

На правах рукописи

Иоаннисиан Михаил Викторович

**Решение уравнения переноса нейтронов на основе модели  
трехмерной многозонной кинетики с применением метода  
Монте-Карло**

Специальность: 05.13.18

«Математическое моделирование, численные методы и  
комплексы программ»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»).

**Научный руководитель:** **Быков Вячеслав Парфеньевич**,  
кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник,  
начальник лаборатории новых объектов  
НИЦ «Курчатовский институт»

**Официальные  
оппоненты:** **Аристова Елена Николаевна**,  
доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник,  
главный научный сотрудник ИПМ им.  
М.В. Келдыша РАН

**Селезнев Евгений Федорович**,  
доктор технических наук,  
старший научный сотрудник,  
главный научный сотрудник лаборатории  
физики реактора ИБРАЭ РАН

**Ведущая организация:** Акционерное общество «Ордена Ленина  
Научно-исследовательский и конструкторский  
институт энерготехники имени Н. А.  
Доллежала» (АО «НИКИЭТ»)

Защита диссертации состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 года в «\_\_» час.  
«\_\_» мин. на заседании диссертационного совета Д002.024.03, созданного на  
базе ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, расположенного по адресу: 125047, г.  
Москва, Миусская пл., д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института прикладной  
математики им. М.В. Келдыша РАН и на сайте [www.keldysh.ru/council/3/](http://www.keldysh.ru/council/3/).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д002.024.03,  
кандидат физико-математических наук



Корнилина М.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Решение уравнения переноса с пространственно-временной зависимостью плотности потока нейтронов представляет сегодня одну из наиболее сложных задач реакторной физики. Развитие современной вычислительной техники и появление суперкомпьютеров открывают возможность использовать для этой цели математические модели, основанные на методе Монте-Карло без введения каких-либо существенных приближений. Применение этих моделей диктуется и повышением требований к безопасности реакторов и точности получаемых результатов.

Одной из таких моделей является развиваемая автором модель пространственной (трехмерной) кинетики, называемая здесь и далее методом многозонной кинетики. В методе расчетная область представляется в виде множества взаимосвязанных подобластей, а изменение их характеристик описывается системой дифференциальных уравнений, в которые входят интегральные коэффициенты, определяющиеся с использованием метода Монте-Карло.

Основные положения этого метода были впервые сформулированы с использованием феноменологического подхода Р. Эйвери в 1958 г. применительно к системе из двух взаимодействующих реакторов. На сегодняшний день метод имеет достаточную известность, был теоретически обоснован, но успешно применялся для расчета только ограниченного класса задач, в основном, для моделирования нестационарных процессов в слабосвязанных системах, таких как импульсные исследовательские реакторы и в задачах космического назначения.

Следует отметить, что этот метод обеспечивает хорошую точность, которая практически ограничена только подробностью разбиения рассматриваемой системы на подобласти и детализацией описания процесса переноса нейтрона от рождения до гибели в программах решения задачи методом Монте-Карло, где используется поточечное представление зависимости сечений от энергии, полученных из библиотеки оцененных ядерных данных. Таким образом, использование метода в обосновании безопасности как существующих, так и проектируемых реакторов, может существенно повысить их надежность и качество.

Несомненно, расчет переходных процессов в реакторах в значительной степени определяется влиянием обратных связей по теплофизическим свойствам материалов. Большинство вопросов, связанных с безопасностью ядерных реакторов, не обходится без совместного решения нейтронно-физической и теплогидравлической задач в рамках так называемого динамического комплекса.

Все это в достаточной мере обосновывает **актуальность** задачи разработки комплекса программ для моделирования нейтронной кинетики и динамических процессов в ядерном реакторе.

### Цель диссертационной работы

Разработка вычислительных алгоритмов и комплексов программ для решения нестационарных задач реакторной физики на основе математической модели пространственной многозонной кинетики с возможностью вычисления распределения

групповой плотности потока нейтронов по выделенным областям и учета обратных связей по теплофизическим свойствам материалов.

Для достижения этой цели решены следующие **задачи**:

1. Выведены уравнения для вычисления распределения групповой плотности потока нейтронов, дополняющие математическую модель многозонной кинетики.
2. Построены вычислительные алгоритмы определения обменных коэффициентов, для мгновенных, запаздывающих нейтронов и нейтронов внешнего источника на основе метода Монте-Карло.
3. Проведена адаптация неявной численной схемы (3,2) метода для решения системы дифференциальных уравнений многозонной кинетики.
4. Алгоритмы и численная схема реализованы в виде комплекса программ для моделирования нестационарных нейтронно-физических процессов на основе двухэтапной методики.
5. Проведена верификация программного комплекса применительно к моделированию нейтронной кинетики активной зоны реактора водо-водяного типа на основе решения численных тестов и задач.
6. Разработана итерационная схема объединения нейтронно-физического программного комплекса с теплогидравлической программой КЕДР-Д, созданной в НИЦ «Курчатовский институт», и проведена ее реализация в виде комплекса программ расчета динамики с учетом обратных связей по теплофизическим свойствам материалов.
7. На основе комплекса проведено моделирование динамического процесса, предложенного в международном численном бенчмарке PWR MOX/UO<sub>2</sub> core transient benchmark.

### **Методы решения поставленных задач**

В процессе решения поставленных задач были использованы методы математического анализа, метод функции Грина, метод Монте-Карло для моделирования случайных процессов, численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений, методы линейной алгебры, а также современные возможности программирования с использованием многопроцессорных вычислительных систем.

### **Научная новизна результатов работы**

В диссертации предложены и обоснованы следующие научные результаты.

Впервые получены уравнения для вычисления групповой плотности потока нейтронов, обеспечивающие в математической модели многозонной кинетики возможность моделирования распределения групповой плотности потока по выделенным областям.

Впервые разработаны и реализованы обобщенные алгоритмы вычисления обменных коэффициентов для запаздывающих нейтронов на основе метода Монте-Карло. Использование в модели этих коэффициентов уточняет результаты моделирования нестационарных процессов.

Проведена адаптация неявной численной схемы (3,2) метода для решения системы дифференциальных уравнений многозонной кинетики. Новая адаптированная схема позволяет эффективно решать задачи с высокой детализацией разбиения системы на подобласти.

### **Достоверность результатов**

Достоверность научных положений и практических результатов, полученных в диссертационной работе, подтверждена используемой строгой математической моделью, проверкой корректности созданных алгоритмов, численных схем на основе опубликованных экспериментальных и расчетных данных, а также сравнением результатов расчета тестовых и модельных задач по разработанным комплексам программ с результатами программ, использующих другие математические модели.

### **Практическая значимость**

Разработаны комплексы программ для моделирования нейтронной кинетики и динамических процессов. На их основе можно определять пространственно-временное изменение нейтронно-физических и теплогидравлических характеристик активных зон реакторов водо-водяного типа. Комплексы открывают возможность решать задачи, связанные с исследованием запуска реакторов, обоснованием их безопасности, расчетом аварийных режимов и переходных процессов. Результаты, полученные на основе комплексов, могут быть использованы в качестве реперных для верификации программ с произвольными методами решения уравнения переноса нейтронов, в том числе и для отладки программ инженерного класса.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

Основные положения диссертации, выносимые на защиту, приведены в разделе “Основные результаты работы” в конце настоящего автореферата.

### **Личный вклад автора**

Все результаты диссертации, выносимые на защиту, получены соискателем лично. В том числе соискатель самостоятельно провел вывод уравнений для групповой плотности потока нейтронов, реализовал вычислительные алгоритмы определения обменных коэффициентов, провел адаптацию численной схемы (3,2) метода, создал комплексы программ расчета нейтронно-физических и теплогидравлических процессов, разработал все компьютерные модели и провел все расчеты. Научный руководитель В.П. Быков определил первоначальную постановку задачи, предложил экспериментальные данные для отработки алгоритмов расчета обменных коэффициентов и участвовал в обсуждении результатов.

### **Апробация работы**

Основные положения диссертации доложены на следующих российских и международных конференциях и семинарах:

- межведомственный XXIII семинар “Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики с замкнутым топливным циклом (Нейтроника-2012)”. 30 октября – 2 ноября 2012 г, г. Обнинск, ФГУП ГНЦ РФ – ФЭИ (1 доклад);
- международная научно-техническая конференция "Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики", НИКИЭТ-2012, 27-29 ноября 2012 г. (1 доклад);
- конференция молодых специалистов “ИННОВАЦИИ В АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ”, НИКИЭТ, г Москва, 23-24 мая 2017 г. (1 доклад);
- научно-техническая конференция «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики» «НЕЙТРОНИКА-2017», АО ГНЦ РФ – ФЭИ, с 29 ноября по 1 декабря 2017 года (2 доклада).
- семинар «Моделирование динамики ЯЭУ (разработка программных средств, верификация, оценка точности расчета)», ФГУП «НИТИ им А.П. Александрова, г. Сосновый бор, Россия, 5-7 июня 2018 г. (1 доклад)

### **Публикации**

По результатам диссертации опубликовано 7 работ в научных журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией для опубликования основных научных результатов диссертаций, или входящих в одну из международных баз данных и систем цитирования Scopus, Web of Science.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, обзора литературы, четырех глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Работа содержит 125 страницы печатного текста, 48 рисунков, 23 таблицы и 1 приложение. Список литературы включает 74 наименования.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Введение.** Во введении описаны предпосылки к разработке программного обеспечения для моделирования нестационарных процессов в ядерных реакторах с использованием метода многозонной кинетики. Отмечается рост интереса в мире к моделированию нестационарных процессов на основе метода Монте-Карло. В основном, это связано с развитием возможностей вычислительной техники и ужесточением требований к точности результатов для повышения надежности и качества современных ЯЭУ. Кроме этого, программы, использующие метод Монте-Карло, как правило, обладают развитыми средствами для моделирования геометрии и свойств систем любой сложности. Поэтому применение данного метода позволяет расширить круг задач, актуальных на сегодняшний день. Сюда входят задачи обоснования безопасности реакторов, их пуска, расчет аварийных режимов, а также

моделирования нестационарных процессов в реакторах, имеющих нестандартное строение.

Так как используемые в многозонной кинетике нейтронно-физические характеристики могут быть определены на основе метода Монте-Карло, для вычисления этих характеристик предполагается использование возможностей программы MSU-TR.

Отмечается, что точность результатов расчета в методе регулируется подробностью сетки разбиения рассматриваемой системы на подобласти и ограничена только детализацией описываемых процессов переноса нейтронов методом Монте-Карло.

Кроме этого, отмечается важность учета обратных связей по теплофизическим свойствам материалов для задач безопасности и создания комплекса программ для расчета динамики.

**Первая глава** посвящена анализу опубликованной научно-технической литературы, относящейся к методу многозонной кинетики, и обзору современного программного обеспечения, применяющегося для решения нестационарного уравнения переноса нейтронов.

В основу метода многозонной кинетики положены идеи теории связанных реакторов, впервые сформулированной Р. Эйвери в 1959 г. для системы из взаимодействующих реакторов. Термин “связанные реакторы”, означает, что в каждом реакторе часть нейтронов испускается в результате актов деления, вызванных нейтронами, порожденными в других реакторах. Изменение мощности каждого из реакторов описывается на основе дифференциальных уравнений с использованием интегральных коэффициентов, которые характеризуют эти реакторы и связи между ними. Формально эти уравнения могут быть использованы для моделирования кинетики, как в связках реакторов, так и в пространственных подобластях реактора. Следует отметить, что уравнения Эйвери были получены на основе феноменологического подхода. Основная работа по теоретическому обоснованию метода была проделана коллективом из Физико-Энергетического Института (ФЭИ).

В настоящее время этот метод применяются для моделирования импульсных взаимодействующих реакторов. Разработан комплекс специализированных программ для ЭВМ. Область его применения - исследование концепций импульсных реакторных систем, реакторно-лазерных установок и термоядерных реакторов с лазерным инициированием.

Из обзора литературы следует, что метод не применялся в расчетах аварийных ситуаций или других задач безопасности для ядерных реакторов. В этих задачах существенную сложность их решению вносят изменяющиеся физические свойства активных зон. В таком случае требуется применение программ, определяющих теплогидравлические характеристики.

Приведена формулировка задачи и уравнения многозонной кинетики в интегральной форме. В общей постановке задачи рассматривается расчетная область (рисунок 1), включающая активную зону, ее окружающее пространство, внешние источники и т.д.

В рамках многозонной кинетики вводится разбиение областей, содержащих делящиеся нуклиды (например, топливные зоны твэлов), на  $N^{obl}$  подобластей:  $F_1, F_2, \dots, F_{N^{obl}}$ . При этом используется приближение, что в течение рассматриваемого динамического процесса в пределах каждой такой подобласти для скоростей генерации нейтронов допустимо разделение пространственной и временной зависимостей. Также система может содержать  $N^{ucm}$  внешних источников:  $Q_1, Q_2, \dots, Q_{N^{ucm}}$ .

С учетом введенных обозначений система уравнений многозонной кинетики в интегральной форме представляется в виде:

$$W_i(t) = \sum_{j=1}^{N^{obl}} \int_0^t dt' \cdot \frac{v_j}{v_i} \cdot \left[ (1 - \beta_j) \cdot \alpha_{ij}(t' \rightarrow t) \cdot W_j(t') + \sum_{d=1}^{N^{zan}} \beta_{jd} \cdot \gamma_{ijd}(t' \rightarrow t) \cdot \int_0^{t'} d\tau \cdot \lambda_{jd} \cdot W_j(\tau) \cdot e^{-\lambda_{jd}(t'-\tau)} \right] + \sum_{k_q=1}^{N^{ucm}} \int_0^t dt' \cdot \frac{1}{v_i} \cdot Q_{k_q}(t') \cdot q_{ik_q}(t' \rightarrow t)$$

где  $v_i$  - среднее число нейтронов на акт деления в области  $i$ ;  $W_i(t)$  - скорость реакции деления в области  $i$ ;  $\beta_{jd}$  - доля запаздывающих нейтронов  $d$ -го излучателя рождающихся в  $j$ -й подобласти,  $\beta_j$  - суммарная доля запаздывающих нейтронов рождающихся в  $j$ -й подобласти;  $\lambda_{jd}$  - время распада группы излучателей  $d$  в области  $F_j$ ;  $N_j^{zan}$  - общее число излучателей в  $j$ -й подобласти;  $Q_{k_q}(t)$  - интенсивность испускания нейтронов внешним источником  $Q_{k_q}$ ;  $\alpha_{ij}(t' \rightarrow t)$  - ядро перехода, представляющее собой число мгновенных нейтронов от деления в области  $i$  в момент времени  $t$  при условии, что мгновенный нейтрон, вызвавший деление, родился в области  $j$  в момент времени  $t'$ ;  $\gamma_{ijd}(t' \rightarrow t)$  и  $q_{ik_q}(t' \rightarrow t)$  - аналогичные по смыслу функции для запаздывающих нейтронов излучателя группы  $d$  и для внешнего источника.

Для решения системы интегральных уравнений используется метод приведения к дифференциальной форме на основе представления ядер перехода в виде одной или нескольких экспонент.

Кроме этого в главе представлен обзор современных программ, использующихся для расчета кинетики. В настоящее время, для расчета реакторов, в основном применяются программы, использующие диффузионные методы. К этому

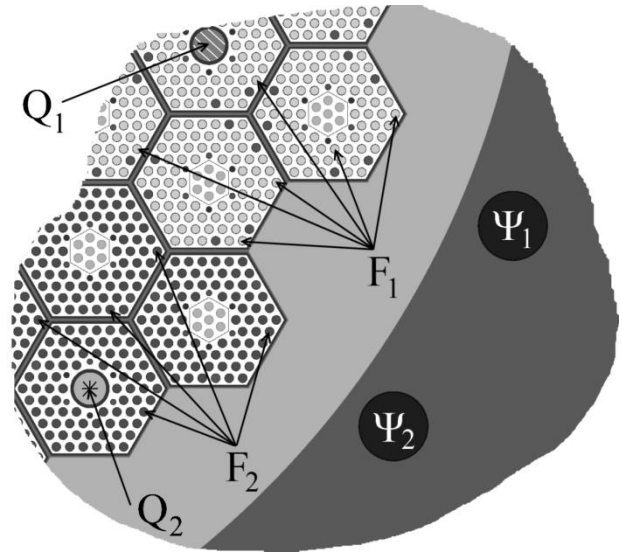


Рисунок 1 – Схема выделения подобластей



классу относятся программы PARCS (США), JAR-IQS (Россия), ГЕФЕСТ (Россия), БИПР-8КН (Россия), СТАРТ-UNK (Россия). Также следует отметить программу BARS (Россия), созданную на базе теории Галанина-Фейнберга. Кроме этого в расчетах кинетики используются детерминистские методы, которые обладают высокой точностью, но требуют для работы значительные вычислительные ресурсы. Среди них известны LUCKY\_TD (Россия, НИЦ КИ), DORT\_TD (Германия) и Оригинальной разработкой является метод поверхностных гармоник реализованный в программе SUNAM-TD (Россия, НИЦ “Курчатовский институт).

Отмечается, что в последнее время возрос интерес к прямому моделированию кинетики нейтронов методом Монте-Карло. Как правило, эти программы являются развитием стационарных версий программ. Сюда входят программы Dynamic Tripoli (Нидерланды), TDMCC (Россия), КИР (Россия).

**Во второй главе** представлены уравнения многозонной кинетики в дифференциальной форме, вывод отдельных уравнений для групповой плотности потока нейтронов, и описание комплекса программ для решения уравнений.

Уравнения для плотности потока нейтронов выведены на основе подхода, схожего с выводом уравнений многозонной кинетики. Считается, что выделены отдельные подобласти (рисунок 1)  $\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_{N_\Phi}$ . Групповой поток определяется на

основе разбиения энергетической области  $E$  на  $N^{Tp}$  интервалов:

$$E \in [E_g, E_{g+1}), g = \overline{1, N^{Tp}}, E_{N^{Tp}+1} = \infty.$$

Общий вид уравнений многозонной кинетики вместе с уравнениями для плотности потока нейтронов представлен в таблице 1.

В состав уравнений входят следующие *обменные коэффициенты*:

- $K_{ij}(t)$  - коэффициент связи, определяющий среднее число вторичных нейтронов деления в области  $F_i$  от первичного мгновенного нейтрона, который родился в области  $F_j$ ;  $K_{ijd}(t)$  и  $K_{ik_q}(t)$  - аналогичные коэффициенты для, соответственно, запаздывающего нейтрона, рожденного в области  $F_j$  от предшественника группы  $d$ , и нейтрона, рожденного внешним источником  $Q_{k_q}$ ;

$K_{gk_\Phi j}(t)$  - коэффициент связи, определяющий средняя интегральная плотность потока нейтронов группы  $g$  в области  $\Psi_{k_\Phi}$ , создаваемый мгновенным нейтроном, родившимся в области  $F_j$ ;  $K_{gk_\Phi jd}(t)$ ,  $K_{gk_\Phi k_q}(t)$  - аналогичные коэффициенты для запаздывающего нейтрона предшественника группы  $d$ , родившегося в области  $F_j$ , и нейтрона от внешнего источника  $Q_{k_q}$ ;

$L_{ij}(t)$ ,  $L_{ijd}(t)$ ,  $L_{ik_q}(t)$ ,  $L_{gk_\Phi j}(t)$ ,  $L_{gk_\Phi jd}(t)$  и  $L_{gk_\Phi k_q}(t)$  - *временные характеристики*, определяющие средние времена соответствующих процессов.

Таблица 1 - Уравнения многозонной кинетики

Группы уравнений*)	Описание дифференцируемых переменных
$\frac{dW_{ij}(t)}{dt} = -\frac{W_{ij}(t)}{L_{ij}(t)} + (1-\beta_j) \cdot \frac{\nu_j}{\nu_i} \cdot \frac{K_{ij}(t)}{L_{ij}(t)} \cdot W_j(t)$	$W_{ij}(t)$ - доля мощности переносимая мгновенными нейтронами в область $F_i$ , при условии, что они родились в области $F_j$ .
$\frac{dY_{ijd}(t)}{dt} = -\frac{Y_{ijd}(t)}{L_{ijd}(t)} + \frac{\nu_j}{\nu_i} \cdot \frac{K_{ijd}(t)}{L_{ijd}(t)} \cdot C_{jd}(t)$	$Y_{ijd}(t)$ - доля мощности, переносимая запаздывающими нейтронами в область $F_i$ , при условии, что они родились в области $F_j$ от предшественников группы $d$ .
$\frac{dC_{jd}(t)}{dt} = -\lambda_{jd} \cdot C_{jd}(t) + \beta_{jd} \cdot \lambda_{jd} \cdot W_j(t)$	$C_{jd}(t)$ - переменная-аналог концентрации предшественников запаздывающих нейтронов группы $d$ в области $F_j$ .
$\frac{dQ_{ik_q}(t)}{dt} = -\frac{Q_{ik_q}(t)}{L_{ik_q}(t)} + \frac{1}{\nu_i} \cdot \frac{K_{ik_q}(t)}{L_{ik_q}(t)} \cdot Q_{k_q}(t)$	$Q_{ik_q}(t)$ - доля мощности, переносимая нейтронами от внешнего источника $Q_{k_q}$ в область $F_i$ .
$\frac{d\Phi_{gk_\Phi j}(t)}{dt} = -\frac{\Phi_{gk_\Phi j}(t)}{L_{gk_\Phi j}(t)} + \nu_j \cdot (1-\beta_j) \cdot \frac{K_{gk_\Phi j}(t)}{L_{gk_\Phi j}(t)} \cdot W_j(t)$	$\Phi_{gk_\Phi j}(t)$ - доля плотности потока нейтронов группы $g$ в области $\Psi_{k_\Phi}$ , которая формируется мгновенными нейтронами, родившимися в области $F_j$ .
$\frac{d\Phi_{gk_\Phi jd}(t)}{dt} = -\frac{\Phi_{gk_\Phi jd}(t)}{L_{gk_\Phi jd}(t)} + \nu_j \cdot \frac{K_{gk_\Phi jd}(t)}{L_{gk_\Phi jd}(t)} \cdot A_{jd}(t)$	$\Phi_{gk_\Phi jd}(t)$ - доля плотности потока нейтронов группы $g$ в области $\Psi_{k_\Phi}$ , которая формируется запаздывающими нейтронами, родившимися в области $F_j$ от предшественников группы $d$ .
$\frac{d\Phi_{gk_\Phi k_q}(t)}{dt} = -\frac{\Phi_{gk_\Phi k_q}(t)}{L_{gk_\Phi k_q}(t)} + \frac{K_{gk_\Phi k_q}(t)}{L_{gk_\Phi k_q}(t)} \cdot Q_{k_q}(t)$	$\Phi_{gk_\Phi k_q}(t)$ - доля плотности потока нейтронов группы $g$ в области $\Psi_{k_\Phi}$ , которая формируется нейтронами, родившимися от внешнего источника $Q_{k_q}$ .
<p>*) индексы переменных и обменных коэффициентов, имеют следующие области значений:  <math>i, j = 1, N^{обл}</math>; <math>d = 1, N^{зан}</math>; <math>k_q = 1, N^{учм}</math>; <math>k_\Phi = 1, N^\Phi</math>; <math>g = 1, N^{Гр}</math>.</p>	

Полная мощность  $W_i(t)$  в области  $F_i$  и плотность потока нейтронов  $\Phi_{gk_\Phi}(t)$  группы  $g$  в области  $\Psi_{k_\Phi}$  определяются через суммирование переменных групп соответствующих уравнений:

$$W_i(t) = \sum_{j=1}^{N^{obl}} \left[ W_{ij}(t) + \sum_{d=1}^{N^{zan}} Y_{ijd}(t) \right] + \sum_{k_q=1}^{N^{ucm}} Q_{ik_q}(t),$$

$$\Phi_{gk_\Phi}(t) = \sum_{j=1}^{N^{obl}} \left[ \Phi_{gk_\Phi j}(t) + \sum_{d=1}^{N^{zan}} \Phi_{gk_\Phi jd}(t) \right] + \sum_{k_q=1}^{N^{ucm}} \Phi_{gk_\Phi k_q}(t).$$

Система уравнений дополняется следующими типами начальных условий: подкритическое состояние без внешних источников, подкритическое состояние с внешними источниками и критическое состояние.

**Схема моделирования нейтронной кинетики.** Рассматривается система, или расчетная область, содержащая активную зону, ее конструктивные элементы и т.д. Считается, что нестационарный процесс рассматривается на временном интервале регулирования. С учетом изменения свойств системы, общий интервал разбивается на  $n$  подинтервалов  $(0, t_1), (t_1, t_2) \dots (t_{n-1}, t_n)$ .

Уравнения многозонной кинетики решаются на основе последовательного применения двух численных методов – метода Монте-Карло для определения обменных коэффициентов (модуль REC для программы MCU-TR) и численной схемы решения дифференциальных уравнений (комплекс программ MRNK).

Моделирование нейтронной кинетики проводится на основе двухэтапной методики, схема которой представлена на рисунке 2.

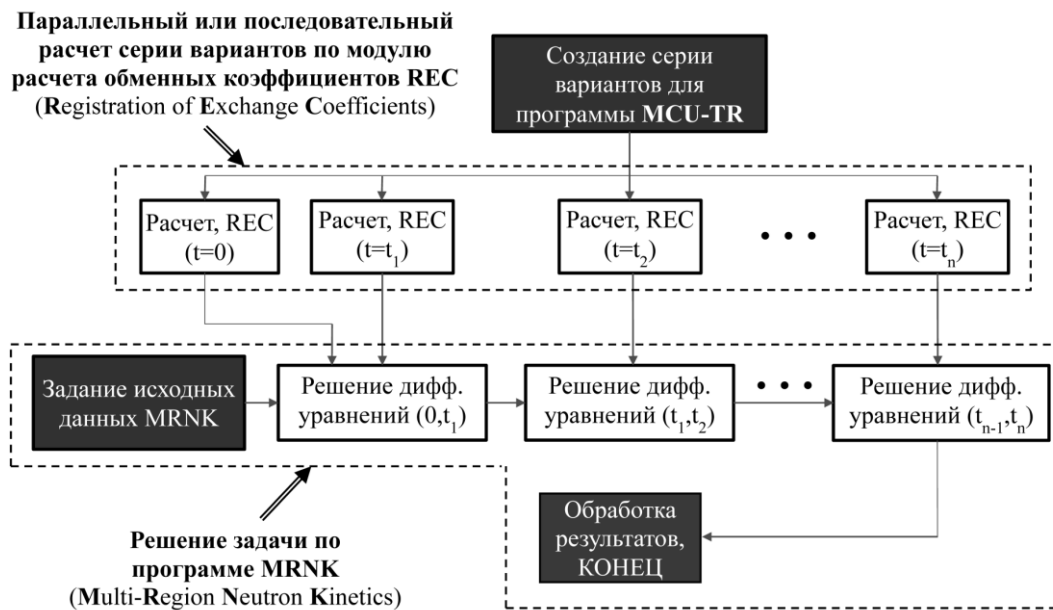


Рисунок 2 – Схема решения уравнений многозонной кинетики

В первую очередь создается расчетная модель рассматриваемой системы для программы MCU-TR. По аналогии с введенными обозначениями уравнений многозонной кинетики, считается, что модель размножающей системы, созданная на языке исходных данных MCU-TR, представляет собой пространственную область  $G$  (рисунок 1.1). Области с делящимися нуклидами  $F_j$ , и области для регистрации плотности потока  $\Psi_{k\phi}$  выделяются на основе регистрационных объектов. Также указываются регистрационные объекты, в которых моделируются внешние источники  $Q_{kq}$ .

На основе созданной модели подготавливается серия вариантов исходных данных, в которых заданы свойства материалов и изменение геометрии, соответствующие условиям нестационарного процесса на границах временных интервалов. Далее в параллельном или последовательном режиме по разработанному модулю REC для программы MCU-TR проводится расчет серии вариантов в стационарном режиме.

Полученные файлы с обменными коэффициентами передаются в программу, которая проводит решение дифференциальных уравнений.

**Модуль REC.** Алгоритмы расчета обменных коэффициентов уравнений были созданы в рамках пользовательского подмодуля программы MCU-TR на основе языка программирования FORTRAN95. Модуль имеет название REC (Registration of Exchange Coefficients).

Проведена проверка алгоритма расчета коэффициентов связи в модуле REC. Для этого были использованы как экспериментальные данные, так и модели активных зон реакторов водо-водяного типа. При верификации алгоритма расчета коэффициентов связи на моделях активных зон использовалась особенность уравнений многозонной кинетики, позволяющая восстановить значения распределения мощности и плотности потока по подобластям на основе коэффициентов связи в стационарном или подкритическом режиме.

Моделирование стационарных экспериментов с двумя взаимодействующими реакторами показало согласованность изменения экспериментальных и расчетных значений коэффициентов связи в зависимости от расстояния между реакторами.

В результате стационарного расчета усеченной модели активной зоны сопоставление распределенных скоростей генерации нейтронов, полученных в прямом расчете по программе MCU-TR и на основе коэффициентов связи, показало их хорошее согласие. Максимальное отклонение составляет 0,52%.

На примере полномасштабной модели активной зоны КЛТ-40С показана корректность алгоритма вычисления коэффициентов связей для плотности потока нейтронов. Расчет был проведен в подкритическом состоянии с внешним источником. Учитывались переносы мгновенных, запаздывающих нейтронов и нейтронов источника. Отклонения групповых плотностей потоков, вычисленных на основе коэффициентов связи, в ионизационных камерах от плотностей потоков, полученных в прямом расчете по MCU-TR, лежат в пределах расчетной погрешности результатов MCU-TR. Максимальное отклонение составляет 0,25% при погрешности расчета по программе MCU-TR 0,5%.

**Комплекс программ MRNK.** Для решения уравнений многозонной кинетики (таблица 1) выбран неявный одношаговый (3,2)-метод, входящий в семейство (m,k)-методов и являющийся модификацией метода Розенброка. Метод имеет третий порядок точности, обладает L-устойчивостью и разработан с учетом автоматического выбора временного шага интегрирования.

Характерной особенностью (3,2)-метода является то, что на каждом шаге интегрирования многократно решается система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$\mathbf{D}^n \mathbf{s} = \mathbf{x}.$$

Здесь  $\mathbf{D}^n = \mathbf{E} - a \cdot h^n \cdot \mathbf{J}^n$ ,  $\mathbf{E}$  – единичная матрица;  $h^n$  – временной шаг интегрирования,  $\mathbf{J}^n$  – матрица Якоби задачи Коши.

Расчетное время решения задачи Коши определяется сложностью решения СЛАУ и зависит от размера матриц  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{D}^n$ ,  $\mathbf{J}^n$  ( $N^{yp} \times N^{yp}$ ), где  $N^{yp}$  – число уравнений задачи Коши. Для системы уравнений многозонной кинетики, с учетом перевода ее в автономный вид, число уравнений определяется формулой:

$$N^{yp} = N^{obl} \cdot (N^{obl} + N^{zan} \cdot N^{obl} + N^{zan} + N^{uct}) + \\ + N^{zp} \cdot N^{\Phi} (N^{obl} + N^{obl} \cdot N^{zan} + N^{uct}) + 1.$$

Как видно из этой формулы – число уравнений сильно зависит от числа размножающих областей  $N^{obl}$ . С использованием формы уравнений многозонной кинетики эта СЛАУ может быть преобразована к СЛАУ вида:

$$\mathbf{V}^n \mathbf{u} = \mathbf{c}.$$

Здесь  $\mathbf{V}^n$  – матрица размера  $N^{obl} \times N^{obl}$ ,  $\mathbf{u}$  – вектор неизвестных и  $\mathbf{c}$  – известный вектор. После решения СЛАУ элементы искомого вектора  $\mathbf{s}$  легко определяются через элементы вектора  $\mathbf{u}$  на основе представленных в диссертационной работе выражений.

Сложность решения новой СЛАУ зависит только от числа выделенных размножающих областей  $N^{obl}$ , что существенно увеличивает быстродействие (3,2)-метода.

Приведенный численный алгоритм решения дифференциальных уравнений реализован в комплексе MRNK (Multi-Region Neutron Kinetics), написанном на языке FORTRAN. Комплекс автоматизирует расчет нейтронной кинетики на основе обменных коэффициентов, полученных из расчета модуля REC, и осуществляет вывод в текстовый файл любых переменных системы уравнений в заданной пользователем временной сетке.

Для проверки корректности реализации оптимизированного (3,2)-метода в комплексе MRNK были проведены расчеты изменения мощности по точечной модели кинетики. Результаты расчета четырех примеров ввода реактивности полностью совпали с опубликованными результатами решения уравнений кинетики.

**В третьей главе** представлены результаты верификации комплекса MRNK. Корректность работы программы подтверждалась на тесте RPCEU235 и серии тестов ВВЭР: ВВЭР-ВН, ВВЭР-ВВ и ВВЭР-КР. Серия тестов была разработана совместно с

авторами программы КИР. Также представлены результаты совместных с программой КИР кросс-верификационных расчетов кинетики реактора КЛТ-40С.

**Тест RPCEU235.** Расчетная область представляет собой помещенный в вакуум прямоугольный параллелепипед, заполненный изотопом  $^{235}\text{U}$  с критической концентрацией  $0,044925 \cdot 10^{24}$  яд/см<sup>3</sup>. По условиям тестовой задачи, в момент времени 10 с вводится положительная реактивность путем мгновенного увеличения концентрации урана до  $0,045 \cdot 10^{24}$  яд/см<sup>3</sup>. После этого концентрация остается постоянной до момента времени 40 с, после которого мгновенно принимает первоначальное значение. Далее процесс рассматривается до 70 с. На рисунке 3 приведены результаты расчета теста по программам Dynamic TRIPOLI, КИР и MRNK. Максимальное расхождение между программами MRNK и КИР не превышает 5%.

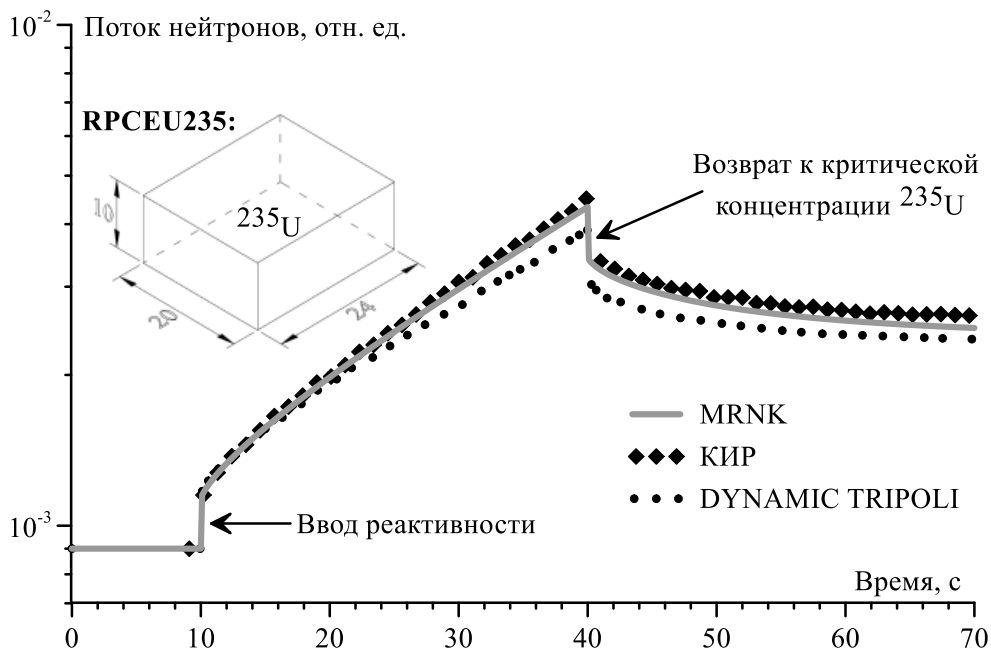


Рисунок 3 – Изменение плотности потока нейтронов, рассчитанное по программам КИР, Dynamic TRIPOLI 4.7 и MRNK

**Тестовые задачи ВВЭР-ВН, ВВЭР-ВВ и ВВЭР-КР.** Все тестовые задачи имеют одинаковую геометрию расчетной области, которая представляет собой бесконечную в плане решетку твэлов, близкую к критическому состоянию, с размерами, характерными для реактора ВВЭР-1000. Твэлы омываются легководным теплоносителем.

В тесте ВВЭР-ВН моделируется процесс длительностью 8 секунд. В течение первой секунды система находится в критическом состоянии, без содержания бора в воде. После этого в нижнюю половину области, занимаемой водой, мгновенно добавляется  $\text{B}^{10}$ , а на 4 секунде, он также мгновенно убирается.

В тесте ВВЭР-ВВ моделируется процесс длительностью 2 секунды. В начальном критическом состоянии в нижнюю область, занимаемой водой, добавлен  $\text{B}^{10}$ . Сразу после начала процесса бор мгновенно убирается из воды и в таком состоянии система остается до конца процесса.

В тесте ВВЭР-КР моделируется процесс длительностью 1000 секунд. Начальные условия процесса те же, что для теста ВВЭР-ВВ. Сразу после начала процесса бор мгновенно перемещается из нижней половины области воды в верхнюю половину и в таком состоянии система сохраняется до конца процесса.

На рисунке 4 приведены результаты расчета тестов ВВЭР-ВН, ВВЭР-ВВ и ВВЭР-КР. Для решения задачи по программе MRNK в рамках многозонного приближения топливная область была разбита по высоте на 120 равнообъемных подобластей.

Сопоставление результатов расчетов серии тестов ВВЭР по программам MRNK и КИР показало, что отклонения по интегральной плотности потока нейтронов от программы КИР во всех задачах лежат в пределах 1-6%. Максимальное различие между программами MRNK и СТАРТ-УНК в задаче ВВЭР-ВН составило 7%.

Для исследования пространственного изменения характеристик системы для каждого теста по программам MRNK и КИР были получены профили плотности потока нейтронов по высоте в различные моменты времени. Расхождение между программами MRNK и КИР по распределению плотности потока по высоте не превышает 7% в зонах, где формируется максимальная плотность потока.

Кроме этого в приведенных в диссертационной работе результатах расчета тестов по программе MRNK показано, что при решении тестовых задач по однотоочечному приближению без учета спектра испускания запаздывающих нейтронов появляется сильное отклонение (на порядок в тестах ВВЭР-ВВ и ВВЭР-КР) от результатов расчета в многозонном приближении.

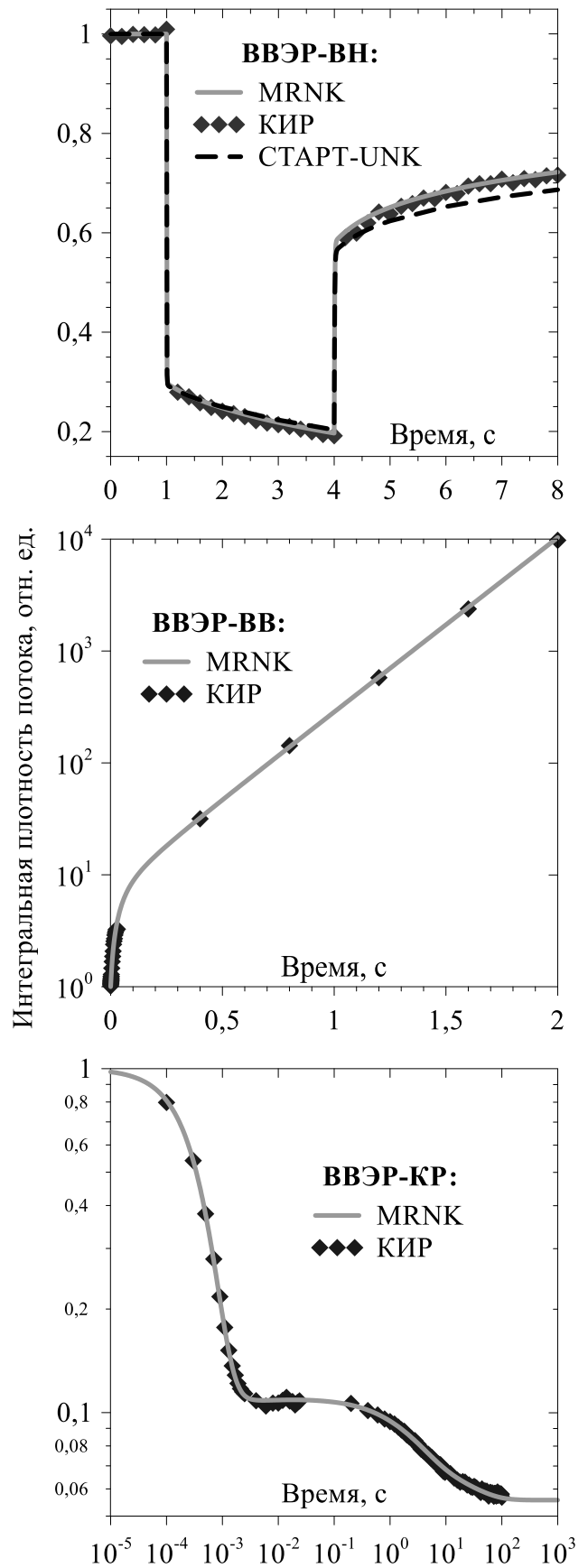


Рисунок 4— Результаты расчета тестов ВВЭР-ВН, ВВЭР-ВВ и ВВЭР-КР

### Моделирование кинетики активной зоны реактора КЛТ-40С.

Представлены результаты совместного моделирования нейтронной кинетики активной зоны реактора КЛТ-40С водо-водяного типа по программам MRNK и КИР. В расчетах использовалась полномасштабная гетерогенная модель, созданная на базе языка исходных данных программы MSU-TR.

Рассмотрены процессы с перемещением пучка стержней в одном канале, а также с перемещением отдельных групп стержней при условии сохранения стационарной критичности. В расчетах, кроме интегральной мощности энерговыделения, определялись плотности потока тепловых нейтронов в ионизационных камерах, расположенных за пределами активной зоны.

При моделировании процессов нейтронной кинетики КЛТ-40С использовалось одно и то же начальное состояние, определяемое критическим положением стержней регулирования. При этом считается, что в начальном состоянии все стержни установлены на одинаковое положение 50,38 см.

**Перемещение стержней в центральной ТВС.** Моделируется процесс извлечения пучка стержней в центральной ТВС (рисунок 5) из критического положения со скоростью 34,81 см/сек до верхнего края топливной части и, после двухсекундной паузы, их обратного спуска с той же скоростью до исходного состояния. Общая реактивность, при полном выведении стержней, составляет  $\sim 0,07\beta$ .

На рисунке 6 приведены результаты расчета процесса по программам MRNK и КИР. Результаты по программе MRNK были получены с выделением 194 подобластей и в одноточечном приближении и практически совпали. Максимальное расхождение результатов расчета мощности по программам MRNK и КИР составляет 2,5%.

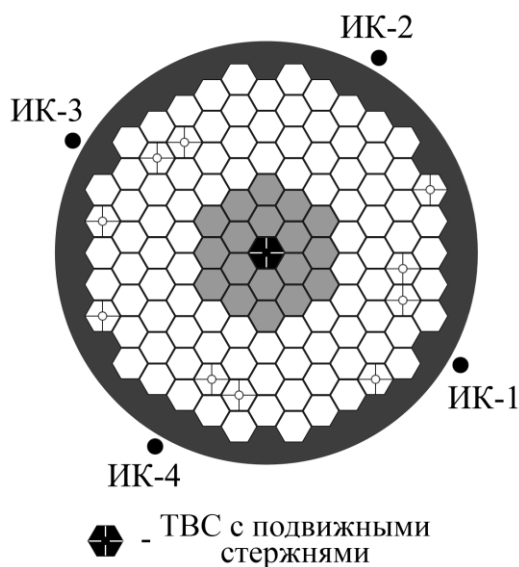


Рисунок 5 – Расположение ТВС с подвижными стержнями

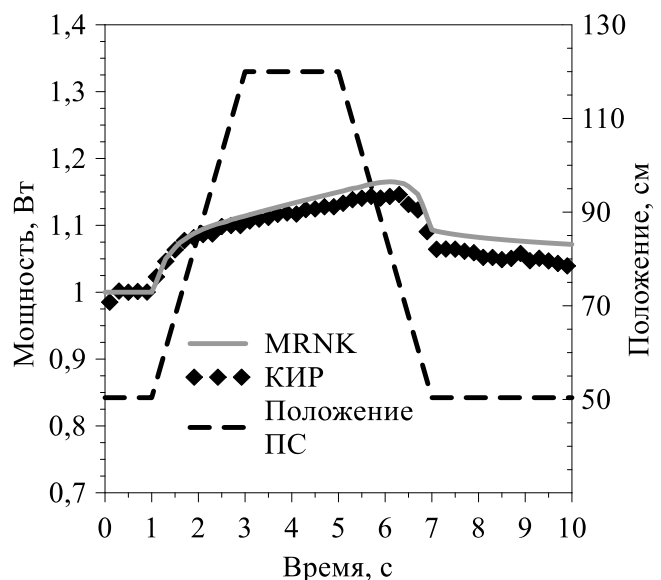


Рисунок 6 – Изменение интегральной мощности активной зоны, а также изменение положения пучка поглощающих стержней (ПС) в центральной ТВС



На рисунке 7 представлены расчетные распределения энерговыделения по высоте в центральной ТВС на моменты времени 1, 5 и 10 с. Форма распределения слабо меняется с течением времени, а пик энерговыделения сохраняется в нижней половине.

Изменение энерговыделения в верхнем, двадцатом, аксиальном слое центральной ТВС, рассчитанное по программам MRNK и КИР, представлено на рисунке 8. Ход кривой энерговыделения этом слое качественно отличается от изменения интегральной мощности. Можно отметить согласованность результатов расчета.

Результаты расчета плотности потока тепловых нейтронов в ионизационных камерах ИК-1, ИК-2, ИК-3 и ИК-4 показали, что общий ход кривых изменения плотности потока повторяет изменение интегральной мощности и расхождение результатов расчета по программам MRNK и КИР в течение всего процесса не превышает 2,5%.

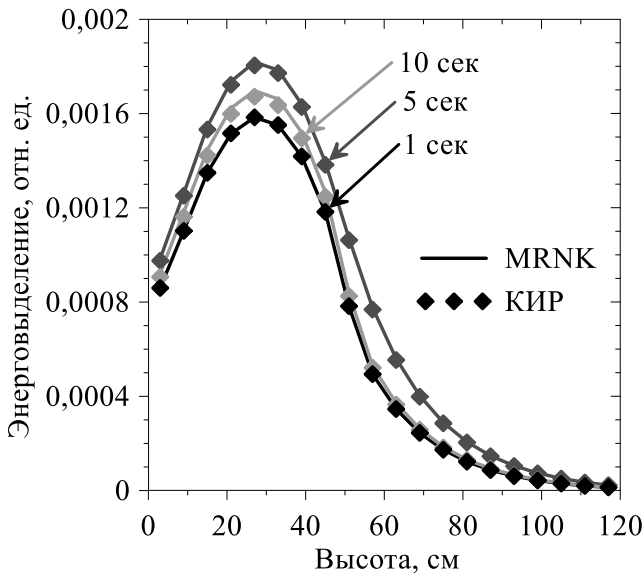


Рисунок 7 – Аксиальные распределения энерговыделения центральной ТВС в разные моменты времени

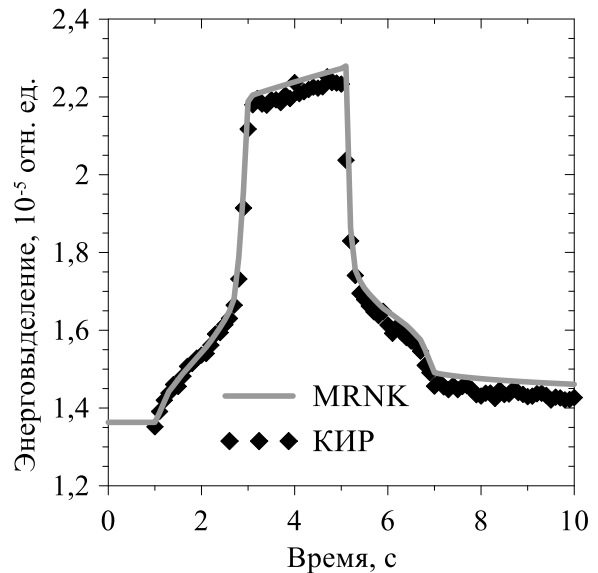


Рисунок 8 – Результаты расчета изменения энерговыделения в верхнем, двадцатом, слое центральной ТВС

**Перемещение групп стержней.** Моделируется следующий процесс: с постоянной скоростью 1 см/сек погружаются стержни группы ГР-1 и одновременно извлекаются стержни ГР-3 (рисунок 9). Положение стержней ГР-3 специально подбиралось, чтобы в любой фиксированный момент времени обеспечивалась критичность активной зоны ( $K_{эф}=1$ ). Процесс моделируется до полного извлечения стержней ГР-3. Уровень погружения стержней остальных групп остается неизменным в критическом положении в течение всего процесса. На рисунке 10 приведены результаты расчета по программе MCU-TR движения групп стержней в виде абсолютного отклонения положений стержней ГР-1 и ГР-3 от критического положения.

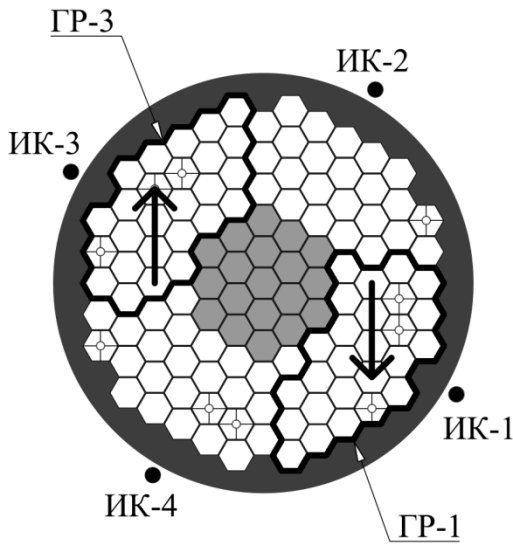


Рисунок 9 – Схема расположения подвижных групп стержней

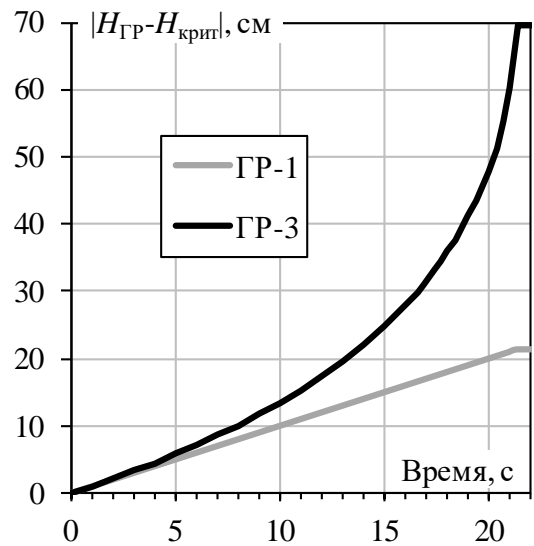


Рисунок 10 – Изменение расстояния между положением ( $H_{ГР}$ ) стержней групп ГР-1 и ГР-3 и критическим положением  $H_{крит} = 50,38$

На рисунке 11 приведены результаты расчета мощности по программам КИР и MRNK (329 подобластей). Также на график дополнительно нанесена кривая изменения мощности, полученная из решения уравнений одноточечной кинетики. Флуктуация результатов расчета программ проявляется в силу подробного масштаба графика. Для увеличения точности в данном случае требуется значительные временные затраты.

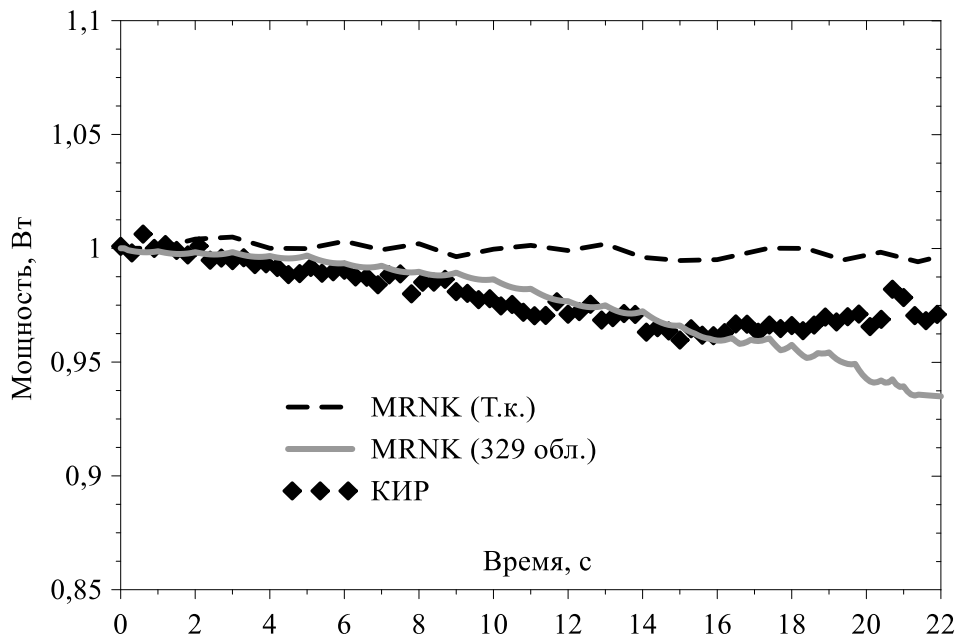


Рисунок 11 – Изменение интегральной мощности, рассчитанное по программам КИР, MRNK - 329 подобластей и по уравнениям точечной кинетики (Т.к.)

Результаты расчета плотности потока тепловых нейтронов в ионизационных камерах приведены на рисунке 12. Расхождение не превышает 4%.

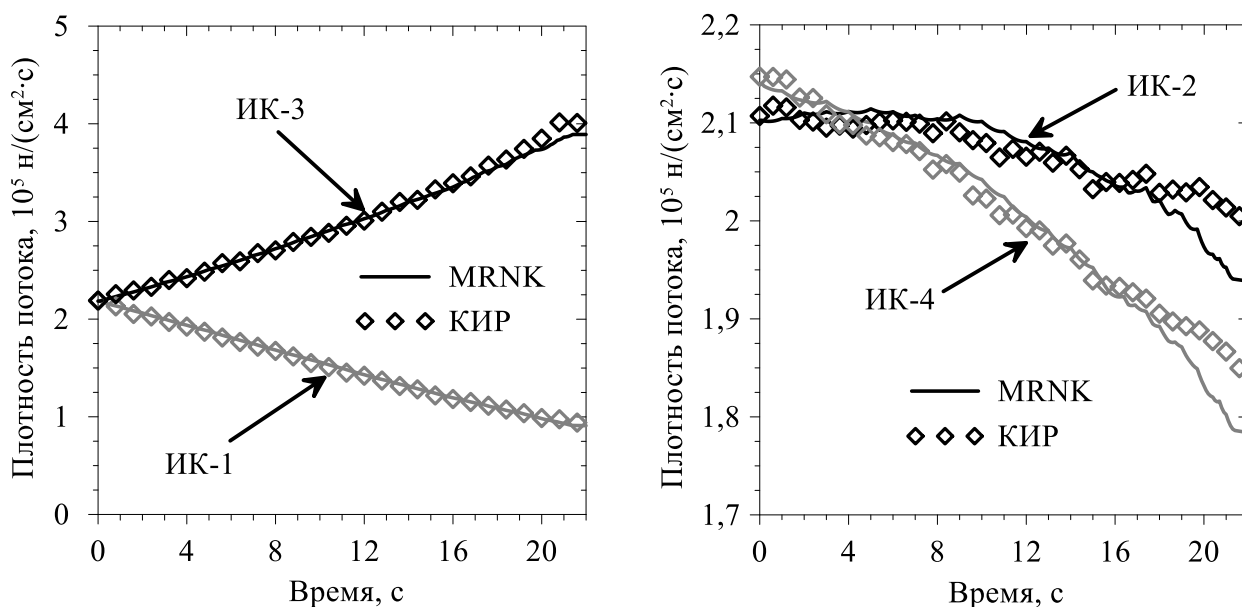


Рисунок 12 – Плотность потока тепловых нейтронов в ионизационных камерах ИК-1, ИК-3 (слева) и ИК-2, ИК-4 (справа)

Дополнительно в работе показано, что временные затраты моделирования процессов по программе КИР для большинства рассмотренных задач превышают на порядок временные затраты на моделирование по программе MRNK

**В четвертой главе** представлен комплекс программ MRNK+КЕДР-Д, объединяющий комплекс MRNK с разрабатываемым в НИЦ “Курчатовский институт” нестационарным теплогидравлическим кодом КЕДР-Д. Приведены результаты апробации разработанного комплекса на международном численном бенчмарке PWR MOX/UO<sub>2</sub> core transient benchmark.

Комплекс программ MRNK+КЕДР-Д работает на основе программы-оболочки, которая обеспечивает запуск программ MRNK и КЕДР-Д, контроль над расчетом, обмен данными, генерацию вариантов программы MCU-TR, проверку сходимости параметров, обработку результатов и т.д. Оболочка написана на языке FORTRAN и оптимизирована для работы на суперкомпьютере НИЦ “Курчатовский институт”.

В оболочке используется итерационная схема объединения программ. Хотя в практике часто используются явные схемы, выбор итерационной схемы был обусловлен точностью получаемых результатов и более сильной устойчивостью алгоритма к шагу по времени по сравнению с безытерационными схемами.

**Численный бенчмарк PWR MOX/UO<sub>2</sub>.** Активная зона состоит из 193 бесчехловых квадратных ТВС, типа PWR. В 54 ТВС применяется MOX-топливо, а в остальных установлено уран-диоксидное топливо. Во всех ТВС топливо считается выгоревшим, всего введено семь уровней глубины выгорания.

По данным бенчмарка была создана полномасштабная гетерогенная модель активной зоны на языке исходных данных MCU-TR. В первую очередь для подтверждения корректности созданной модели проводились расчеты стационарных состояний.

**Расчеты на  $K_{эф}$ .** По программе MCU-TR проведен расчет  $K_{эф}$  для двух состояний активной зоны: все стержни подняты и все стержни введены. Результаты расчета хорошо согласуются с результатами расчета как по нодальным, так и по гетерогенным программам. Отклонение по  $K_{эф}$  не превышает 0,4%.

**Расчет начального состояния для нестационарного процесса.** Проведено сопоставление результата подбора критической концентрации бора в воде с результатами других программ для начального критического состояния, из которого в нестационарной задаче будет моделироваться аварийное извлечение стержня. Максимальное отклонение по значению концентрации составило ~ 8%.

**Расчет нестационарного процесса.** Моделируется аварийный процесс – полное извлечение связки стержней регулирования в одной из ТВС с постоянной скоростью в течение 0,1 с. После этого стержни остаются неподвижными до конца процесса (полное время процесса – 1 с.). Начальная тепловая мощность активной зоны – 0,0001% от номинальной 3565 МВт.

Извлечение связки стержней дает сильный рост надкритичности системы, что приводит к быстрому разгону мощности на мгновенных нейтронах. За счет отрицательных обратных связей по теплофизическим свойствам системы, в основном из-за нагрева топлива, в течение короткого времени формируется пик, после которого мощность спадает на новый уровень.

Результаты расчета мощности по комплексу MRNK+КЕДР-Д представлены на рисунке 13. На том же графике приведены данные расчета по комплексам BARS, NUREC, SKETCH-INS, CORETRAN и PARCS. Эти комплексы использовали собственные теплофизические модули, описанные в спецификации бенчмарка.

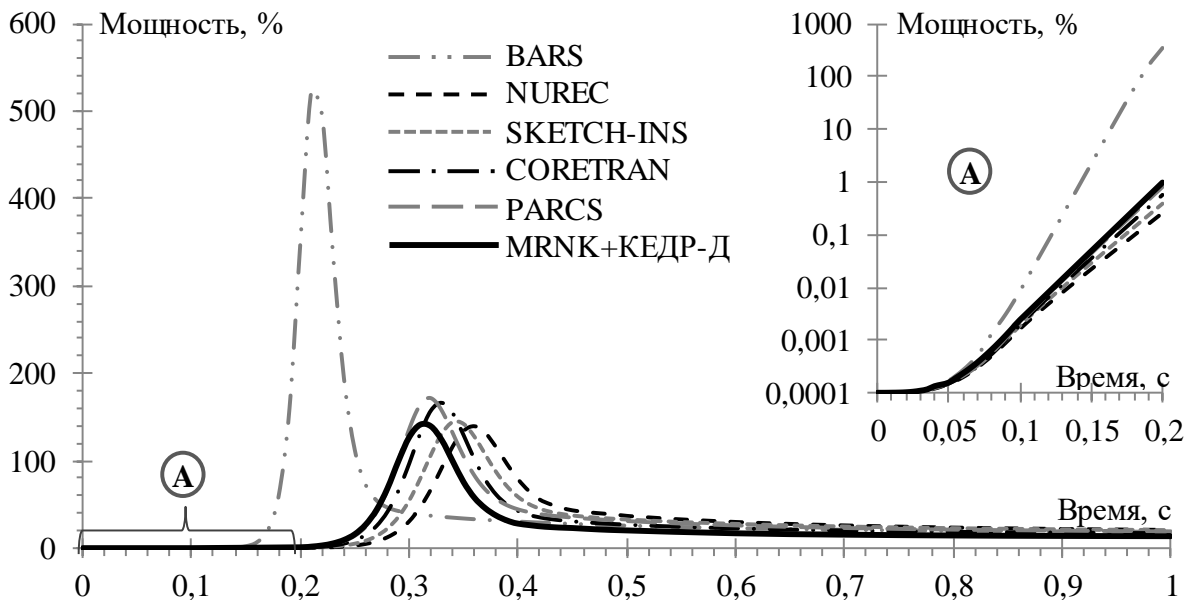


Рисунок 13 - Результаты расчета изменения тепловой мощности активной зоны

Как видно из результатов кривая изменения мощности, рассчитанная по комплексу MRNK+КЕДР-Д, согласуется с результатами расчета нодальных программ. До начала влияния обратных связей по нагреву топлива результаты практически совпадают с комплексом PARCS.

Результаты изменения усредненной по активной зоне доплеровской температуры топлива, рассчитанные по тем же комплексам, представлены на рисунке 14. Подогрев топлива за счет роста мощности приводит к снижению скорости роста энерговыделения, и после достижения пика, к его падению. Результаты расчета подогрева топлива, также как и для мощности, наилучшим образом согласуются с комплексом PARCS.

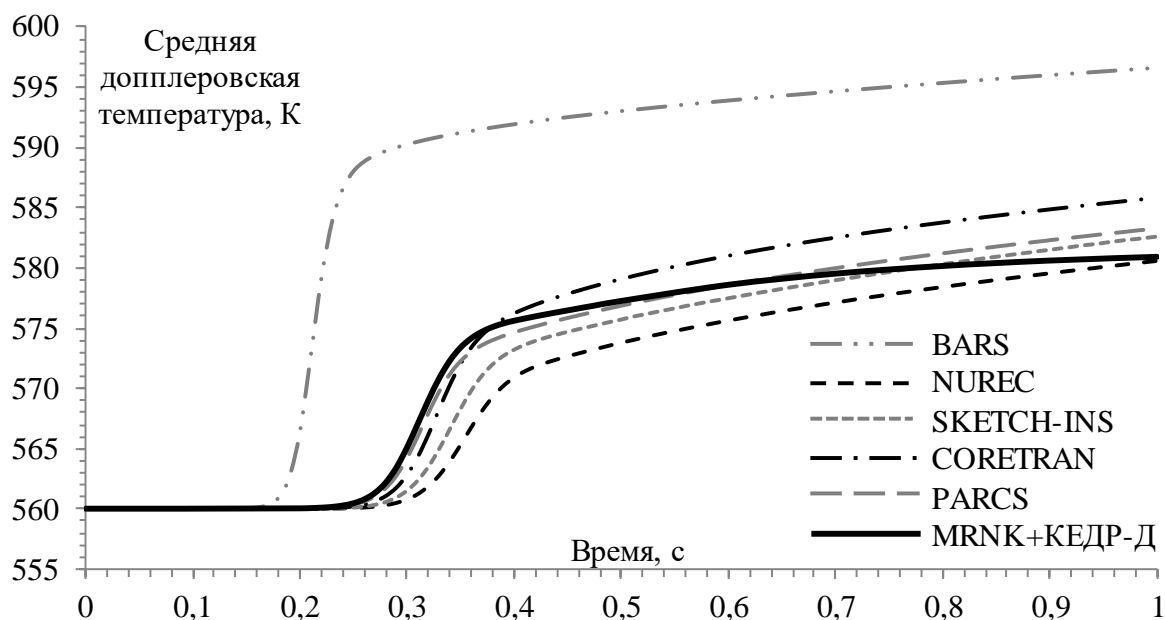


Рисунок 14 - Результаты расчета изменения усредненной по активной зоне доплеровской температуры топлива

Характеристики процесса изменения мощности (момент достижения пика и пиковая мощность), полученные по нодальным программам и по комплексу MRNK+КЕДР-Д сведены в таблице 2. Как видно из приведенных данных время достижения пика и его мощность несущественно отклоняются от других программ. Максимальное отклонение по мощности в пике составляет 18% от программы PARCS, а по времени достижения пика - 14% от программы NUREC.

Таблица 2 – Сопоставление времени пика и пиковой мощности

Программы	Момент достижения пика, с	Пиковая мощность, %
CORETRAN	0,33	166
NUREC	0,36	139
PARCS	0,32	172
SKETCH-INS	0,34	144
MRNK	0,31	141

Кроме результатов расчета интегральных величин приведены результаты расчета распределения нормированного энерговыделения по ТВС активной зоны и

отклонения этой величины в каждой ТВС от результатов программы PARCS. Основное расхождение проявляется в конце процесса в группах ТВС с наименьшим энерговыделением, максимальное отклонение составляет 12,59%. Однако взвешенное по мощности отклонение  $\delta_{PWE} = 3,3\%$ , показывает, что в областях с наибольшим энерговыделением отклонение незначительно.

Исходя из сравнения с опорными данными, можно заключить, что, в целом, результаты удовлетворительно согласуются с результатами расчета по программам, использующим нодальные методы.

В **заключении** диссертации приведены основные результаты работы.

Работа была выполнена с использованием оборудования центра коллективного пользования «Комплекс моделирования и обработки данных исследовательских установок мега-класса» НИЦ «Курчатовский институт» (субсидия Минобрнауки, идентификатор работ RFMEFI62117X0016), <http://ckp.nrcki.ru/>.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Основными результатами работы и положениями, выносимыми на защиту, являются:

1. Предложена расширенная математическая модель многозонной кинетики с возможностями вычисления групповой плотности потока нейтронов в выделенных областях системы и учета обратных связей по теплофизическим свойствам материалов.

2. Для решения уравнений многозонной кинетики разработана двухэтапная методика, в которой обменные коэффициенты для всех типов рожденных нейтронов, в том числе и запаздывающих нейтронов, вычисляются на основе метода Монте-Карло с применением современной многопроцессорной вычислительной техники, а численное решение дифференциальных уравнений проводится с использованием быстродействующего адаптированного неявного (3,2) метода.

3. На основе разработанных алгоритмов и численных схем созданы комплексы программ расчета нейтронно-физических процессов MRNK и расчета динамических процессов MRNK+КЕДР-Д. Комплексы были верифицированы применительно к активным зонам реакторов водо-водяного типа на основе результатов решения тестовых и модельных задач нейтронной кинетики, а также расчета динамического процесса международного бенчмарк-теста PWR MOX/UO<sub>2</sub> core transient benchmark.

4. Продемонстрирована эффективность использования модели многозонной кинетики для решения представленных в работе задач, связанных с моделированием нейтронной кинетики, в частности, показана возможность получения высокой точности результатов, сопоставимой с точностью прямого моделирования методом Монте-Карло, но с использованием меньших вычислительных ресурсов.

**ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Основное содержание диссертационной работы и ее результатов отражено в 7 научных работах:

1. **Иоаннисиан М.В.** Расчет коэффициентов связи для уравнений многоточечной кинетики // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 2012, вып. 1. Стр 27-33.
2. **Иоаннисиан М.В., Давиденко В.Д.** Расчетное моделирование кинетических процессов с использованием метода Монте-Карло // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-реакторные константы, вып. 1, 2018, стр. 47-56.
3. **Давиденко В.Д., Иоаннисиан М.В.** Тестовые задачи для верификации нестационарных программных комплексов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-реакторные константы, вып. 1, 2018, стр. 137-149.
4. **Иоаннисиан М.В.** Определение потока нейтронов на основе метода многоточечной кинетики // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2018, вып. 1, с. 10–23.
5. **Иоаннисиан М.В., Гомин Е.А., Давиденко В.Д.** Моделирование нейтронной кинетики активной зоны реактора КЛТ-40С с применением метода Монте-Карло // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2018, вып. 1, с. 24–35.
6. **Гольцев А.О., Гомин Е.А., Давиденко В.Д., Зинченко А.С., Иоаннисиан М.В., Ковалишин А.А.** Тестовая задача ВВЭР-ВН для верификации нестационарных программных комплексов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2018, вып. 1, с. 36–42.
7. **Иоаннисиан М.В., Быков В.П., Закиров С.Ю., Дьячков И.И.** Верификация метода многозонной кинетики на примере численного бенчмарк-теста // Атомная энергия, 2019, том 126, номер 2, с. 116-119.