МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Изображение выглядит как коллекция картинок  Автоматически созданное описание | | | | | |
| **Институт  интеллектуальных кибернетических систем** | | | | | |
| **Кафедра №22 «Кибернетика»** | | | | | |
| Направление подготовки 01.04.02 Прикладная математика и информатика | | | | | |
| **Пояснительная записка** | | | | | |
| к НИР на тему: | | | | | |
| Разработка алгоритма подключения взаимно-связанных теплофизических и нейтронно-физических данных в 3-D модель СКД-реактора | | | | | |
|  | |  | |  | |
| Группа | | М22-501 | |  | |
| Студент | | (подпись) | | Ломтев П. А.  (ФИО) | |
|  | |  | |  | |
| Руководитель | | (подпись) | | Глебов В. Б.  (ФИО) | |
|  | |  | |  | |
| Научный консультант | | (подпись) | | Трифоненков А. В.  (ФИО) | |
|  | |  | |  | |
|  |  | |  | |  |
|  | |  | |  | |

**Москва 2022**

**РЕФЕРАТ**

Пояснительная записка содержит: хх страниц. Количество использованных источников – хх, таблиц - хх, рисунков – хх, приложений - хх

Ключевые слова: ВВЭР-СКД; теплофизика; нейтронная физика; *SERPENT2*; *TIME26*.

В работе рассмотрена реализация алгоритма для подключения взаимно-связанных теплофизических и нейтронно-физических данных в 3-D модель СКД-реактора. Теплофизическая составляющая задачи моделирования состоит в предварительной оценке температурных полей, выравнивании распределения тепловыделения в активной зоне и решается с помощью программы *TIME26*. Расчетное моделирование взаимодействия нейтронов с материалами реактора осуществляется методами прямого моделирования, а именно методом Монте-Карло и реализуется с помощью программы *SERPENT*2.

В процессе проведения предварительного теплофизического расчета должны быть решены следующие задачи с помощью программы *TIME26*:

1. Выбор радиальных и аксиальных размеров активной зоны реактора;
2. Выбор геометрических параметров решетки твэлов в ТВС;
3. Расчет аксиального распределения температур теплоносителя, оболочки и топлива в наиболее теплонапряженной ячейке твэлов.

Программа *SERPENT*2 формирует групповые константы взаимодействия нейтронов со средой для температур, характерных для задач физики ядерных реакторов. Также *SERPENT2* позволяет моделировать в 2-D и 3-D пространствах работу реактора с параметризацией активной зоны, а именно: задание типа и геометрических параметров активной зоны, указание составов топлива и теплоносителя. Все вышеперечисленные характеристики позволяют моделировать процессы, происходящие в любом интересующем реакторе. В данной работе рассматривается 3-D модель СКД-реактора.

Построение и реализация алгоритма по отображению 1-D распределений энерговыделений на множества больших размерностей с учетом специфики теплофизических и нейтронно-физических процессов в реакторе ВВЭР-СКД позволит глубже понять процессы, происходящие внутри реактора во время его работы.

**СОДЕРЖАНИЕ**

[**ВВЕДЕНИЕ** 4](#_Toc121186014)

[**Раздел 1. Анализ программных средств по решению задач теплофизики, нейтронной физики и реактора ВВЭР-СКД** 5](#_Toc121186015)

[**1.1 Анализ программы TIME26 для решения задач теплофизики** 5](#_Toc121186016)

[**1.2 Анализ программы SERPENT2 для решения задач нейтронной физики** 11](#_Toc121186017)

[**1.2.1 Обзор основных возможностей SERPENT2** 11](#_Toc121186018)

[**1.2.2 Формирование входного файла для SERPENT2** 13](#_Toc121186019)

[**1.3 Анализ особенностей реактора ВВЭР-СКД** 17](#_Toc121186020)

[**1.3.1 Накопление плутония в центральной ТВС цилиндрической модели активной зоны реактора ВВЭР-СКД-1600** 20](#_Toc121186021)

[**2. Теоретическое обоснование возможности отображения результатов расчета мультифизических одномерных моделей в пространства больших размерностей** 21](#_Toc121186022)

[**2.1 Обзор методов решения некорректных задач переноса данных на более широкие множества. Регуляризация решения с помощью формирования опорного плана (дополнительные условия)** 21](#_Toc121186023)

[**2.1.1 Понятие регуляризирующего оператора** 21](#_Toc121186024)

[**2.2 Метод свертки по областям для формирования опорного плана в задаче отображения 1-D распределений энерговыделения в реакторе на 2-D и 3-D пространства** 24](#_Toc121186025)

[**2.2.1 Постановка задачи в случае дискретизации** 25](#_Toc121186026)

[**2.2.2 Прямой метод решения задачи обратной свертки** 26](#_Toc121186027)

[**2.3 Применение регрессионного анализа для отображения данных опорного плана на 2-D структуру СКД-реактора** 28](#_Toc121186028)

[**3. Проектирование модуля по отображению результатов** 30](#_Toc121186029)

[**3.1 Проектирование модуля по отображению результатов работы TIME26 из одномерного в трехмерное пространство** 30](#_Toc121186030)

[**3.2 Разработать архитектуру модуля с учетом программ TIME26 и Serpent 2** 30](#_Toc121186031)

[**3.3 Результаты проектирования с использованием UML диаграмм** 30](#_Toc121186032)

[**4. Реализация модуля по отображению результатов** 30](#_Toc121186033)

[**4.1 Реализовать модуль по отображению результатов работы TIME26 из одномерного в трехмерное пространство** 30](#_Toc121186034)

[**4.2 Реализация тестового модуля для тестирования работы алгоритма** 30](#_Toc121186035)

[**4.3 Реализация алгоритма в виде программного кода и bash-скриптов** 30](#_Toc121186036)

# **ВВЕДЕНИЕ**

Последовательное увеличение быстродействия микропроцессора и объема памяти сделало высокоточные и дорогостоящие в вычислительном отношении компьютерные коды более практичными при моделировании поведения сложной системы. Моделирование включает в себя объединение нескольких различных физических решателей в интегрированный инструмент мультифизического анализа. Высокоточное моделирование, основанное на фундаментальных физических принципах, может снизить затраты на проектирование и неопределенность, тем самым повышая экономическую целесообразность и безопасность ядерной энергетики.

Взаимодействие между нейтронными и теплофизическими свойствами активной зоны ядерного реактора, называемое тепловой или реактивной обратной связью, является фундаментальным аспектом работы активной зоны. Отрицательный температурный коэффициент реактивности – отрицательный обратная связь по реактивности от повышения температуры – способствует присущим ядерному реактору эксплуатационной стабильности и безопасности.

Температурная зависимость микроскопического поперечного сечения является результатом эффекта Доплера. Эффект Доплера — это изменение поперечного сечения из-за изменений температуры, изменяющих тепловую движение ядер. Как правило, повышение температуры снижает и расширяет резонансные пики, чтобы сохранить общую площадь под резонансом. Хотя численно меньше, чем коэффициент реактивности из-за изменения температуры замедлителя, эффект обратной связи по реактивности от эффекта Доплера почти мгновенный, что делает его жизненно важной характеристикой производительности ядерного реактора.

Повышение температуры замедлителя снижает плотность замедлителя, изменяя характеристики переноса нейтронов и энергетического спектра активной зоны. Уменьшенная плотность замедлителя уменьшает количество атомов замедлителя в данной области ядра, что, в свою очередь, уменьшает поперечные сечения рассеяния и макроскопического поглощения. Уменьшенные общие поперечные сечения приводят к увеличению средней длины свободного пробега нейтронов, увеличению утечки из активной зоны и снижению термализации нейтронов.

Целью данной работы является реализация алгоритма прогнозирования пространственного распределения тепловыделения в реакторе ВВЭР-СКД по результатам одномерных расчетов тепловыделения с учетом специфики теплофизических и нейтронно-физических процессов.

# **Раздел 1. Анализ программных средств по решению задач теплофизики, нейтронной физики и реактора ВВЭР-СКД**

# **1.1 Анализ программы TIME26 для решения задач теплофизики**

Программа TIME26 предназначена для расчета нейтронно-физических параметров одномерных геометрических моделей (плоскость, цилиндр, сфера) быстрых реакторов (БР) и электро-ядерных установок (ЭЛЯУ) в 26-групповом диффузионном приближении с учетом изменения изотопного состава топлива в процессе работы БР или ЭЛЯУ на мощности. Программа использует групповые микросечения нейтронных реакций из библиотеки оцененных ядерных данных БНАБ-78 и обрабатывает их с помощью программы АРАМАКО-С1, разработанной в ГНЦ РФ-ФЭИ (Обнинск).

Перед началом работы с программой TIME26 необходимо подготовить файл исходных данных, содержащий информацию о размерах и составе системы, об изотопных переходах, которые следует учитывать при анализе выгорания топлива, и о многих других

параметрах системы. Файлы исходных данных присутствуют в директории, содержащей модули программы TIME26, поскольку эта программа уже многократно применялась в расчетных исследованиях БР и ЭЛЯУ. Поэтому любой подобный файл может быть использован в качестве шаблона, в который надо только внести изменения, соответствующие поставленной задаче. Подготовка файла исходных данных является обязательным предварительным этапом, потому что первым обращением к пользователю от запущенной программы будет: «Назовите имя файла исходных данных». Пользователь должен будет набрать имя файла исходных данных и передать его ПЭВМ. Если имя набрано неправильно, или если файл с таким именем отсутствует в директории программы, то на экран поступит соответствующее сообщение. Пользователь может три раза попытаться набрать правильное имя файла; после неудачной третьей попытки программа аварийно заканчивает работу. Если же имя файла исходных данных набрано правильно, то на экран ПЭВМ поступит сообщение: «Назовите имя файла для результатов расчета». Здесь пользователь может назвать любое имя для файла, в который будет заноситься выходная информация программы. Вернемся к подготовке файла исходных данных. Желательно, чтобы пользователь скопировал любой из уже имеющихся в директории файл исходных данных с новым именем и затем вносил в него изменения, соответствующие решаемой задаче. Кроме исходных данных, характеризующих рассматриваемую систему, в этот файл необходимо внести определенную информацию о том, какие параметры системы должны содержаться в файле результатов расчета.

Ниже будут перечислены параметры, которые необходимо включить в файл исходных данных.

1. IS – идентификатор, характеризующий тип решаемой задачи о переносе нейтронов. Поскольку программа TIME26 способна решать задачу о пространственно-энергетическом распределении плотности потока нейтронов и о пространственно-энергетическом распределении ценности нейтронов, то идентификатор IS используется для того, чтобы указать программе, какую задачу переноса она должна рассматривать. Если IS = 1, то программа решает задачу о пространственно-энергетическом распределении плотности потока нейтронов. Если же IS = 0, то программа решает задачу о пространственно-энергетическом распределении ценности нейтронов. В большинстве случаев пользователем ставится задача о пространственно-энергетическом распределении плотности потока нейтронов, то есть нужно задать IS = 1.

2. Т – продолжительность (в сутках) периода работы системы, в течение которого изучается временное поведение ее параметров.

3. NT – количество временных точек, в которых будет пересчитываться пространственно-энергетическое распределение плотности потока нейтронов и эффективный коэффициент размножения нейтронов Кэф системы.

4. WT – тепловая мощность системы (в мегаваттах). Она используется для нормировки плотности потока нейтронов при расчете выгорания топлива БР. Если объектом исследования является ЭЛЯУ, то WT может быть задана любой, поскольку абсолютные значения плотности потока нейтронов определяются величиной тока пучка протонов, бомбардирующих мишень.

5. CURR – ток пучка протонов (в амперах). Если объектом исследования является не ЭЛЯУ, а БР, то следует задать CURR = 0.

6. EPROT – энергия протонов (в мегаэлектронвольтах). Этот параметр используется только при расчетах ЭЛЯУ. При расчетах БР значение EPROT может быть задано любым.

7. CPN – среднее количество нейтронов, образующихся в мишени, бомбардируемой ускоренными протонами, в расчете на один протон. Этот параметр используется только при расчетах ЭЛЯУ. При расчетах БР значение CPN может быть задано любым.

8. NI – количество геометрических зон в системе (не больше 20).

9. IGA – индикатор типа геометрии (параметр α в уравнениях переноса). Программа TIME26 рассматривает только одномерные геометрические системы. Поэтому возможны только три варианта:

1) плоскость (IGA = 0);

2) цилиндр (IGA = 1);

3) сфера (IGA = 2).

10. IC, IB – индикаторы краевых условий на внешних границах системы. Индикатор IC отвечает за краевое условие на левой границе системы, IB – на правой границе. Возможны два варианта краевых условий:

1) условие границы с вакуумом, то есть плотность потока нейтронов на границе равна нулю (IC = 0 или IB = 0);

2) условие симметрии, то есть градиент плотности потока нейтронов на границе равен нулю (IC = 1 или IB = 1).

11. NR(20) – массив, каждый элемент которого равен количеству пространственных точек в соответствующей геометрической зоне системы. Полное количество пространственных точек не должно превышать 200.

12. R(20) – массив, каждый элемент которого равен толщине (в см) соответствующей геометрической зоны.

13. IBG – идентификатор, характеризующий способ учета утечки нейтронов в направлении, перпендикулярном к рассматриваемому, то есть в аксиальном направлении для плоскости и цилиндра (в сфере альтернативное направление утечки нейтронов вообще отсутствует).

14. HR – высота системы (в см).

15. DEF – эффективная добавка (в см).

16. BGG(20) – массив, каждый элемент которого равен аксиальному лапласиану в соответствующей геометрической зоне. Массив задается пользователем в варианте IBG = 0.

17. EPS – относительная точность сходимости итераций источников при определении эффективного коэффициента размножения нейтронов Кэф; иначе говоря, точность определения Kэф системы.

18. EPS1 – относительная точность выведения системы на значение Kэф, заданное пользователем.

19. EFK – заданное значение Kэф, на которое система должна быть выведена соответствующим изменением состава зон.

20. NK1(5,2,20) – массив, указывающий изотопы и зоны, участвующие в выведении системы на заданное значение Kэф.

21. EF(30) – массив выходов продуктов деления в расчете на од-

ну (n,f)-реакцию.

22. BETA(30) – массив постоянных распада изотопов.

23. C(30) – массив констант, используемых для изменения концентраций «активных» изотопов при выведении системы на заданное пользователем значение Kэф.

24. IROT(6,30,5) – массив, указывающий последовательность изотопных переходов в цепочке выгорания топлива. Для каждого изотопа (их количество не должно превышать 30), участвующего в цепочке выгорания топлива, пользователь должен задать следующие 6 чисел (первый индекс массива): 1) номер данного изотопа в библиотеке БНАБ или в дополнительной библиотеке; 2) номер изотопа в цепочке, получающегося из данного в результате (n,γ)-реакции; 3) номер изотопа в цепочке, получающегося из данного в результате (n,2n)-реакции; 4) номер изотопа в цепочке, получающегося из данного в результате α или β-распада; 5) единица, если данный изотоп является продуктом деления, и нуль в противном случае; 6) номер изотопа в цепочке, получающегося из данного в результате (γ,n)-реакции. Третий индекс массива IROT введен для того, чтобы иметь возможность задавать 5 типов цепочек и распределять их по зонам системы.

25. NC – идентификатор количества изотопов, участвующих в цепочке изотопных переходов. Описанный выше вариант уран-ториевой цепочки включает 6 изотопов. Следовательно, NC = 6.

26. ICHAIN(20) – массив, указывающий, какой тип цепочки изотопных переходов будет иметь место в данной геометрической зоне. Как правило, задается один тип цепочки для всех зон системы.

27. SHI(4,30) – массив, необходимый для расчета средних по зонам потоков жестких гамма-квантов. Для каждого нуклида задаются следующие 4 числа (первый индекс массива):

1) микросечение выведения жестких гамма-квантов из надпорогового энергетического диапазона;

2) микросечение (γ,n)-реакции;

3) доля надпороговых гамма-квантов, образующихся в реакциях деления;

4) доля надпороговых гамма-квантов, образующихся в реакциях захвата нейтронов.

28. NFZ – количество физических зон, то есть количество типичных составов, распределенных по геометрическим зонам рассматриваемой системы.

29. IFZ(20) – массив, определяющий соответствие между физическими и геометрическими зонами.

30. IOUT(10) – массив, с помощью которого можно указать программе, какую информацию нужно заносить в файл выходных данных. Каждый элемент этого массива может принимать значение 0 или 1. Нулевой элемент означает, что определенная информация не будет рассчитана и занесена в файл выходных данных. В противном случае, т.е. когда соответствующий элемент массива IOUT равен единице, эта информация будет рассчитана и введена в файл выходных данных. Компоненты массива IOUT ответственны за следующую информацию:

IOUT(1) – макросечения по зонам системы;

IOUT(2) – пространственное распределение плотности потока

нейтронов, суммированное по энергетическим группам;

IOUT(3) – энергетический спектр нейтронов по зонам системы;

IOUT(4) – информация, характеризующая тепловыделение в системе (пространственное распределение тепловыделения, максимальные и средние значения по зонам, коэффициенты неравномерности и т.п.). Поскольку расчет выгорания топлива всегда входит в задачу программы, то значение IOUT(4) должно быть равно единице. Это связано с тем, что нормировка плотности потока нейтронов производится по интегральному тепловыделению во всей системе;

IOUT(5) – средняя плотность потока жестких гамма-квантов по

зонам системы;

IOUT(6) – данные по балансу нейтронов в системе, т.е. скорость генерации нейтронов деления; скорость поглощения нейтронов в (n,γ)-реакциях; скорость поглощения нейтронов в (n,f)-реакциях; скорость аксиальной утечки нейтронов; скорость радиальной утечки нейтронов через правую и левую границы системы.

IOUT(7) – пространственное распределение источника нейтронов деления;

IOUT(8) – параметр, характеризующий размножающие свойства системы по зонам;

IOUT(9) – макросечения межгрупповых переводов нейтронов по зонам;

IOUT (10) – скорость утечки нейтронов из зон системы.

31. NSER (30) – массив, в котором указываются номера изотопов в библиотеке БНАБ или в дополнительной библиотеке, для которых будут рассчитываться скорости нейтронных реакций, средние микросечения и заноситься в файл выходных данных.

32. IDKRO – идентификатор, управляющий расчетом производной. Если IDKRO=0, то подпрограмма расчета этих производных не будет вызываться. При любых, отличных от нуля, значениях IDKRO подпрограмма расчета производных будет работать. Как указывалось выше, подпрограмма DKRO способна рассчитывать, кроме производных, время жизни мгновенных нейтронов и эффективную долю запаздывающих нейтронов. Поэтому если определение этих параметров входит в задачу расчета, то необходимо задавать IDKRO=1.

33. NDKRO (30) – массив, содержащий номера изотопов в библиотеке БНАБ или в дополнительной библиотеке, для которых необходимо рассчитать производную и занести в файл выходных данных.

34. IPRINT – идентификатор, управляющий печатью исходных данных, использующихся для расчета средних по зонам плотностей потока жестких гамма-квантов. Если IPRINT=1, то в файл выходных данных заносятся микросечения выведения жестких гамма-квантов из надпорогового диапазона (σr,γ), микросечения (γ,n)-реакции, доли жестких гамма-квантов, образующихся в реакциях радиационного захвата нейтронов (χn,γ) и в реакциях деления (χn, f).

35. ISVERT – идентификатор, управляющий расчетом малогрупповых макросечений по зонам. Если ISVERT = 1, то малогрупповые макросечения, усредненные по спектру нейтронов в каждой зоне, рассчитываются и заносятся в файл выходных данных.

36. NGB, INDGB (26) – количество малых энергетических групп и массив, указывающий номер малой группы, соответствующий каждой из 26 групп.

37. NEL1 – количество изотопов, микросечения которых будут браться из библиотеки БНАБ.

38. NEL2 – количество изотопов, микросечения которых будут браться из дополнительной библиотеки.

39. Номера изотопов, микросечения которых будут браться из библиотеки БНАБ.

40. Номера изотопов, микросечения которых будут браться из дополнительной библиотеки.

41. IPRMIC (30) – номера изотопов, многогрупповые микросечения которых желательно внести в файл выходных данных.

42. IZON(20) – массив, управляющий занесением многогрупповых микросечений в файл выходных данных. Если элемент массива IZON равен 1 для какой-либо зоны, то микросечения изотопов, указанных в массиве IPRMIC, блокированные по составу и спектру этой зоны, заносятся в файл выходных данных.

43. Концентрации изотопов по физическим зонам.

44. Температуры физических зон в градусах Кельвина.

На этом формирование файла исходных данных для программы TIME26 заканчивается.

# **1.2 Анализ программы SERPENT2 для решения задач нейтронной физики**

В 2014 году вышла вторая версия программного средства SERPENT2, в которой реализован расчет переноса гамма-квантов и оптимизировано распределение оперативной памяти между процессами при параллельных вычислениях. Возможности SERPENT2 можно разделить на три категории:

1. Традиционные области применения физики реакторов, включая пространственную гомогенизацию, расчеты критичности, исследования топливного цикла, моделирование исследовательских реакторов, валидацию детерминированных транспортных кодов и др.
2. Мультифизическое моделирование, то есть комбинирование расчетов с теплофизикой и нейтронной-физикой.
3. Моделирование переноса нейтронов и фотонов для расчета дозы излучения, экранирования, исследования слияния и медицинской физики.

## **1.2.1 Обзор основных возможностей SERPENT2**

Программное средство SERPENT2 представляет собой комплекс трехмерных программ для расчета переноса частиц непрерывных энергий методом Монте-Карло. Данный комплекс программ позволяет смоделировать загрузку реактора с детальным описанием каждого элемента, канала и ячейки активной зоны, а также, непосредственно в программе производить перерасчет температур нейтронных сечений с использованием встроенной процедуры допплеровского уширения резонансов.

Программное средство SERPENT2 используется для расчёта:

1. коэффициента размножения нейтронов;
2. нуклидного состава;
3. активности ядерного топлива;
4. остаточного тепловыделения;
5. многогрупповых констант;
6. скорости реакций;
7. кинетики реактора.

**Геометрия и отслеживание частиц**

Подобно другим кодам Монте-Карло, базовое описание геометрии в SERPENT2 опирается на основанную на понятии «universe» модель конструктивной твердой геометрии (CSG), которая позволяет описывать практически любую двух- или трехмерную конфигурацию топлива или реактора. Геометрия CSG состоит из ячеек однородного материала, определяемых элементарными и производными типами поверхностей, которые объединяются с помощью логических операторов (пересечения, объединения и дополнения). Геометрия областей делится на отдельные уровни, которые строятся независимо и могут быть вложены друг в друга. Данный подход позволяет разбить сложный объект на простые части, что упрощает проектирование и позволяет использовать более простые геометрические структуры, например, квадратные и гексагональные решетки и предоставляет особые геометрические типы для CANDU и топлива с произвольно распределенными частицами.

Основным строительным блоком является ячейка, которая является областью пространства, ограниченная поверхностями. Ячейки могут быть заполнены однородным составом материала, другой областью или вовсе ничем.

**Физика взаимодействия**

SERPENT2 считывает сечения непрерывной энергии из библиотек данных формата ACE (непрерывная зависимость сечений от энергий) формате, основанные на преобразованных файлах оцененных ядерных данных JEFF-2.2, JEFF-3.1, JEFF-3.1.1, ENDF/B-VI.8 и ENDF/B-VII для нескольких температур. Библиотеки термолизации включены для тяжелой, легкой воды и для графита. Физика взаимодействия основана на классической кинематике столкновений, законах реакции ENDF и выборке таблицы вероятностей в неразрешенной области резонанса. Также доступна улучшенная обработка ядра рассеяния в свободном газе вблизи резонансов, основанная на методе коррекции подавления доплеровского уширения DBRC.

**Распараллеливание вычислений**

SERPENT2 можно запускать параллельно в компьютерных кластерах и многоядерных рабочих станциях. Распараллеливание на уровне ядра обрабатывается OpenMP на основе потоков, который имеет то преимущество, что все ядра ЦП в вычислительном узле обращаются к одному и тому же пространству памяти. Вычисления можно разделить на несколько узлов с помощью распараллеливания MPI с распределенной памятью.

**Расчет выгорания**

Возможность расчета выгорания в SERPENT2 была создана на ранней стадии и полностью основана на встроенных процедурах расчета, без связи с какими-либо внешними решающими программами. Количество зон истощения не ограничено, хотя использование памяти может потребовать уменьшения оптимизации, когда количество выгорающих материалов велико.

Продукты деления и активации, а также дочерние нуклиды актинидов выбираются для расчета без дополнительных усилий пользователя, а выгорающие материалы могут быть автоматически разделены на зоны истощения. История облучения определяется в единицах времени или выгорания. Скорости реакций нормализуются к общей мощности, удельной плотности мощности, потоку, делению или скорости источника, и нормализация может быть изменена путем разделения цикла облучения на несколько отдельных интервалов истощения. Функция перезапуска позволяет выполнять перестановку топлива или вносить какие-либо изменения во входные данные, разделяя расчет на несколько частей. Объемы и массы, необходимые для нормализации, вычисляются автоматически для простых геометрических фигур, таких как двумерные решетки топливных стержней.

## **1.2.2 Формирование входного файла для SERPENT2**

*SERPENT*2 не имеет интерактивного пользовательского интерфейса. Вся связь между кодом и пользователем осуществляется через один или несколько входных файлов и различные выходные файлы.

Формат входного файла неограничен. Файл состоит из слов, разделенных пробелами (пробелами, табуляцией или новой строкой), содержащих буквенно-цифровые символы ('*a*-*z*', '*A*-*Z*', '0-9', '.', '-'). Если в слове необходимо использовать специальные символы или пробелы (имена файлов и т. д.), Вся строка должна быть заключена в кавычки.

Входной файл разделен на отдельные блоки данных, обозначаемые как карточки. Файл обрабатывается по одной карте за раз, и нет никаких ограничений относительно порядка, в котором карты должны быть организованы. За дополнительными параметрами следует ключевое слово «*set*». Все карточки ввода и параметры не чувствительны к регистру. Каждая карта ввода ограничена началом следующей карты. Следовательно, важно, чтобы ни одна из строк параметров, используемых в карте, не совпадала с идентификаторами карты.

Рассмотрим основные параметры входного файла, которые приведены в таблице 1:

Таблица 1 – Основные параметры входного файла

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Параметр** | **Описание** | **Параметры** |
| *set title* | Задает заголовок для вычисления | *NAME*: название, используемое для расчета |
| *surf* | Определяет поверхность | *NAME*: название поверхности  *TYPE*: тип поверхности  *PARAM*: параметры поверхности |
| *cell* | Определяет ячейку материала | *NAME*: название ячейки  *UNI*: «вселенная», к которой принадлежит ячейка  *MAT*: материал, который заполняет ячейку  *SURF*: список поверхностей |
| *mat* | Название материала используется для идентификации материала в карточках ячеек | *NAME*: название материала  *DENS*: плотность материала  *NUC*: идентификатор нуклида в материале  *FRAC*: отношение нуклида ко всему материалу |
| *set fum* | Активирует вычисление основного режима для свертывания промежуточных многогрупповых постоянных данных в малогрупповые константы с критическим спектром | *ERG*: промежуточная многогрупповая структура для расчета критического спектра с поправкой на утечку  *BTCH*: при значении 2 результаты усредняются по всем циклам критичности  *MODE*: тип расчета критического спектра  *DC*: многогрупповые коэффициенты диффузии для использования при расчете основного режима *FM*  *LIM*: критерий сходимости *keff* при расчете в фундаментальном режиме рассчитывается как разница абсолютных значений *keff* между последовательными итерациями  *TGT*: целевое значение для основного режима *keff*  *ITER*: максимальное количество итераций вычисления основного режима  *INIT*: первое предположение для абсолютного значения критического *B*2 |
| *set gcu* | Задает «вселенные» для генерации групповой константы | *UNI*: «вселенная», в которой генерируются групповые константы, или -1, чтобы отключить генерацию групповых констант |
| *set nfg* | Определяет структуру с несколькими группами, используемую для генерации групповых констант. | *ERG*: структура с несколькими группами, используемая для генерации групповой константы |
| *ene* | Определяет структуру энергетической сети | *NAME*: название энергетической сети  : границы контейнера  *N*: количество ячеек одинаковой ширины  : минимум энергии  : максимум энергии  *GRID*: имя предварительно определенной сетки |
| *set mdep* | Задает параметры для расчета гомогенизированных микроскопических поперечных сечений | *UNI*: «вселенная», в которой выполняется пространственная гомогенизация  *VOL*: объем гомогенизированной зоны  *N*: количество материалов, включенных в расчет  *MAT*: названия материалов  *ZAI*: идентификатор нуклида  *MT*: *MT*-реакция *ENFB* |
| *det* | Определение детектора | *NAME*: название детектора |
| *set acelib* | Задает путь к файлам каталога поперечного сечения | *LIB*: путь к файлам каталога поперечного сечения |
| *set declib* | Задает путь к файлам библиотеки данных распада | *LIB*: путь к библиотечным файлам |
| *set nfylib* | Задает путь к файлам библиотеки выходов при делении, индуцированном нейтронами | *LIB*: путь к библиотечным файлам |
| *set bc* | Задает граничные условия для всех внешних границ геометрии | *MODE*: тип границы (1 = вакуумный, 2 = отражающий, 3 = периодический) |
| *set pop* | Задает параметры для моделируемой популяции нейтронов в режиме источника критичности | *NPG*: количество нейтронов за поколение  *NGEN*: количество активных поколений  *NSKIP*: количество неактивных поколений  *K0*: первоначальное предположение для *keff*  *BTCH*: интервал для батчей  *NEIG*: количество независимых параллельных вычислений собственных значений |
| *plot* | Создает геометрический график в формате *png* | *TYPE*: определяет тип графика  *XPIX*: горизонтальный размер изображения в пикселях  *YPIX*: размер изображения по вертикали в пикселях  *POS*: положение плоскости графика  : минимальная горизонтальная координата нанесенной области  : максимальная горизонтальная координата нанесенной области  : минимальная вертикальная координата нанесенной области  : максимальная вертикальная координата нанесенной области  : минимальная важность для участков карты важности  : максимальная важность для участков карты важности  *E*: энергия частиц для построения карты важности |
| *mesh* | Создает сетчатый график в формате *png* с различными результатами | *ORI*: ориентация относительно координатных осей  *XPIX*: горизонтальный размер изображения в пикселях  *YPIX*: размер изображения по вертикали в пикселях  *SYM*: опция симметрии  *MIN-MAX*: границы нанесенной области  *CMAP*: цветная карта, используемая для отображения результатов детектора  *DET*: название детектора |

Пример входного файла для программы *SERPENT*2 приведен на рисунке 1.

Изображение выглядит как текст, квитанция

Автоматически созданное описание

Рисунок 1 - Пример входного файла

# **1.3 Анализ особенностей реактора ВВЭР-СКД**

Перспективность реакторов ВВЭР-СКД определяется их лучшей экономичностью по сравнению с традиционными реакторами типа ВВЭР. Значение КПД на АЭС с реактором, работающим при давлении воды на уровне 25 Мпа и при выходной температуре около 600, может достигать 48% против 35% на АЭС с реакторами типа ВВЭР. Более высокий КПД означает меньший объем тепловых сбросов и снижение экологического воздействия реакторов ВВЭР-СКД на окружающую среду. Кроме того, проекты реакторов ВВЭР-СКД характеризуются приемлемыми как характеристиками безопасности, так и удельными капитальными вложениями.

**Преимущества ВВЭР-СКД**

1) быстрорезонансный спектр нейтронов позволяет: достичь высокого коэффициента воспроизводства топлива (около единицы), сократить расходы урана, обеспечить использование U238 и выжигание радиоактивных отходов;

2) увеличение коэффициента полезного действия цикла до 44–45% вместо существующих на АЭС 33–34%;

3) уменьшение расхода теплоносителя через активную зону, связанное с возможностью увеличения подогрева теплоносителя в активной зоне на 250 °C по сравнению с подогревом в ВВЭР – 30–35 °C, что приводит к уменьшению размеров трубопроводов;

4) прямоточная схема АЭС позволяет отказаться от парогенераторов и всего оборудования второго контура;

5) применение освоенного серийного оборудования машинного зала, широко используемого в настоящее время в тепловой энергетике (турбины, подогреватели и т. п.);

6) значительное уменьшение объема защитной оболочки и строительных объемов, металлоемкость РУ составит ~ 1,5 т/МВт (эл);

7) сокращение эксплуатационных затрат.

Именно поэтому в настоящее время легководные реакторы со сверхкритическими параметрами теплоносителя рассматриваются как один из наиболее перспективных вариантов развития реакторных технологий. В частности, легководные СКД-реакторы включены международными экспертами в перечень из шести перспективных реакторных систем Международного Форума «Поколение - 4». Следует также отметить важную особенность создания реакторов со сверхкритическими параметрами воды: возможность максимального использования имеющейся индустриальной и инфраструктурной базы для действующих и строящихся легководных реакторов.

В дальнейших расчетах за основу принимается проект реакторной установки ВВЭР-СКД-1600 с двухходовой схемой движения теплоносителя в активной зоне (Рисунок 2).

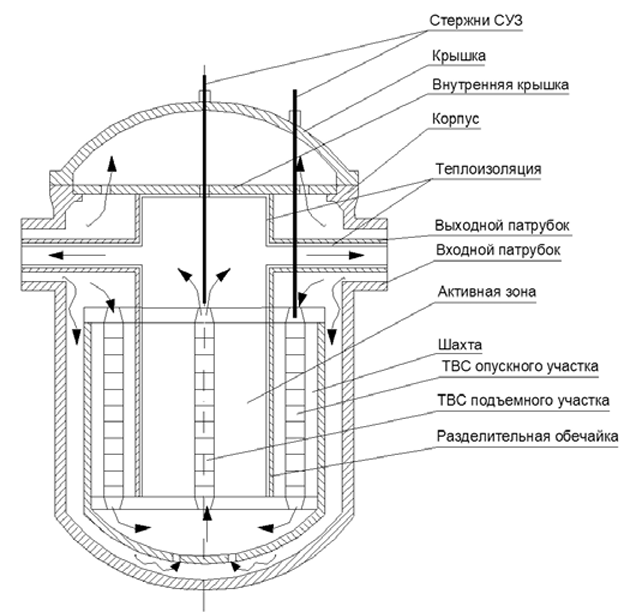


Рисунок 2 – Двухходовая схема охлаждения реактора

Основные параметры активной зоны реактора ВВЭР-СКД-1600:

1. Тепловая мощность – 3682 МВт;
2. Давление воды – 24.5 МПа;
3. Температура воды на опускном участке – от 280 до 382.9;
4. Температура воды на подъемном участке – от 382.9 до 540;
5. Количество ТВС на опускном участке – 109;
6. Количество ТВС на подъемном участке – 132;
7. Форма ТВС – гексагональная;
8. Размер ТВС «под ключ» - 20.5 см;
9. Шаг решетки твэлов – 12 мм;
10. Диаметр топливного сердечника – 9.6 мм;
11. Материал топливного сердечника – двуокись урана;
12. Длина активной части твэла – 400 см;
13. Толщина оболочки твэла – 0.55 мм;
14. Материал оболочки твэла – нержавеющая сталь ЭП-172;
15. Массовая скорость воды на опускном участке – 164.3 г/();
16. Массовая скорость воды на опускном участке – 164.3 г/();

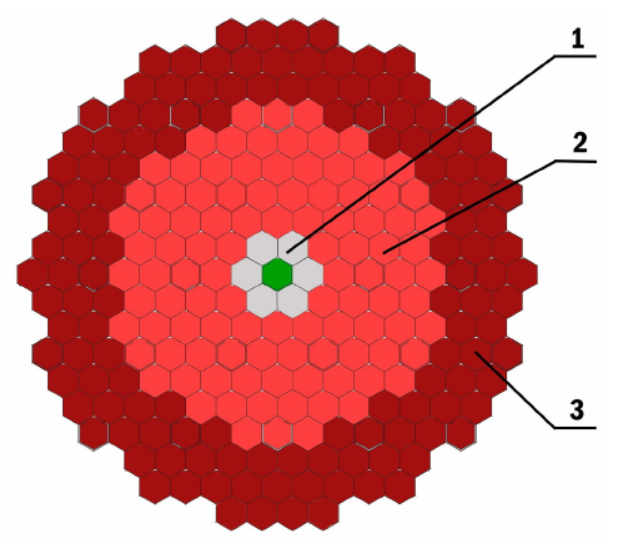


Рисунок 3 – Компоновка активной зоны ВВЭР-СКД-1600, принятая за основу для связанных теплогидравлических и нейтронно-физических расчетов. 1 – облучательное устройство (ОУ); 2- подъемный участок; 3 – опускной участок

## **1.3.1 Накопление плутония в центральной ТВС цилиндрической модели активной зоны реактора ВВЭР-СКД-1600**

В качестве стартового материала для накопления низкофонового плутония с высокой долей (не ниже 80%) и с низкой долей (не выше 2 ppm) рассматривается двуокись нептуния . Твэлы с двуокисью нептуния в стальной оболочке размещаются в центральной ТВС. Варьируемыми параметрами, изменяемыми с целью создать наилучшие спектральные условия для производства низкофонового плутония:

1. Шаг решетки – твэлов
2. Состав ТВС ближайшего окружения центральной ТВС.

В качестве материалов, окружающих центральную ТВС, используется легкая вода, природный свинец и радиогенный свинец с высоким содержанием изотопа .

Увеличение шага решетки – твэлов повысит объемную долю воды в центральной ТВС, смягчит нейтронный спектр, усилит темп накопления ценного изотопа через реакцию, и ослабит темп накопления нежелательного изотопа через реакцию.

Окружение центральной – ТВС слоем из шести ТВС, содержащих легкую воду или свинец (природный или радиогенный), создает барьер против проникновения быстрых нейтронов деления от основных – ТВС реактора, способных усилить нежелательную реакцию. Во всех вариантах, различающихся шагом решетки – твэлов и составом ближайшего окружения центральной – ТВС, доля в – ТВС реактора подбирается так, чтобы эффективный коэффициент размножения нейтронов на начало цикла облучения – ТВС был равен .

# **2. Теоретическое обоснование возможности отображения результатов расчета мультифизических одномерных моделей в пространства больших размерностей**

## **2.1 Обзор методов решения некорректных задач переноса данных на более широкие множества. Регуляризация решения с помощью формирования опорного плана (дополнительные условия)**

Для прикладных задач характерна ситуация, когда класс F не является компактом, и, кроме того, изменения правой части уравнения

связанные с ее приближенным характером, могут выводить за пределы множества AF – образа множества F при отображении его с помощью оператора A. Такие задачи называются существенно некорректными. Для решения таких задач был разработан новый подход, позволяющий строить приближенные решения уравнения, устойчивые к малым изменениям исходных данных, для существенно некорректных задач. В основе данного метода лежит фундаментальное понятие регуляризирующего оператора.

### **2.1.1 Понятие регуляризирующего оператора**

Пусть оператор таков, что обратный ему оператор не является непрерывным на множестве и множество возможных решений не является компактом.

Пусть есть решение уравнения , то есть . Часто вместо мы имеем некоторый элемент и известное число > 0 такие, что , то есть вместо точечных исходных данных () мы имеем приближенные исходные данные и оценку их погрешности . Задача состоит в том, чтобы по известным исходным данным () найти приближение к элементу , обладающее свойством устойчивости к малым изменениям . Очевидно, что в качестве приближенного решения нельзя брать точное решение с приближенной правой частью , то есть элемент , определяемый по формуле

так как оно существует не для всякого элемента и не обладает свойством устойчивости к малым изменениям правой части .

Числовой параметр характеризует погрешность правой части исходного уравнения. Поэтому представляется естественным определить с помощью оператора, зависящего от параметра, значения которого надо брать согласованными с погрешностью исходных данных . Эта согласованность должна быть такой, чтобы при , то есть при приближении (в метрике пространства ) правой части исходного уравнения к точному значению , приближенное решение стремилось бы (в метрике пространства ) к искомому точному решению уравнения .

Пусть элементы и связаны соотношением .

Оператор , действующий из пространства в пространство , называется регуляризирующим для уравнения (относительно элемента ), если он обладает свойствами:

1. существует такое число , что оператор определен для всякого , , и любого такого, что
2. для всякого существует такое, что из неравенства

следует неравенство

где

Здесь не предполагается однозначность оператора Через обозначается произвольный элемент из множества значений оператора .

В ряде случаев целесообразнее пользоваться другим определением регуляризирующего оператора.

Оператор , зависящий от параметра и действующий из в , называется регуляризирующим для уравнения (относительно элемента ), если он обладает свойствами:

1. существуют такие числа , что оператор определен для всякого , принадлежащего промежутку , и любого , для которого
2. существует такой функционал , определенный на множестве элементов , что для любого найдется число такое, что если и , то

*где*

В этом определении не предполагается однозначность оператора .

Если , то в качестве приближенного решения исходного уравнения с приближенно известной правой частью можно брать элемент , полученный с помощью регуляризирующего оператора , где согласовано с погрешностью исходных данных . Это решение называется регуляризованным решением исходного уравнения. Числовой параметр называется параметром регуляризации. Очевидно, что всякий регуляризирующий оператор вместе с выбором параметра регуляризации , согласованного с погрешностью исходных данных , , определяет устойчивый к малым изменениям правой части метод построения приближенных решений исходного уравнения. Если известно, что , согласно определению регуляризирующего оператора, можно так выбрать значение параметра регуляризации , что при регуляризованное решение стремится (в метрике ) к искомому точному решению , то есть . Это и оправдывает предложение брать в качестве приближенного решения исходного уравнения регуляризованное решение.

Таким образом, задача нахождения приближенного решения исходного уравнения, устойчивого к малым изменениям правой части, сводится:

1. к нахождению регуляризирующих операторов;
2. к определению параметра регуляризации по дополнительной информации о задаче, например по величине погрешности, с которой задается правая часть .

Описанный метод построения приближенных решений называется методом регуляризации.

# **2.2 Метод свертки по областям для формирования опорного плана в задаче отображения 1-D распределений энерговыделения в реакторе на 2-D и 3-D пространства**

Несовпадения измеренных и истинных значений физической величины может быть как малым, так и значительным, в общем случае приводя к отличию экспериментальных распределений от истинных. Выделяют несколько причин, по которым значения величины измеряются неточно и отличаются от истинных значений. Чаще всего это происходит из-за конечного разрешения измеряющей аппаратуры или шумов, а также под влиянием различных физических процессов, связанных с прохождением частиц через вещество прибора, например рассеяния или потерь энергии.

Таким образом, возникает необходимость восстановления истинного распределения измеряемой величины по измеренному, которая может быть сформулирована в виде задачи в рамках подхода, известного как обратная свертка.

В некоторых случаях формулировка задачи может быть упрощена, например, если известен общий вид искомого распределения и можно оценить один или несколько входящих в него параметров. Однако в наиболее общем случае закон распределения неизвестен, кроме, может быть, его отдельных свойств, таких как непрерывность или гладкость. Это требует применения непараметрических методов математической статистики. В частности, для оценки плотности распределения используются: гистограммные методы, с разбиением множества значений величины на промежутки; методы аппроксимации плотности по некоторой системе базисных функций и другие.

Подлежащий восстановлению закон распределения значений физической величины может быть непрерывным или дискретным. Для оценки истинного закона распределения непрерывной величины используется следующий подход:

1. множество значений разбивается на интервалы;
2. для каждого интервала подсчитывается количество попавших в него событий;
3. строится приборная гистограмма, являющаяся дискретным приближением непрерывного распределения измеряемой величины;
4. определяется функция отклика прибора, учитывающая отличие измеренных и истинных значений измеряемой величины;
5. строится статистическая оценка истинного распределения.

При этом необходимо отметить, что результатом восстановления истинного распределения в данном случае является не непрерывная функция, а дискретная статистическая оценка, в любом случае отличающаяся от дискретизации истинного неизвестного распределения физической величины. Однако использование подхода обратной свертки позволяет получить более точную статистическую оценку, приближенную к истинному закону.

Прочие подходу к решению задачи восстановления законов распределения физической величины, не предполагающие выделения такой системы интервалов значений, можно условно отнести к безбиновым методам. В этом случае алгоритм восстановления спектра основан на конкретной идее оценивания неизвестной плотности распределения, а именно:

1. ядерное сглаживание – оценка неизвестной непрерывной плотности распределения строится как среднее арифметическое значений функции специального вида в точках выборки;
2. проекционный метод – непрерывная плотность распределения оценивается как линейная комбинация некоторой системы функций;
3. сплайн подход – плотность распределения оценивается как кусочно заданная функция, компоненты которой на отдельных промежутках оцениваются по выборке;
4. локальный метод – значение плотности распределения оценивается только в окрестности конкретной выбранной точки.

## **2.2.1 Постановка задачи в случае дискретизации**

Рассмотрим некоторую физическую величину со значениями, распределенными по неизвестному закону. Разобьем диапазон возможных истинных значений на множество бинов , каждому из которых сопоставляется вероятность нахождения в нем истинного значения величины. Процедура такого разбиения называется биннингом, а полученный набор вероятностей – дискретизацией непрерывного распределения или истинным спектром, оценку которого необходимо получить.

Пусть в ходе эксперимента зарегистрировано N частиц, для каждой из которых было измерено значение исследуемой величины; такой единичный факт называют событием. Математическое ожидание истинного количества событий в интервалах разбиения обозначим , которое вычисляется по формуле .

Диапазон измеренных значений величины также разбивается на бины . Отметим, что допустимо использование разного биннинга для истинных и измеренных значений, в том числе таких, что . Количество зарегистрированных частиц в соответствующих бинах обозначим и будет называть измеренным спектром.

Описать различие спектров можно при помощи матрицы миграций R, где элемент – это вероятность того, что истинное значение величины из j-го бина будет зарегистрировано в i-ом бине. Тогда математические ожидания количества событий со значениями характеристик, лежащих в рассматриваемых интервалах, вычисляется следующим образом: .

Таким образом, основной задачей является разработка методов состоятельной статистической оценки неизвестных или пропорциональных им математических ожиданий по измеренному спектру при известном характере искажений, описываемом при помощи матрицы миграции .

## **2.2.2 Прямой метод решения задачи обратной свертки**

Для решения задачи естественным является допущение, что события не могут произойти одновременно (условие ординарности). Вероятность регистрации фиксированного количества событий в интервале в течение времени наблюдения не зависит от наступления событий в предыдущие моменты времени (отсутствие последействия) и от начала отсчета времени наблюдения (условие стационарности). При указанных допущениях выполняются все необходимые условия для того, чтобы считать последовательность событий простейшим (пуассоновским) потоком.

В этом случае количество событий, попавших в интервал , является случайной величиной, распределенной по пуассоновскому закону с математическим ожиданием . Тогда вероятность наступления таких событий равна:

Таким образом, рассматривается набор случайных величин с пуассоновским распределениями, зависящими от неизвестных математических ожиданий , которые в свою очередь зависят от неизвестного . Для построения состоятельной статистической оценки по выборке может использоваться метод максимального правдоподобия. Для этого составляется и максимизируется по функция правдоподобия:

Максимум построенной функции правдоподобия достигается для значений , а оценкой является . Это соответствует наивному подходу к решению задачи обратной свертки: считать, что измеренное и истинное распределение связаны линейным матричным уравнением, которое решается применением обратной матрицы миграций к измеренному спектру.

Построенная точечная оценка является состоятельной и несмещенной. Вместе с этим на практике использование прямого метода возможно лишь при наличии выборки большого объема, а также очень высокого разрешения измеряющей аппаратуры, что соответствует матрице , близкой к диагональной. В противном случае оценка является чувствительной к малым возмущениям измеренного распределения, что приводит к неприемлемо большой ошибке при оценке .

Помимо отмеченной неустойчивости, описанный подход в исходном виде не позволяет учесть особенности истинного распределения, например, его гладкость или энтропию.

Совокупность указанных недостатков не позволяет широко использовать прямой метод для восстановления оценки истинного распределения, поскольку в этом случае не гарантировано получение корректного устойчивого результата. Возможным вариантом решения данной проблемы является искусственное введение смешения статистической оценки, которое может быть выполнено двумя наиболее распространенными способами:

1. введение штрафного слагаемого в функцию правдоподобия;
2. ранняя остановка итеративных алгоритмов построения статистических оценок.

# **2.3 Применение регрессионного анализа для отображения данных опорного плана на 2-D структуру СКД-реактора**

Теория статистической регрессии занимается предсказанием одной или нескольких величин на основе информации, доставляемой измерениями других, сопутствующих, величин . Последние обычно называются независимыми или предсказывающими переменными, а первые – зависимыми переменными или переменными критерия.

В текущей задаче требуется спрогнозировать пространственное распределение тепловыделения в ВВЭР-СКД реакторе по результатам отдельных одномерных расчетов тепловыделения и , где полученных с помощью программы TIME26. и являются независимыми переменными, которые используются для моделирования значений зависимой переменной. – является зависимой переменной, которая описывает процесс тепловыделения.

Создание регрессионной модели представляет собой итерационный процесс, направленный на оценку выбранных параметров, описывающих зависимую переменную.

Пусть имеются следующие независимые переменные и , где и получаются в результате проведения одномерных расчетов реактора. Уравнения регрессии представляются в следующем виде:

где .

Рассмотрим реализацию регрессионного подхода в задаче восстановления двумерного поля тепловыделения по результатам одномерных расчетов зонной цилиндрической модели СКД-реактора.

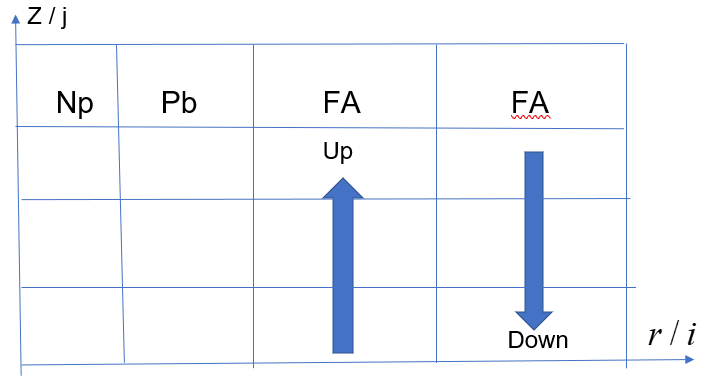


Рисунок 4 – Зонная схема ВВЭР-СКД реактора

Выбор независимых переменных определяется возможностями проведения одномерных расчетов. Для рассматриваемой системы уравнения регрессии можно записать в дискретном виде следующим образом:

Для рассмотренного примера можно использовать измененный набор независимых переменных:

В этом случае набор независимых переменных более эффективный, но третье уравнение должно решаться при фиксированном источнике и представляется более сложным с точки зрения формулировки граничных условий.

# **3. Проектирование модуля по восстановлению двумерного поля**

## **3.1 Проектирование модуля по восстановлению двумерного поля энерговыделения в модели СКД-реактора по результатам одномерных теплофизических и нейтронных расчетов**

В данном разделе приводится описание алгоритма по восстановлению двумерного поля энерговыделения в модели СКД-реактора по результатам одномерных теплофизических и нейтронных расчетов.

Схема двумерной модели СКД-реактора с облучательным устройством для производства низкофонового Pu-238 выглядит следующим образом:

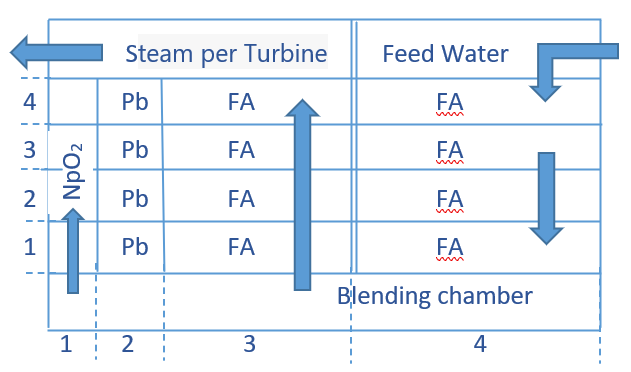


Рисунок 5 – Схема двумерной модели СКД-реактора

Задача восстановления поля энерговыделения по результатам одномерных теплофизических и нейтронных расчетов состоит из трех основных этапов работ:

Изображение выглядит как текст

Автоматически созданное описание

Рисунок 6 – Этапы восстановления поля энерговыделения двумерной модели СКД-реактора

**Прямая свертка**

Для выполнения одномерных теплофизических и нейтронных расчетов делается прямая свертка распределенных параметров модели (температур, долей материалов, концентраций нуклидов) для выделенных областей одномерного расчета (1-D область). Например, прямая свертка концентраций нуклидов проводится по формуле:

где – подобласти свертки модели СКД-реактора.

Области свертки определяются спецификой конкретной задачи и их выбор зависит, во многом, от возможностей решения, соответствующих 1-D задач. В целом, процесс выбора областей свертки часто носит оптимизационный характер.

**Тепловые и нейтронные расчеты 1-D моделей СКД-реактора**

В реакторе ВВЭР-СКД в качестве теплоносителя используется вода сверхкритических параметров с подогревом на уровне 260. При этом плотность и энтальпия воды по высоте активной зоны изменяются в несколько раз. Это приводит к тому, что спектр нейтронов сильно меняется, от резонансного на входе теплоносителя в активную зону до быстрого на выходе из нее. Все эти обстоятельства свидетельствуют о необходимости применения мультифизческой модели связанных нейтронных и теплофизических процессов для корректного описания характеристик реактора.

Тепловые и нейтронные расчеты 1-D моделей проводятся с использованием программ TIME26 и WaterStreamPro Calculator. Мультифизический подход связанных нейтронных и теплофизических процессов реализован в виде проведения сходящейся последовательности аксиальных теплофизических и нейтронно-физических расчетов по программам TIME26 и WaterStreamPro Calculator.

Программа TIME26 предназначена для определения пространственно-энергетического распределения плотности потока нейтронов и анализа временного поведения изотопного состава топлива в рамках 26-группового диффузионного приближения для аксиальных и радиальных моделей ядерных реакторов.

Программа WaterStreamPro Calculator позволяет получать температурные зависимости плотности и энтальпии волы по мере ее продвижения по ТВС опускного и подъемного участков активной зоны реактора. Полученные температурные зависимости энтальпии и плотности воды передаются в программу TIME26 в виде табулированных массивов.

**Обратная свертка. Восстановление энерговыделения по тепловым и нейтронным расчетам 1-D моделей**

Пусть имеется следующий набор функций и , где и получаются в результате проведения одномерных расчетов СКД-реактора. Уравнения обратной свертки представляются в следующем виде:

где .

Рассмотрим реализацию метода обратной свертки применительно к задаче восстановления двумерного поля энерговыделения по результатам одномерных расчетов зонной цилиндрической модели СКД-реактора.

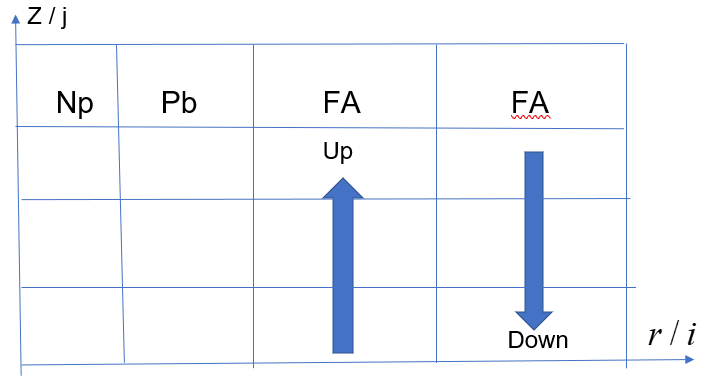


Рисунок 7 – Зонная схема ВВЭР-СКД реактора

Выбор схемы свертки по подобластям определяется возможностями проведения одномерных расчетов. Учитывая специфику движения теплоносителя в СКД-реакторе для рассматриваемой зонной модели уравнения обратной свертки можно записать в дискретном виде следующим образом:

В приведенной выше системе уравнений свертка выполнялась как по всему реактору, так и по зонам восходящего и ниспадающего потока теплоносителя.

Для данной зонной модели можно рассматривать другую схему свертки по подобластям: когда схема включает свертку по области производства Pu-238. По всей видимости, в этом случае набор 1-D решений является более эффективным, но третье уравнение в системе должно решаться при фиксированном источнике и представляется более сложным при его корректном формировании. Система уравнений обратной свертки для этого варианта свертки записывается следующим образом:

Следующим вариантом реализации схемы свертки по подобластям можно рассматривать включение в схему свертки по верхнему и нижнему аксиальным слоям реактора. В последнем случае система уравнений обратной свертки записывается следующим образом:

К предпочтению последней схемы свертки можно отнести прямой отсчет энерговыделения в зонах производства низкофонового Pu-238. Однако, расчет функций и может представлять сложности с точки зрения корректной формулировки граничных условий для 1-D задач.

**Пример восстановления относительного энерговыделения по расчетам 1-D моделей**

Рассмотрим схему свертки по подобластям, соответствующую системе уравнений (2).

Для определения функций правой части системы (2) решались уравнения 1-D моделей при свертке как по всему реактору, так и по зонам восходящего и ниспадающего потока теплоносителя:

* Свертка по высоте реактора с определением функции ;
* Свертка по радиусу реактора с определением функции ;
* Свертка по радиусу в области восходящего потока теплоносителя с определением функции ;
* Свертка по радиусу в области ниспадающего потока теплоносителя с определением функции ;

В дискретном представлении отмеченные выше функции представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Что-то там

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Номер зоны | 1 | 2 | 3 | 4 |
|  | 2.31E-02 | 7.48E-04 | 5.03E-01 | 4.73E-01 |
|  | 2.71E-01 | 1.74E-01 | 1.09E-01 | 4.61E-01 |
|  | 2.57E-01 | 1.64E-01 | 6.44E-02 | 1.67E-02 |
|  | 4.89E-05 | 1.24E-03 | 3.86E-02 | 4.33E-01 |

## **3.2 Разработать архитектуру модуля с учетом программ TIME26 и Serpent 2**

# **4. Реализация модуля по отображению результатов**

## **4.1 Реализовать модуль по отображению результатов работы TIME26 из одномерного в трехмерное пространство**

## **4.2 Реализация тестового модуля для тестирования работы алгоритма**

## **4.3 Реализация алгоритма в виде программного кода и bash-скриптов**