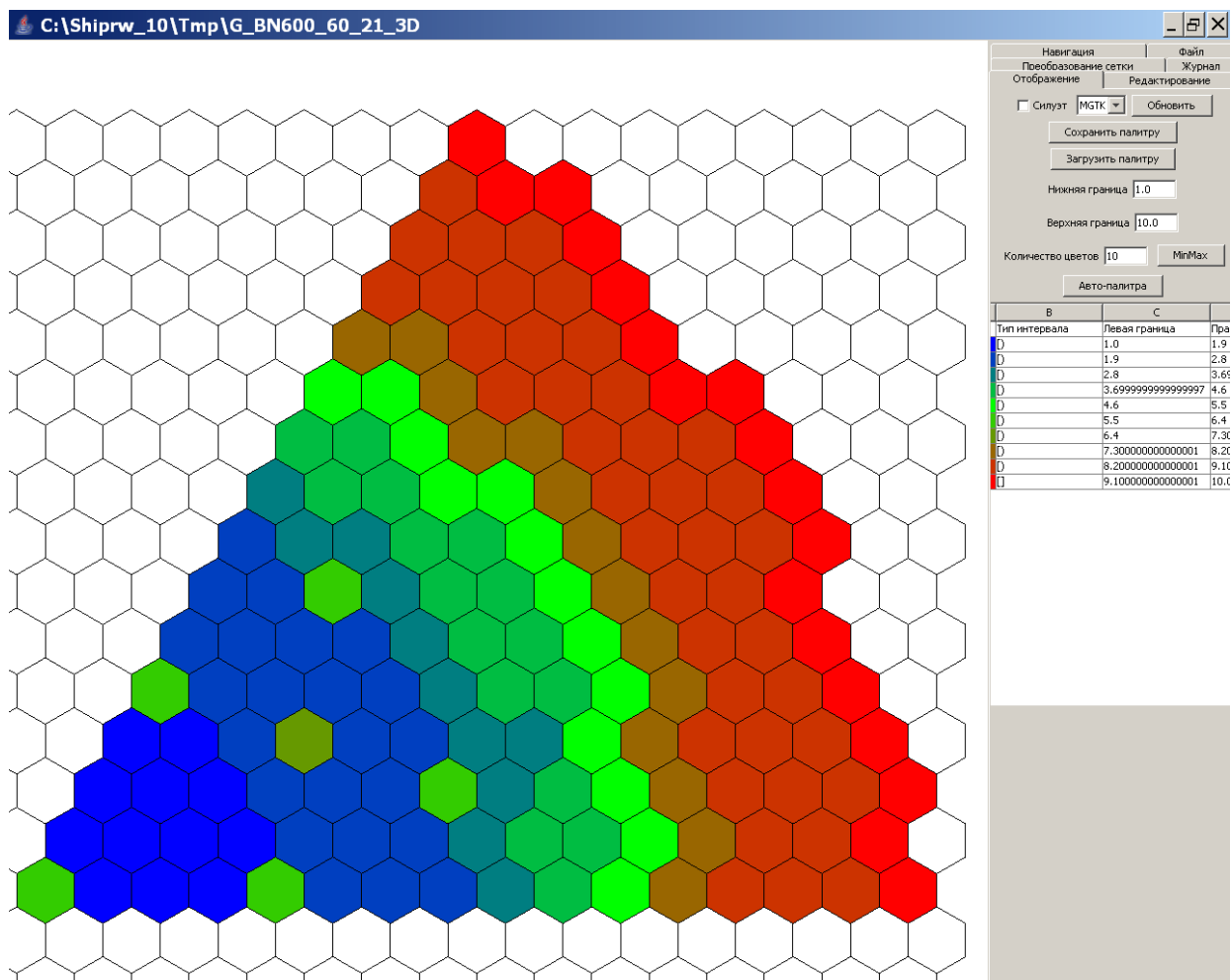


Рисунок 5.6 – Пример картограммы сектора 60°, автоматически полученной редактором VIZAGIST из гексагональной картограммы 360°, симметрия «сдвигом» (вращение вокруг центра).

После этого переходим на страницу 'Файл', меняем имя набора данных (например, меняем цифру 360 в имени файла на 60) и нажимаем кнопку <Сохранить>. При этом в сохранённом файле меняют свои значения следующие переменные, указанные в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Изменяемые стандартные величины

| | |
|----------|---|
| MGNK(NK) | Порядковый номер NK-й ячейки в плоскости(=NK). MGNK(NK)=NK |
| NCASS | Геометрический номер ячейки, являющейся центральной в полной (360 градусов) двумерной картограмме. Используется для проверки правильности неполных картограмм |
| NKT | Число ячеек в двумерной картограмме |
| NREGY | Число слоев в двумерной картограмме |
| NRX(NRY) | Число ячеек в слое NRY |

Затем исправленные значения этих переменных переносятся пользователем в собственную базу данных.

5.3.5 Копирование характеристик

При копировании характеристик исходную картограмму сдвигать по горизонтали и вертикали в этом сеансе не рекомендуется. Менять можно только масштаб. Для того, чтобы проверить правильность действий по копированию рекомендуется сохранить исправленную характеристику (можно простым копированием вставить в имеющийся или вновь созданный НД в базе знаний) и после этого снова загрузить картограмму.

Список и число копируемых характеристик определяются значениями переменных CNCHAR и MCHAR:

| | |
|---------------|--|
| CNCHAR(LCHAR) | Имя Lchar-й стандартной величины, печатаемой в картограмме (31 байт) |
| MCHAR | Число печатаемых характеристик в каждой ячейке картограммы |

Обычно туда не входят порядковые номера ячеек MGNK.

Порядок работы при копировании характеристик следующий:

1. Входим на страницу 'Редактирование'.
2. Выбираем файл, например, G_BN600_360_3D_21_IAEA
3. Метка рядом с кнопкой <Копирование> пустая (не отмечена маркером).
4. Курсор ставится на прототип ячейки.
5. Нажимается кнопка <Копирование>.
6. Выделяются те ячейки, которым надо присвоить значения из ячейки-прототипа.
7. Нажимается кнопка <Копирование> (снова нет маркера).

Параметры конкретной ячейки всегда можно проверить, войдя на страницу 'Редактирование' и нажав проверяемую ячейку.

5.3.6 Достаивание картограммы

Это частный случай копирования (см. предыдущий раздел). Но здесь копирование происходит в пустую ячейку. За симметрию исправленной картограммы отвечает пользователь.

Порядковые номера ячеек всегда задаёт пользователь. При достаивании картограммы обычно меняется тип кассеты MGTK (MCHAR = 1), полученный файл сохраняется и пользователь меняет порядковые номера ячеек MGNK.

5.3.7 Определение порядковых номеров нужных ячеек

Исходную картограмму править и сдвигать по горизонтали и вертикали в этом сеансе не рекомендуется. Менять можно только масштаб.

1. В список переменных НД включить (и задать) СВ MGNK – порядковые номера ячеек.
2. Включить MGNK в список CNCHAR. Например, CNCHAR = 'MGTK' 'MGNK'.

Входим на страницу ‘Редактирование’.

1. Метка рядом с кнопкой <Копирование> пустая (не отмечена маркером).
2. Выделяем нажатием ту ячейку, номер которой хотим узнать.
3. В левом столбце таблицы (Parameter) появляются имена переменных, а их значения появляются в правом столбце Value (может занять некоторое время при большом числе ячеек).

5.3.8 Введение нового значения переменных для одной или нескольких ячеек

Исходную картограмму сдвигать по горизонтали и вертикали в этом сеансе не рекомендуется. Менять можно только масштаб.

1. Желательно, чтобы исправляемый параметр в списке параметров CNCHAR стоял первым – тогда исправление сразу будет отображаться на картограмме.
2. На картограмме поставить курсор на ту ячейку, которую надо исправить.
3. На странице ‘Редактирование’ выделить для исправляемого параметра ВСЮ строку в двухколонной таблице с нужным параметром (она должна стать чёрной). Дважды нажать курсор на исправляемом значении параметра во второй колонке – ячейка должна стать белой. Исправить значение и нажать на клавиатуре ‘ENTER’.
4. Если нужно исправить значение параметра на уже имеющееся, то см. раздел 3.2.5 (копирование характеристик).

Заключение

В документе представлено руководство пользователя JARFR, предназначенного для проведения в многогрупповом диффузионном приближении расчетов основных нейтронно-физических характеристик быстрых реакторов и их моделей на критических сборках нулевой мощности.

Представлены расчетные возможности программы, покрывающие широкий круг практических и исследовательских задач. Изложена история развития программного средства и определен статус программы в современной структуре расчетно-теоретических исследований, проводимых организациями России в области физики реакторов на быстрых нейтронах.

С необходимой степенью детализации изложены методы и алгоритмы JARFR, включая подготовку нейтронно-физических констант, базовые методы решения многогруппового уравнения диффузии нейтронов в конечно-разностном приближении в различных геометриях модели, формализм расчета нейтронно-физических функционалов, методы и алгоритмы теории возмущений первого порядка и обобщенной теории возмущений. Изложены основы усовершенствованных методик решения системы диффузионных уравнений, реализованных в программе, а именно - модифицированной крупносеточной методики Аскью-Такеды, уточненно учитывающей перетечки нейтронов между расчетными областями, и эффективной разностной схемы, включающей в численную схему дополнительный набор неизвестных - односторонние поверхностные токи нейтронов.

Документированы программно-технические характеристики JARFR, включающие рекомендуемые характеристики вычислительной техники, блок-схему программного средства, а также структуру построения программы, иллюстрируемую деревом вызова модулей.

Приводится подробная инструкция для пользователя JARFR, включающая инструкцию по запуску расчетов, описание входной информации с соотнесением содержания каждого из операторов ввода с реализацией определенных функциональных возможностей программы, и описание структуры выходной информации.

Для обеспечения эффективного использования широких возможностей JARFR по созданию геометрических моделей рассчитываемых объектов изучена возможность применения редактора картограмм, обеспечивающего визуализацию, редактирование и преобразование картограмм для реакторных расчетов с гексагональными, треугольными и квадратными ячейками.

Список использованных источников

1. Л.Н. Ярославцева. Комплекс программ JARV для расчёта нейтронно-физических характеристик ядерных реакторов. – ВАНТ, серия «Физика и техника ядерных реакторов», 1983, вып.8(37), с.41-43.
2. Л.Н. Ярославцева, Ю.А. Зверков. Программный комплекс JARFR. Инструкция для пользователя. Отчет ИАЭ, инв.№35/1-201-88, Москва, 1988.
3. Методы и алгоритмы нейтронно-физического расчета ядерных реакторов в комплексе программ JARFR / Л.Н. Ярославцева, П.А. Фомиченко, А.В. Васильев, Л.Л. Кононова. Отчет РНЦ «Курчатовский институт», инв. № 90/1-4-95, 1995.
4. Серегин А.С., Кислицына Т.С. Аннотация комплекса TRIGEX-CONSYST-БНАБ-90. Препринт ФЭИ-2655. Обнинск, 1997.
5. Селезнев Е.Ф., Белов А.А. Комплекс ГЕФЕСТ. Описание применения. Отчет ВНИИАЭС, М., 2004. 84с.
6. Групповые константы для расчета реакторов и защиты: Справочник / Л.П. Абагян, Н.О. Базазянц, М.Н. Николаев, А.М. Цибуля. М.: Энергоиздат, 1981.
7. А.И. Башмачников. Константное обеспечение комплекса НФ-6. Препринт НИИАР 49/408, 1979.
8. Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М. Система групповых констант БНАБ-93. Часть 1. Ядерные константы для расчета нейтронных и фотонных полей излучений. ВАНТ, сер. «Ядерные константы», Вып.1, 1996, с. 59.
9. Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М. Программа подготовки констант CONSYST. Описание применения. Препринт ФЭИ-2828. Обнинск, 2000.
10. Расчетно-экспериментальные исследования характеристик перспективных реакторов на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями / П.Н. Алексеев, А.В. Васильев, В.А. Невиница, П.А. Фомиченко, Л.Н. Ярославцева. VII Александровские чтения (13 февраля 2001г.), М.: РНЦ «Курчатовский институт», 2002, с. 44-54.
11. Комплекс программ CONSYST/ABBN – подготовка констант БНАБ к расчетам реакторов и защиты. Отчет ГНЦ РФ ФЭИ, инв. № 9865, Обнинск, 1998 г.
12. Инструкция пользователя комплекса программ CONSYST с библиотекой констант БНАБ-93. Отчет ГНЦ РФ ФЭИ, инв. № 11429, Обнинск, 2004 г.
13. Тимофеев И.Г. Комплекс программ DAM расчета многогруппового нейтронного спектра, тепловыделения и процессов радиационного повреждения в конструкционных материалах для различных типов реакторов. М., Препринт ИАЭ-2935, 1978.
14. Авраменко В.И., Конобеев Ю.В., Строкова А.М. Нейтронные сечения для расчета повреждающей дозы в реакторных материалах. Атомная энергия, т.56, вып.3, 1984, с.139-141.
15. М.Н. Зизин. Расчет нейтронно-физических характеристик реакторов на быстрых нейтронах. М., Атомиздат, 1978.

16. Алексеев П.Н., Зарицкий С.М. О методах решения неоднородных уравнений обобщенной теории возмущений. Атомная энергия, т.52, вып.1, янв. 1985, с.52-56.
17. Невиница В.А., Фомиченко П.А., Алексеев П.Н. Качественный анализ сходимости грубосеточных нелинейных разностных схем в программе JARFR. \ \ В сб. «Алгоритмы и программы для нейтронно-физических расчётов ядерных реакторов (Нейтроника-95)», с. 89-98, Обнинск, 1997.
18. T. Takeda, Y. Komano. Extension of Askew coarse-mesh method to few group problems for calculating two-dimensional power distribution in fast breeder reactor. Journal of Nuclear Science and Technology, 1978, v.15, No 7, p.523-532.
19. Слесарев И.С., Ярославцева Л.Н. Расчетные схемы для исследования энергетических быстрых реакторов с гексагональными топливными сборками. ВАНТ, сер. Физика и техника ядерных реакторов, вып. 4 (33), стр. 19-23, 1983.
20. Невиница В.А. Трёхмерные крупносеточные алгоритмы восстановления локальных полей энерговыделения в программном комплексе JARFR. \ \ В сб. «Алгоритмы и программы для нейтронно-физических расчётов ядерных реакторов (Нейтроника-97)», с. 98-103, Обнинск, 1998.
21. Васильев А.В. Эффективная разностная схема решения уравнения диффузии нейтронов и алгоритм ее реализации в программном комплексе JAR. Препринт ИАЭ-5858/4. М., 1995.
22. Васильев А.В., Фомиченко П.А. Оптимизация расчетного алгоритма и метода решения уравнения диффузии в программном комплексе JARFR на основе разностной схемы 'PIS' второго порядка точности. В сб. трудов 6-го семинара «Алгоритмы и программы для нейтронно-физических расчетов ядерных реакторов», «Нейтроника-95», 24-26 октября 1995 г, стр. 82-88. Обнинск, 1997.
23. Lawrence R.D. Progress in Nodal Methods for the Solution of the Neutron Diffusion and Transport Equations. Progress in Nuclear Energy, Vol. 17, No. 3, pp. 271-301, 1986.
24. Lawrence R.D. Perturbation Theory Within the Framework of a Higher Order Nodal Method. Trans. Am. Nucl. Soc., 46, p.402, 1984.
25. A.V. Vassiliev, P.N. Alekseev, P.A. Fomitchenko, L.N. Yaroslavtzeva. Development and Evaluation of an Effective Nodal Diffusion Method for Perturbation Theory. Proc. of 'Annual Meeting on Nuclear Technology-97', pp. 49-52, Aachen, Germany, 13-15 May 1997.
26. Зизин М.Н., Кузьменко С.С. Обзор существующих средств визуализации информации в нейтронно-физических реакторных расчетах. Отчёт РНЦ «Курчатовский институт», инв. № 36/10–2006, 2006.
27. Зизин М.Н. Интеллектуальная программная система ShIPRW для математического моделирования ядерных реакторов. Препринт РНЦ «Курчатовский институт». ИАЭ-6354/5, 2005.