

На правах рукописи
УДК 621.039.5

Чернова Ирина Сергеевна



**Создание и использование программ полномасштабной
пространственной кинетики для расчетов реакторов на быстрых
нейтронах**

Специальность 05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая
проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор технических наук,
заведующий лабораторией ИБРАЭ РАН
Селезнев Евгений Федорович.

Официальные оппоненты: Жемков Игорь Юрьевич,
доктор технических наук,
начальник лаборатории АО «ГНЦ НИИАР»;

Болсунов Андрей Александрович,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник АО
«ВНИИАЭС».

Ведущая организация: Федеральное Государственное унитарное
предприятие «Научно-исследовательский
технологический институт имени
А.П.Александрова».

Защита состоится «8» февраля 2018 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.070.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук по адресу: 115191, г. Москва, ул. Б. Тульская, д. 52.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук и на сайте www.ibrae.ac.ru/contents/320.

Автореферат разослан «__» _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н.



В.Е. Калантаров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Тепловые реакторы в настоящее время составляют основную платформу атомной энергетики не только в России, но и в мире. Но они не способны разрешить современные проблемы отрасли, заключающиеся в постоянном увеличении количества отработавшего ядерного топлива и радиоактивных отходов и в неэффективном использовании запасов природного урана, даже при замыкании топливного цикла. Успешный опыт России в области промышленной эксплуатации реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем (БН-600 и БН-800) позволяет сформировать в стране двухкомпонентную ядерную энергетику, при которой тепловые реакторы работают на избыточном ядерном топливе, нарабатываемом в быстрых реакторах.

Обязательное условие, способствующее успешной реализации данной стратегии, заключается в обеспечении безопасности как отдельных комплексов (реакторных установок (РУ), перерабатывающих заводов и т.д.), так и всей отрасли в целом.

Технологии быстрых реакторов существенно отличаются от тепловых прежде всего из-за принципиально противоположного подхода к условиям для осуществления цепной реакции деления.

При работе ядерный реактор крайне редко находится в критическом состоянии, поскольку изменение хотя бы одного технологического параметра (например, температуры или расхода теплоносителя, положения органов регулирования и т.д.) из-за тесной связи физических свойств его параметров неизбежно находит отклик в изменении локальных характеристик его среды и становится причиной переходных режимов. То есть при эксплуатации реактора в нем постоянно протекают многочисленные нестационарные процессы. Ужесточающиеся требования ядерной безопасности увеличивают потребность в развитии кодов качественного нестационарного расчета кинетики реактора.

Большинство современных программ по решению прямой нестационарной задачи переноса нейтронов основано на использовании предположения о пространственно-временном разделении переменных в аргументах функции плотности потока нейтронов. В таком случае происходит искажение причинно-следственной связи процессов, наблюдаемых в реакторе при нестационаре: возмущение реактора описывается одним параметром в решаемых уравнениях – реактивностью, которая определяется еще до начала нестационарного процесса. Прямое численное решение уравнения переноса нейтронов лишено данного недостатка, поскольку возмущение реактора описывается через состояние локальных характеристик среды в рассматриваемый момент времени.

При рассмотрении реализованных и разрабатываемых проектов быстрых реакторов с натриевым теплоносителем наблюдается тенденция к уплощению активной зоны, что требует анализа проявления пространственных эффектов, которые могут отразиться на эксплуатации реактора. Наличие изотопов плутония в смешанном уран-плутониевом

оксидном топливе (МОКС топливе) неизбежно приведет к уменьшению доли запаздывающих нейтронов, что также отразится на параметрах безопасности РУ.

Программы полномасштабной пространственной кинетики могут стать надежным инструментом по анализу временного поведения быстрого реактора. Отказ от приближенных схем при решении нестационарного уравнения переноса нейтронов позволяет отслеживать состояние локальных характеристик реально наблюдаемых в реакторе в рассматриваемый момент времени, что открывает перспективы по созданию новых инструментов, предназначенных для анализа влияния пространственных эффектов. Например, еще на стадии проектирования реактора можно обосновать место размещения детектора таким образом, чтобы обеспечить наименьшее изменение его эффективности в процессе эксплуатации, что повлияет на точность работы оборудования и экспериментов, основанных на обработке их показаний. Также можно выявить такие области реактора, движение поглощающих стержней в которых обеспечит наиболее быстрый и стабильный выход реактора в асимптотику.

Цели и задачи исследования

Исходя из вышеописанных проблем, целью настоящей диссертационной работы является создание программ полномасштабного прямого и обратного решения задачи кинетики реактора на быстрых нейтронах для проведения исследовательских, проектных и экспериментальных расчетов.

Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать программу решения прямой многогрупповой задачи переноса нейтронов в трехмерной гексагональной геометрии реактора на быстрых нейтронах в диффузионном приближении без использования приближенных схем решения;
- разработать программу решения обратной задачи кинетики с учетом пространственных эффектов;
- провести расчетные исследования пространственно-временных задач кинетики реактора на быстрых нейтронах;
- разработать инструменты по решению задач оптимизации места расположения детектора и места внесения возмущения в реактор;
- на основе разработанных программ по решению прямой задачи кинетики без использования приближенных схем и обратной задачи кинетики провести анализ различных широко распространенных приближенных схем решения прямой задачи кинетики и обосновать погрешности приближенных схем.

Научная новизна

Научная новизна работы состоит в следующем:

- При использовании разработанных программ впервые был обнаружен и исследован эффект изменения эффективности стержней СУЗ в зависимости от протекающих на момент их движения процессов в реакторе. Показано, что реальные эксперименты по

измерению эффективности стержней СУЗ, проведенные по одной и той же методике, могут продемонстрировать различную эффективность одного и того же стержня при его сбросе в активную зону с различной скоростью. Более того, фактическая эффективность стержней аварийной защиты (АЗ) при их вводе в реактор при срабатывании уставки по скорости нарастания плотности нейтронного потока будет меньше рассчитанной из стационарных оценок или экспериментально измеренной при штатных условиях.

- Впервые разработаны инструменты по решению задачи оптимизации места расположения детектора в реакторе на основе численного решения прямой нестационарной пространственной задачи кинетики реактора без использования приближенных схем.
- Впервые разработаны инструменты по решению задачи оптимизации места внесения возмущения в реактор на основе анализа первой гармоники.
- Решение прямой нестационарной задачи переноса нейтронов без использования приближенных схем впервые было применено для обоснования погрешностей различных приближенных схем (в том числе и разработанных комбинированных схем), основанных на пространственно-временном разделении переменных плотности потока нейтронов. На основе проведенного анализа разработана комбинированная приближенная схема решения нестационарной задачи переноса нейтронов.

Практическая значимость и предложения по внедрению результатов работы

Практическая значимость проведенной работы заключается в следующем:

- Разработанные программы решения прямой пространственной нестационарной задачи переноса нейтронов TIME-800 и решения обратной задачи кинетики TIME_INVERSE входят в состав аттестованного программно-технического комплекса ГЕФЕСТ800, предназначенного для сопровождения эксплуатации РУ БН-800.
- Разработанные инструменты решения задачи оптимизации места расположения детектора и задачи оптимизации места внесения возмущения в реактор могут быть использованы при конструировании РУ для минимизации пространственных эффектов в процессе ее эксплуатации, а также при планировании экспериментов.

Положения, выносимые на защиту

- Разработанные программы решения прямой и обратной задачи кинетики;
- Разработанные инструменты по решению оптимизационных задач по месту внесения возмущения в активную зону и месту расположения детекторов;

- Комбинированная приближенная схема решения нестационарной задачи переноса нейтронов.

Достоверность результатов

Достоверность результатов расчетов была подтверждена в рамках работ по верификации программно-технического комплекса ГЕФЕСТ800, предназначенного для сопровождения эксплуатации РУ БН-800, в состав которого включены созданные программы решения прямой пространственной нестационарной задачи переноса нейтронов TIME-800 и решения обратной задачи кинетики TIME_INVERSE.

Достоверность результатов комбинированных приближенных схем решения прямой задачи кинетики основана на сравнении с реперными расчетами по программе TIME-800.

Апробация работы

Основные положения диссертации докладывались на следующих мероприятиях:

- Межведомственный XXIII семинар «Нейтронно–физические проблемы атомной энергетики с замкнутым топливным циклом» (Нейтроника-2012), г. Обнинск, 30.10.2012 - 01.11.2012 г.;
- International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Safe Technologies and Sustainable Scenarios (FR13), г. Париж, Франция, 4 - 7 марта 2013 г.;
- XIV научная школа молодых ученых ИБРАЭ РАН, г. Москва, 25 - 26 апреля 2013 г.;
- Межведомственный XXIV семинар «Нейтронно–физические проблемы атомной энергетики с замкнутым топливным циклом» (Нейтроника 2013), г. Обнинск, 6 - 8 ноября 2013 г.;
- XV научная школа молодых ученых ИБРАЭ РАН, г. Москва, 24 - 25 апреля 2014 г.;
- International Conference on the Physics of Reactors: The Role of Reactor Physics towards a Sustainable Future (PHYSOR 2014), Киото, Япония, 28.09.2014 - 03.10.2014 г.;
- Межведомственный XXV семинар «Нейтронно–физические проблемы атомной энергетики с замкнутым топливным циклом» (Нейтроника-2014), г. Обнинск, 21 - 24 октября 2014 г.;
- Научно техническая конференция «Нейтронно–физические проблемы атомной энергетики с замкнутым топливным циклом» (Нейтроника-2015), г. Обнинск, 12 - 16 октября 2015 г.;
- XVI научная школа молодых ученых ИБРАЭ РАН, г. Москва, 23 - 24 апреля 2016 г.;
- International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR17), г. Екатеринбург, Россия, 26 – 29 июня 2017 г.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 16 научных работ, из них 4 работы напечатаны в ведущих реферируемых отечественных журналах из списка, рекомендованного ВАК при Минобрнауки России. Список публикаций приведен в конце автореферата.

Личный вклад автора

Все результаты научных работ по теме исследования получены диссертантом лично или при непосредственном участии автора, а именно:

- Реализованы алгоритмы решения прямой нестационарной задачи переноса нейтронов без использования приближенных схем в программе TIME-800 и обратной задачи кинетики с учетом пространственных эффектов в программе TIME_INVERSE.
- По разработанным программам проведены расчетные исследования нестационарных процессов в реакторах на быстрых нейтронах с последующим анализом полученных результатов.
- Разработаны инструменты решения оптимизационных задач по месту внесения возмущения в активную зону и месту расположения детекторов;
- Проведены стационарные и нестационарные расчеты для обоснования погрешностей приближенных схем решения. На основе анализа результатов данных расчетов созданы комбинированные приближенные схемы решения нестационарной задачи переноса нейтронов.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 96 библиографических ссылок и двух приложений. Общий объем работы составляет 123 страницы, включая 9 таблиц и 29 рисунков (в том числе и графики).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы её основные цели, задачи, научная новизна, практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту, степень достоверности, личный вклад автора, апробация и публикации.

Глава 1 посвящена обзору различных задач кинетики реакторам и методов их решения. Можно выделить два основных направления: прямая (определение пространственного распределения поля нейтронов и мощности реактора в конкретный момент времени по известному механизму возмущения реактора) и обратная (определение различных параметров реактора, в частности — возмущения, по временному изменению его мощности) задачи.

Для решения прямой нестационарной задачи переноса нейтронов наибольшее распространение на практике получили различные приближенные схемы, основанные на пространственно-временном разделении аргументов функции плотности потока нейтронов (например

приближение точечной кинетики, адиабатическое, квазистатическое или улучшенное квазистатическое приближения). При этом исходная задача разбивается на ряд подзадач по определению форм-функции $\phi^g(\mathbf{r}, t)$, ценности нейтронов деления $\nu^g(\mathbf{r})$, параметров кинетики ($\beta_{\text{эф}}$, Λ и т.п.), реактивности ρ , амплитудной функции $T(t)$ и т.д. Само понятие возмущения реактора описывается вводом в реактор ненулевой реактивности $\rho \neq 0$, которая должна быть определена еще до начала нестационарного процесса. Отсюда следует, что в приближенных схемах решения реактивность выступает в роли причины нестационарного процесса, т.е. является определяющим фактором изменения мощности реактора.

Современные мощности ЭВМ позволяют использовать прямое конечно-разностное численное решение нестационарного уравнения переноса нейтронов без применения приближенных схем. В процессе решения задачи оперируют только реально существующими параметрами и соблюдается естественная причинно-следственная связь процессов возмущения реактора. Возмущение реактора происходит за счет изменения распределения нейтронно-физических характеристик реактора (например, вследствие перемещения стержней СУЗ), на которое реактор реагирует перераспределением плотности потока нейтронов с последующим изменением локального энерговыделения и мощности реактора в целом. При этом решается только одна задача по определению потока нейтронов. Поскольку реактивность не входит в состав решаемых уравнений и, соответственно, не определяется в процессе решения прямой задачи, то ее изменение в течение нестационарного процесса может быть дополнительно определено по анализу истории изменения мощности. Этот факт подчеркивает, что рассматриваемому методу решения прямой задачи присуща естественная причинно-следственная связь между процессами, действительно протекающими в реакторе при нестационарных процессах, то есть реактивность является следствием самого нестационарного процесса, а не его первопричиной.

В разделе 1.2 приведен обзор программ по решению прямой задачи кинетики, среди которых можно выделить:

- PARTISN (интегральный код SIMMER), CORNER, DORT-TD, TORT-TD, основанные на детерминистическом подходе;
- TDMC, SERPENT 2, TRIPOLI, TMCC, TDMCC, KIP, TDKENO, основанные на стохастическом подходе;
- ГЕФЕСТ, JAR-FR, TRIGEX, ERANOS, DIF3D, модуль SNATCH кода SIMMER, FRENETIC, RELAP5-3D, SYNTES, DINA, HEXTIME (инженерный подход).

В обзоре показано, что наиболее широкое распространение получили приближенные схемы решения, основанные на пространственно-временном разделении переменных потока нейтронов. Прямое конечно-разностное решение нестационарной задачи без использования приближенных схем для трехмерной геометрии было разработано в конце 80-х годов для двухгруппового диффузионного приближения в программе HEXTIME. Но, к сожалению, из-за длительного времени счета и больших требованиях к

вычислительным ресурсам она не нашла широкого распространения в практике расчета нейтронно-физических задач и на данный момент нигде не используется.

Тем не менее, подобные программы могут быть использованы:

- для анализа быстропротекающих процессов, когда невозможно использовать представление о пространственно–временном разделении переменных;
- для исследования изменения локальных характеристик, в том числе при исследовании пространственных эффектов;
- в качестве реперного расчета для анализа точности приближенных схем.

В **разделе 1.3** кратко приведены основные этапы развития методов решения обратной задачи кинетики через обращенное решение уравнения кинетики (ОРУК). На данный момент широко используется трехпараметрическое (относительно реактивности ρ , эффективного источника $S_{эф}$ и эффективности детектора ω) ОРУК, модификации которого различаются в определении понятия «эффективность детектора».

Глава 2 посвящена решению прямой задачи переноса нейтронов: содержит постановку задачи, способы ее решения (как при помощи приближенных схем, так и без них), описание разработанной программы.

Во **разделе 2.1** приведена постановка прямой задачи кинетики реактора. Система уравнений, описывающих нестационарную задачу переноса нейтронов в реакторе в многогрупповом диффузионном приближении с учетом запаздывающих нейтронов и внешнего источника нейтронов имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{1}{v^g} \frac{\partial \psi^g(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = D^g \Delta \psi^g(\mathbf{r}, t) - \Sigma_a^g \psi^g(\mathbf{r}, t) + \sum_{l=1}^{g-1} \Sigma_s^{l \rightarrow g} \psi^l(\mathbf{r}, t) + \\ + \chi_{mn}^g \left(1 - \sum_{j=1}^{JD} \beta_j \right) \sum_{l=1}^G v \Sigma_f^l \psi^l(\mathbf{r}, t) + \sum_{j=1}^{JD} \sum_{n=1}^N \chi_{zn,j}^{g,n} \lambda_j^n C_j^n(\mathbf{r}, t) + Q^g(\mathbf{r}, t), \\ \frac{\partial C_j^n(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = -\lambda_j^n C_j^n(\mathbf{r}, t) + a_j^n \sum_{l=1}^G v_{zn}^l \Sigma_f^l \psi^l(\mathbf{r}, t), \end{cases}$$

с граничными условиями $\left. \frac{\partial \psi(\mathbf{r}, t)}{\partial \mathbf{r}} \right|_{r_g} = -\frac{\gamma^g(\mathbf{r}) \psi(\mathbf{r}, t)}{D^g(\mathbf{r}, t)} \Big|_{r_g}$ и начальными

условиями $\psi(\mathbf{r}, 0) \Big|_{v_0} = \psi_0(\mathbf{r})$, где v^g – скорость нейтронов группы g , м/с; $\psi^g(\mathbf{r}, t)$ – плотность потока нейтронов в момент времени t в точке реактора с координатами \mathbf{r} , нейтр./см²с; D – коэффициент диффузии см²/с; Σ_a – макроскопическое сечение поглощения нейтронов, см⁻¹; $\Sigma_s^{l \rightarrow g}$ – макроскопическое сечение перевода нейтронов из группы l в группу g , см⁻¹; χ_{mn}^g – спектр мгновенных нейтронов деления; JD – число групп запаздывающих нейтронов; β_j – доля группы j запаздывающих нейтронов; G

– число энергетических групп многогруппового приближения; ν – число нейтронов деления; Σ_f – макроскопическое сечение деления, см^{-1} ; N – число делящихся нуклидов; $\chi_{\text{зн},j}^{g,n}$ – энергетический спектр запаздывающих нейтронов группы j делящегося нуклида n ; λ_j^n – постоянная распада предшественников запаздывающих нейтронов группы j делящегося нуклида n , с^{-1} ; C_j^n – концентрация предшественников запаздывающих нейтронов группы j делящегося нуклида n ; Q – интенсивность внешнего источника нейтронов; a_j^n – относительный выход запаздывающих нейтронов группы j делящегося нуклида n ; $\nu_{\text{зн}}^n$ – число запаздывающих нейтронов деления; $\gamma^g(\mathbf{r})$ – величина, определяющая тип граничных условий.

Раздел 2.2 посвящен описанию разработанной программы решения прямой пространственно-временной задачи кинетики реактора. Решение нестационарной задачи переноса нейтронов для трехмерной гексагональной геометрии реализовано в модуле нестационарного расчета (TIME-800) аттестованного и верифицированного программно-технического комплекса (ПТК) ГЕФЕСТ800. Решение осуществляется несколькими способами:

1. Конечно-разностным методом без использования приближенных схем с учетом внешнего источника, спектра мгновенных и запаздывающих нейтронов;
2. Квазистатическим приближением с параметрами кинетики реактора, переопределяемыми несколькими способами;
3. Улучшенным квазистатическим приближением с учетом спектров мгновенных и запаздывающих нейтронов и отслеживанием концентрации предшественников запаздывающих нейтронов в каждой расчетной ячейке реактора на каждом шаге нестационарного процесса.

В первом способе решается исходное нестационарное уравнение переноса нейтронов, записанное в конечно-разностном виде. Решение осуществляется при помощи метода верхней точечной релаксации Гаусса - Зейделя. Второй и третий способы реализуют приближенные схемы решения.

Программа TIME-800 написана на алгоритмическом языке Fortran и подсоединена к системной оболочке, обеспечивающей пользовательские сервисы (контроль параметров, графика, подготовка данных, анализ результатов расчета) в интерактивном режиме.

В рамках ПТК ГЕФЕСТ800 программа TIME-800 взаимодействует с рядом программных модулей: программной оболочкой со встроенными программными модулями, базой данных моделей, топливным архивом, архивом сечений и программой подготовки констант CONSYST/БНАБ-93. Программа способна работать с шести- и восьмигрупповым представлением запаздывающих нейтронов. В качестве внешнего источника нейтронов используются нейтроны спонтанного деления или специальный источник нейтронов.

Источником возмущения реактора служит изменение свойств его среды за счет изменения положения стержней СУЗ. При пересчете распределения микро- и макроконстант также учитывается перемещение предшественников в стержнях СУЗ (если они содержат топливо). При этом константы Σ будут пересчитываться с учетом «веса» объема расчетной ячейки V_m и распределения плотности потока нейтронов по зонам стержня СУЗ Φ_m . Таким образом, движение стержней СУЗ осуществляется без ограничения со стороны высотного разбиения канала со стержнем.

Мощность стартового состояния реактора определяется мощностью внешнего источника нейтронов и его долей среди нейтронов нового поколения в исходном состоянии.

Программа позволяет одновременное размещение в разных точках реактора до шести детекторов, позволяющих отслеживать изменение локальных характеристик, а также одного интегрального детектора для отслеживания изменения характеристик реактора в целом (например, мощности). Значение реактивности вычисляется в результате обработки показаний детекторов через ОРУК.

К выходным параметрам программы TIME-800 относятся мощность (энерговыделение), реактивность, относительная эффективность детекторов, фактическая доля запаздывающих нейтронов.

Раздел 2.3 посвящен описанию приближенных схем решения нестационарной задачи переноса нейтронов. На примере улучшенного квазистатического приближения показан путь получения решаемых уравнений. Показаны основные упрощения, допускаемые при выводе уравнений квазистатического, адиабатического приближений и приближения точечного реактора.

Поскольку математически в приближенных схемах решения возмущение реактора сведено к одному параметру – реактивности, и она непосредственно определяет изменение мощности реактора, то погрешность реактивности будет определять точность самой схемы решения.

Можно выделить следующие источники ошибок:

- неизменность пространственного распределения поля нейтронов в течение всего нестационарного процесса (приближение точечной кинетики);
- определение реактивности осуществляется из асимптотического состояния, которое не наблюдается во время нестационарного процесса (квазистатическое и адиабатическое приближение);
- отсутствует учет накопления предшественников запаздывающих нейтронов (адиабатическое приближение);
- большая погрешность в определении реактивности при гетерогенном возмущении (улучшенное квазистатическое приближение);
- неопределенность в выборе сопряженной функции при переходе реактора через множество отличных критических состояний.

Глава 3 посвящена решению обратной задачи кинетики: показан путь получения решаемых уравнений, описана разработанная программа,

реализующая данный алгоритм и приведены результаты расчетов, демонстрирующих точность результатов.

Раздел 3.1 посвящен постановке обратной задачи кинетики и демонстрирует полный путь получения алгоритма ОРУК. На практике реактивность определяется в результате расчетного анализа наблюдаемого изменения мощности реактора через ОРУК, в основе которого лежит уравнение кинетики реактора:

$$\frac{\rho}{\beta_{эф}} = 1 - \frac{\sum_j \sum_n \lambda_j^n a_j^n \int_{-\infty}^t dt' e^{(-\lambda_j^n(t-t'))} T(t')}{T(t)} - \frac{Q_{эф}}{T(t)} + \frac{\Lambda}{\beta_{эф}} \frac{1}{T(t)} \frac{dT(t)}{dt},$$

где ρ – реактивность, $\beta_{эф}$ – эффективная доля запаздывающих нейтронов, Λ – время генерации мгновенных нейтронов, $Q_{эф}$ – эффективный источник внешних нейтронов, $T(t)$ – мощность реактора, которая в последующем представляется в виде произведения скорости счета детектора $N(t)$ и его эффективности $\epsilon(t)$.

Решение данного уравнения относительно ρ , ϵ и $Q_{эф}$ для случая эксперимента по измерению эффективности органов СУЗ РУ БН-800 реализовано в разработанной программы TIME_INVERSE.

Раздел 3.2 посвящен описанию программы TIME_INVERSE, входящую в состав ПТК ГЕФЕСТ800. Программа написана на объектно-ориентированном языке программирования Delphi и снабжена инструментами для подготовки и предварительной обработки экспериментальных сигналов, графического и табличного представления результатов, расчета эффективности одиночных стержней СУЗ и/или их группы, а также их интегральных характеристик. Реализован удобный импорт/экспорт данных и возможность потокового расчета серии экспериментальных сигналов.

Раздел 3.3 посвящен обоснованию точности обсчета экспериментальных сигналов по программы TIME_INVERSE. Определение достоверности результатов расчетов программы TIME_INVERSE проведено на трех сериях экспериментов по измерению эффективности стержней СУЗ РУ БН-600 и одной серии экспериментов – для РУ БН-800. Сравнение результатов осуществлялось как с результатами программы аналогичной области применения, так и с результатами стационарных расчетов.

Анализ результатов показал, что относительные погрешности результатов обсчета экспериментов по определению эффективности стержней СУЗ методом «разгон-сброс» не превышает:

- 6% при измерении реактивности в диапазоне $0,8 \beta_{эф} > \rho > -0,8 \beta_{эф}$;
- 7% при измерении реактивности в диапазоне $-0,8 \beta_{эф} > \rho > -5,0 \beta_{эф}$;
- 15% при измерении реактивности вне диапазона $0,8 \beta_{эф} > \rho > -5,0 \beta_{эф}$.

Следует отметить, что заявленные в аттестационном паспорте погрешности обусловлены искажением сигнала детектора вследствие технологического несовершенства оборудования, а также учитывают тот факт, что на момент окончания обсчета эксперимента реактор еще не

достигает своего асимптотического состояния, соответствующего реактору с новым положением стержней СУЗ.

Глава 4 посвящена проведению расчетных исследований с использованием программ пространственной кинетики для расчетов реакторов на быстрых нейтронах TIME-800 и TIME INVERSE.

В **разделе 4.1** приведены данные, демонстрирующие точность расчета программы TIME-800. Было проведено расчетное моделирование экспериментов по сбросу поглощающих стержней БФС-105. По результатам работы представлены графики изменения отклонения рассчитанной мощности от экспериментальной для двух детекторов. Максимальная погрешность изменения мощности реактора, полученной по программе решения прямой нестационарной задачи переноса нейтронов для штатных переходных процессов, предусмотренных регламентом эксплуатации в условиях нормальной эксплуатации, не должна превышать 5%. По результатам проведенного расчета конечно-разностным методом без использования приближенных схем максимальная погрешность не превышала 3%.

Подраздел 4.2.1 описывает расчетное исследование поведения запаздывающих нейтронов при вводе в реактор (БФС-105) положительной и отрицательной реактивности. Для исследования нестационарных процессов используется мгновенная доля запаздывающих нейтронов $\beta_{m,j}^n(\mathbf{r},t)$, определяемая по формуле:

$$\beta_{m,j}^n(\mathbf{r},t) = \frac{\lambda_j^n C_j^n(\mathbf{r},t)}{\frac{1}{k_s} \int dE v_{mn}^n \Sigma_f^n \psi(E, \mathbf{r}, t) + \sum_j \lambda_j^n C_j^n(\mathbf{r},t)},$$

где λ_j^n - постоянная распада j -й группы n -го нуклида, $C_j^n(\mathbf{r},t)$ - концентрация предшественников j -й группы n -го нуклида; v_{mn}^n - число запаздывающих нейтронов деления; Σ_f^n - макроскопическое сечение деления; $\psi(E, \mathbf{r}, t)$ - плотность потока нейтронов; E - энергия; k_s - коэффициент учета доли нейтронов внешнего источника в общем числе нейтронов деления. Знаменатель определяет скорость образования нейтронов в точке \mathbf{r} от конкретного нуклида n в данный момент времени t , а числитель - скорость образования запаздывающих нейтронов от этого же нуклида. Использовалось восьмигрупповое представление запаздывающих нейтронов.

Группы запаздывающих нейтронов с малым периодом полураспада ($T_{1/2} \leq 1$ с, что соответствует группам 6 - 8) быстрее отслеживают изменение мощности реактора и быстро достигают своего асимптотического значения. Остальные группы запаздывающих нейтронов - долгоживущие - сохраняют некоторую инертность по отношению к изменению мощности, так как после ввода возмущения распределение их предшественников запаздывающих нейтронов $C_j(\mathbf{r},t)$ соответствует невозмущенному состоянию, и требуется

значительное время для завершения перестроения их распределения и достижения асимптотики.

Такое временное поведение приводит к тому, что при разгоне реактора доля запаздывающих нейтронов, появляющихся от распадов их предшественников, уменьшается, что увеличивает вероятность неконтролируемого разгона реактора на мгновенных нейтронах.

В подразделе 4.2.2 описано влияние процессов на запаздывающих нейтронах на кинетику быстрого реактора.

В первом расчетном эксперименте производилась оценка эффективности группы поглощающих стержней в БФС-105 при их сбросе в активную зону с разной скоростью: быстрой (за 5 с) и медленной (за 50 с). Нестационарная задача решалась прямым конечно-разностным методом без использования приближенных схем (TIME-800). Реактивность, полученная обработкой истории изменения мощности через ОПУК (TIME_INVERSE), представлена на рисунке 1.

На момент окончания движения стержней ($t = 0$ с) при быстром вводе их эффективность больше, чем при медленном $|\rho_0^6| > |\rho_0^M|$, так как при быстром сбросе поглотитель попадает в бóльший поток нейтронов, и следовательно доля их поглощения будет выше.

На момент окончания обработки сигнала в условиях реального эксперимента ($t = 180$ с) эффективность поглощающих стержней при их быстром вводе будет ниже, чем при медленном $|\rho_{180}^6| < |\rho_{180}^M|$. Так как при быстром вводе стержня мощность реактора быстро падает, это способствует меньшему накоплению предшественников запаздывающих нейтронов, которые проявляют себя не сразу, а спустя некоторое время

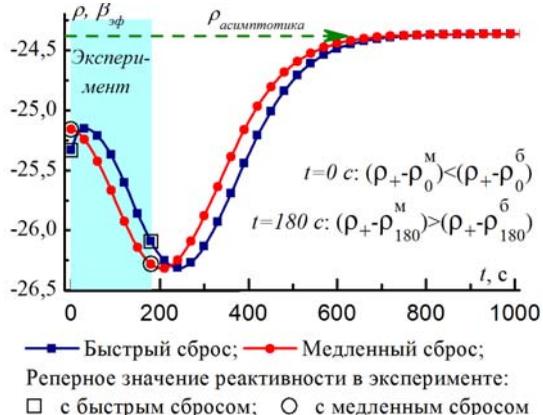


Рисунок 1. Изменение реактивности после окончания движения поглощающих стержней при различной скорости их ввода

На момент окончания расчета видно, что спустя порядка 700 - 1200 с нестационарные процессы на запаздывающих нейтронах в реакторе затухают, и он достигает нового асимптотического состояния. При этом значения реактивности стремится к асимптотическому $\rho \rightarrow \rho(k_{эф})$, соответствующему определению реактивности из стационарных задач.

Таким образом, асимптотика некоторых нестационарных процессов в реакторах на быстрых нейтронах определяется асимптотикой процессов на запаздывающих нейтронах и составляет сотни секунд

Во втором расчетном эксперименте производилась оценка эффективности поглощающих стержней при их сбросе в стационарный и разгоняющийся реактор. Расчеты проводились на моделях БФС-105 и БН-800 со стартовой (урановой) и плутониевой загрузками активной зоны. Нестационарная задача решалась прямым конечно-разностным методом без использования приближенных схем (TIME-800). Реактивность получена обработкой истории изменения мощности через ОРУК (TIME INVERSE).

Расчеты показали, что эффективность стержней СУЗ уменьшается при их вводе в разгоняющийся реактор по сравнению с их эффективностью, измеренной при сбросе стержней в стационарный реактор. При этом максимальное отклонение эффективности стержней СУЗ для БФС-105 составило 15 %, для стартовой загрузки БН-800 — $\delta\rho_{max} = 4,2\%$, для плутониевой зоны БН-800 — $\delta\rho_{max} = 2,3\%$ (см. рисунок 2). Таким образом, фактическая эффективность поглощающих стержней при аварийных условиях будет меньше по сравнению с реактивностью, рассчитанной на базе асимптотической оценки или определенной экспериментально при штатных условиях.

При сбросе поглощающих стержней в разгоняющийся реактор происходят следующие взаимосвязанные процессы: уменьшается мгновенная доля запаздывающих нейтронов, спектр запаздывающих нейтронов смещается в область быстрораспадающихся групп, в силу низкоэнергетического спектра изменяются скорости захвата и деления на запаздывающих

нейтронах. Это в совокупности приводит к нежелательному, с точки зрения ядерной безопасности, уменьшению эффективности стержней СУЗ. Меньше всего данный эффект выражен в активной зоне с плутониевым топливом (из-за меньшей доли запаздывающих нейтронов, присущей ^{239}Pu). В БФС-105 данный эффект выражен сильнее из-за сложной конструкцией

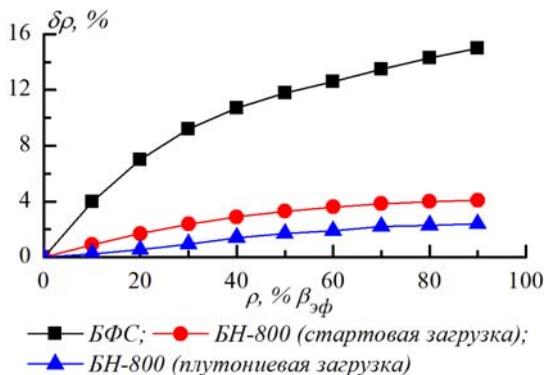


Рисунок 2. Изменение эффективности поглощающих стержней в зависимости от величины положительной реактивности реактора, предшествующей их сбросу

поглощающих стержней (при погружении поглощающего стержня в активную зону часть делящихся материалов в топливной части стержня выводится в зону воспроизводства).

Подраздел 4.2.3 посвящен решению оптимизационной задачи по выбору места внесения возмущения в реактор. Минимизация пространственных эффектов может быть достигнута путем анализа размещения поглощающих стержней СУЗ в активной зоне реактора.

Как известно из теории реактора, решение нестационарной задачи переноса нейтронов может быть представлено в его α -форме в виде ряда $\varphi(\mathbf{r}, E, \mathbf{\Omega}, t) = \sum \varphi_j(\mathbf{r}, E, \mathbf{\Omega}) \cdot e^{s_j t}$, где множество чисел s_j составляет спектр собственных значений уравнения переноса. Так как s_0 – наибольшее по вещественной части значение среди всех s_j , то с течением времени (в асимптотике) все высшие гармоники $\varphi_j(\mathbf{r}, E, \mathbf{\Omega})$ временного разложения в ряд затухают, и поток нейтронов приобретет асимптотическую форму неизменного во времени «фундаментального» распределения $\varphi_0(\mathbf{r}, E, \mathbf{\Omega})$, экспоненциально меняющего только свою амплитуду во времени.

Был разработан инструмент, основанный на λ -представлении решения и позволяющий оценить форму следующей, наиболее медленно спадающей из всех оставшихся гармоники (первой) – $\varphi_1(\mathbf{r}, E, \mathbf{\Omega})$. Собственное значение λ_1 и собственная функция $\varphi_1(\mathbf{r}, E, \mathbf{\Omega})$ первой гармоники находятся методом λ - разности итерационного процесса.

Так как в зонах экстремума первая гармоника затухает медленнее, то изменение локальных характеристик в этих областях будут протекать дольше. Данный вывод подтвержден двумя расчетными экспериментами на БФС-105 и прототипе РУ БРЕСТ. Из результатов расчетов следует, что ввод реактивности в зонах экстремумов первой гармоники характеризуется большими изменениями ее значения и обеспечивает более длительный выход реактора на асимптотику.

Подраздел 4.2.4 посвящен решению оптимизационной задачи по выбору места расположения детектора. При вводе в реактор сильного возмущения форма потока нейтронов претерпевает изменения. Показания детектора пропорциональны значению плотности потока нейтронов в точке его расположения, а не интегральной мощности реактора. Поэтому деформация формы поля нейтронов при использовании уравнений точечной кинетики приводит к большим ошибкам.

Для их минимизации используют поправку в виде параметра ε – эффективности детектора. Конечно-разностное решение нестационарной задачи переноса нейтронов без использования приближенных схем (TIME-800) позволяет отслеживать изменение эффективности детектора $\varepsilon(t)$ в процессе всего моделируемого эксперимента. Следовательно, можно идентифицировать нежелательные области реактора с сильными изменениями эффективности детекторов, установка датчиков в которых может существенно усложнить эксплуатацию реактора.

На рисунке 3 приведены графики изменения эффективности детекторов, расположенных на разных высотах в пределах одного канала при обсчете эксперимента по сбросу поглощающих стержней в БФС-105. Наилучшим местом размещения детектора, при котором наблюдается сохранение относительной эффективности детекторов, является середина канала. При перемещении детектора к краям канала эффективность детектора меняется сильнее, что отражается на точности искомым параметров, оцениваемых на основе выдаваемого детектором сигнала.

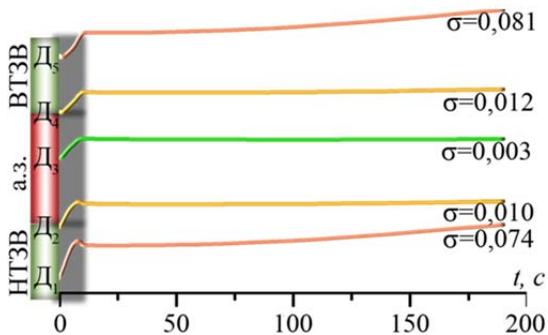


Рисунок 3. Изменение относительной эффективности детекторов во время эксперимента по сбросу поглощающих стержней при их расположении на разных высотах в пределах одного канала

Раздел 4.3 посвящен обоснованию точности результатов приближенных схем решения прямой нестационарной задачи переноса нейтронов. Поставленные расчетные эксперименты решались как при помощи исследуемых приближенных схем, так и конечно-разностного метода без использования приближенных схем.

Приближенные методы решения нестационарной задачи переноса нейтронов достаточно востребованы на практике, прежде всего из-за приемлемой скорости получения результатов. Точность результатов приближенных методов может быть удовлетворительной для ряда задач.

В классическом улучшенном квазистатическом приближении реактивность ρ определяется по теории возмущений первого порядка: $\rho = \langle \phi_0^{+g} \cdot \delta \Sigma \cdot \phi_0^{g} \rangle / CND$, где ϕ_0^{+g} и ϕ_0^{g} – функция ценности и плотность потока нейтронов группы g невозмущенного состояния реактора соответственно; $\delta \Sigma$ – разность между возбужденными и невозбужденными макросечениями; CND – ценность нейтронов деления, а символом $\langle \rangle$ обозначено интегрирование по всем аргументам. Данная формула может давать приемлемые результаты только при небольшом изменении потока нейтронов относительно исходного состояния, например, в случае гомогенного возмущения в пространстве. При гетерогенном возмущении функции плотности потока и ценности для возмущенной задачи будут существенно отличаться в точке внесения возмущения от их распределения в невозмущенном состоянии.

Основываясь на классическом улучшенном квазистатическом приближении, были предложены и исследованы две комбинированные схемы, различающиеся способом определения реактивности:

1. реактивность определяется по формуле общей теории возмущений $\rho = \langle \varphi_0^{+g} \cdot \delta \Sigma \cdot \varphi_k^g \rangle / \text{CND}$;
2. через собственные числа $k_{\text{эф}}$ двух условно-критических задач для исходного и возмущенного состояний реактора (алгоритм не предполагает использование функции ценности нейтронов): $\rho = k_{\text{эф}}^{\text{кр}} \cdot (1/k_{\text{эф}}^{\text{исх}} - 1/k_{\text{эф}}^{\text{возм}})$, где $k_{\text{эф}}^{\text{кр}}$, $k_{\text{эф}}^{\text{исх}}$ и $k_{\text{эф}}^{\text{возм}}$ - эффективные коэффициенты размножения нейтронов для критического, исходного и возмущенного состояний реактора.

Выбор наиболее оптимального алгоритма решения нестационарной задачи при помощи приближенных схем осуществляется по результатам решения двух тестовых задач, демонстрирующих:

- точность схемы решения при вводе гетерогенного возмущения в быстром реакторе;
- точность схемы решения при прохождении реактора во время нестационарного процесса через критические состояния, отличные от исходного.

Стационарная оценка реактивности в тестовых задачах осуществлялась шестью способами, приведенными в таблице 1. Расчеты проводились на модели прототипа реактора БРЕСТ.

Таблица 1. Способы определения реактивности в тестовых задачах

№	Приближенная схема	Определение реактивности
1	по собственным числам (второе комбинированное приближение)	$\rho = k_{\text{эф}}^{\text{кр}} \left(\frac{1}{k_{\text{эф}}^{\text{исх}}} - \frac{1}{k_{\text{эф}}^{\text{возм}}} \right)$
2	через теорию возмущений первого порядка с использованием форм-функции φ^g и ценности нейтронов φ^{+g} исходного (исх) состояния (улучшенное квазистатическое приближение)	$\rho = \frac{\langle \varphi_{\text{исх}}^{+g} \cdot \delta \Sigma \cdot \varphi_{\text{исх}}^g \rangle}{\text{CND}}$
3	аналогично варианту 2, но с использованием функции ценности нейтронов в виде константы ($\varphi^{+g} = \text{const}$)	$\rho = \frac{\langle 1 \cdot \delta \Sigma \cdot \varphi_{\text{исх}}^g \rangle}{\text{CND}}$
4	через общую теорию возмущений с использованием ценности нейтронов φ^{+g} исходного состояния и форм-функции φ^g конечного (к) состояния (первое комбинированное приближение)	$\rho = \frac{\langle \varphi_{\text{исх}}^{+g} \cdot \delta \Sigma \cdot \varphi_k^g \rangle}{\text{CND}}$
5	аналогично варианту 3, но с использованием форм-функции φ^g конечного состояния	$\rho = \frac{\langle 1 \cdot \delta \Sigma \cdot \varphi_k^g \rangle}{\text{CND}}$
6	аналогично варианту 2, но с использованием форм-функции φ^g и ценности нейтронов φ^{+g} конечного состояния	$\rho = \frac{\langle \varphi_k^{+g} \cdot \delta \Sigma \cdot \varphi_k^g \rangle}{\text{CND}}$

В задаче 1 моделировались два стационарных состояния активной зоны, отличающихся положением стержней СУЗ: в состоянии 1 все стержни СУЗ извлечены из активной зоны; в состоянии 2 все стержни СУЗ полностью введены в активную зону. Цель задачи заключается в проведении стационарной оценки эффективности стержней СУЗ при переходе реактора из состояния 1 в состояние 2 ($\Delta\rho I$) и из состояния 2 в состояние 1 ($\Delta\rho II$), т.е. необходимо определить их эффективность при их вводе в активную зону и, соответственно, их выводе.

В задаче 2 моделировались два стационарных состояния реактора, характеризующиеся одинаковым собственным числом, но существенно различающиеся высотным положением стержней СУЗ. Необходимо провести стационарную оценку реактивности, характеризующей переход реактора из критического состояния 1 в критическое состояние 2 ($\Delta\rho(1\rightarrow 2)$), и, наоборот, из состояния 2 – в состояние 1 ($\Delta\rho(2\rightarrow 1)$).

По результатам решения обеих задач, представленных в сводной таблице 2, можно сделать следующие выводы:

- Второе комбинированное приближение (вариант 1) демонстрирует отсутствие отклонений в определении реактивности;
- Расчеты по первому комбинированному приближению (вариант 4) показал небольшие отклонения (не более 1%). Определение реактивности по формуле общей теории возмущений менее чувствительно к гетерогенности возмущения, но проблема выбора распределения функции ценности при достижении реактором других критических состояний по-прежнему сохраняет актуальность.
- Расчеты по вариантам 2 и 6, основанным на теории возмущения первого порядка, демонстрируют серьезные расхождения. Основной вклад в определение реактивности по формуле теории возмущений первого порядка вносит распределение форм-функции, поскольку замена распределения функции ценности нейтронов на постоянное значение (варианты 3 и 5) практически не влияет на результат.

Таблица 2. Результаты тестовых задач

№	Задача 1			Задача 2	
	$\Delta\rho^I, \% \Delta k/k$	$\Delta\rho^{II}, \% \Delta k/k$	$\delta\rho, \%$	$\Delta\rho^{(1\rightarrow 2)}, \% \Delta k/k$	$\Delta\rho^{(2\rightarrow 1)}, \% \Delta k/k$
1	-8,66	8,66	0	0,00	0,00
2	-17,69	4,32	>100	-1,82	1,82
3	-17,88	3,06	>100	-2,08	2,08
4	-8,76	8,68	≈ 1	-0,014	0,014
5	-3,03	17,82	>100	-2,08	2,08
6	-4,30	17,62	>100	-1,82	1,82

Расчет тестовой задачи 2 через прямое конечно-разностное решение нестационарного уравнения переноса нейтронов по программе TIME-800 показал, что мощность реактора падает как при переходе (1 \rightarrow 2), так и при обратном переходе (2 \rightarrow 1), что говорит о вводе в реактор отрицательной реактивности в обоих случаях. Таким образом, реактивность в вариантах 2 –

6 в последнем столбце таблицы 2 следует считать погрешностью самой схемы решения.

Второе комбинированное приближение (вариант 1) обеспечивает наиболее точные результаты по сравнению с остальными приближенными схемами. Реактивность данной схемы решения содержит погрешность, так как она определяется из асимптотического состояния, ненаблюдаемого при нестационарном процессе.

Для оценки этой погрешности была проведена серия нестационарных расчетов при помощи программы TIME-800, моделирующая ввод в реактор различных комбинаций стержней СУЗ с отслеживанием нестационарных процессов до достижения реактором асимптотического состояния.

Для случая сброса всех стержней СУЗ результаты приведены на рисунке 4. Видно, что за интервал времени ~ 10 мин (после окончания движения стержней СУЗ) максимальное отклонение в значении реактивности в текущий момент времени от своего асимптотического значения составило 5,6%. При этом установившееся значение реактивности полностью совпадает с ее оценкой из стационарного состояния через собственные значения ($-21,5 \beta_{эф}$).

Данная погрешность соизмерима с константной составляющей погрешности определения $\beta_{эф}$, оцененной создателями библиотеки БНАБ на уровне 4 - 5%. Т.е. второе комбинированное приближение обеспечивает приемлемую скорость получения решения при его достаточно высокой точности.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Создана программа полномасштабного конечно-разностного решения нестационарной задачи переноса нейтронов в быстром реакторе без использования приближенных схем в трехмерной гексагональной геометрии с учетом запаздывающих нейтронов и наличием внешнего источника нейтронов. При данном способе решения прямой задачи кинетики соблюдается естественная причинно-следственная связь процессов возмущение реактора. Оно происходит за счет изменения распределения нейтронно-физических характеристик реактора, из-за чего нарушается баланс между рождением и исчезновением нейтронов, что отражается в перераспределении плотности потока нейтронов с последующим изменением локального энерговыделения и мощности реактора в целом. При этом реактивность не является обязательным параметром для решения задачи, а может быть определена дополнительно в результате обработки локального энерговыделения (или интегральной мощности) через ОРУК. В таком случае реактивность стоит понимать в качестве параметра, характеризующего скорость изменения мощности реактора.

Разработанная программа TIME-800 входит в состав программно-технического комплекса расчетно-экспериментального сопровождения эксплуатации реактора БН-800 Белоярской АЭС ГЕФЕСТ800. Максимальная погрешность, обеспечиваемая программой в области ее применения, не превышает 5%.

Создана программа решения обратной задачи кинетики для обсчета экспериментов по измерению эффективности стержней СУЗ методом разгона-сброса TIME_INVERSE. Программа TIME_INVERSE также входит в состав программно-технического комплекса расчетно-экспериментального сопровождения эксплуатации реактора БН-800 Белоярской АЭС ГЕФЕСТ800. Точность результатов расчета программы TIME_INVERSE не превышает 6% при измерении реактивности в диапазоне $0,8 \beta_{эф} > \rho > -0,8 \beta_{эф}$, 7 % при измерении реактивности в диапазоне $-0,8 \beta_{эф} > \rho > -5,0 \beta_{эф}$ и 15% при измерении реактивности вне диапазона $0,8 \beta_{эф} > \rho > -5,0 \beta_{эф}$.

Проведен анализ различных приближенных методов решения задачи кинетики реактора на быстрых нейтронах с демонстрацией возможных погрешностей решения. В приближенных схемах решения задачи переноса нейтронов при описании возмущения реактора нарушена причинно-следственная связь: подразумевается, что первопричина изменения мощности заключена в вводе в реактор ненулевой реактивности. Погрешности в определении реактивности в приближенных методах определяют погрешности самой схемы решения. Проведено обоснование погрешности реактивности, рассчитанной через собственные числа двух условно-критических состояний реактора (асимптотическая оценка), для нестационарных задач, связанных с движением стержней СУЗ. На основании исследований погрешностей различных приближенных схем предложены комбинированные приближенные методы, обеспечивающие удовлетворительную точность решения при приемлемой скорости расчета.

Проведены расчетные исследования пространственно-временных задач, решенных при помощи прямого конечно-разностного решения нестационарной задачи переноса нейтронов. Основные положения результатов исследований заключаются в следующем:

- В быстром реакторе сильнее проявляется влияние запаздывающих нейтронов на его кинетику, чем в тепловых реакторах. В рабочей области тепловых реакторов различия между процессами на мгновенных и запаздывающих нейтронах отсутствуют из-за быстрой потери нейтронами своей энергии. Спектр запаздывающих нейтронов мягче, чем у мгновенных. В быстрых реакторах спектр запаздывающих нейтронов приходится на рабочий спектр реактора. Вследствие чего ядерные процессы, протекающие на запаздывающих нейтронах способны сильнее влиять на кинетику быстрых реакторов. Это проявляется в следующем:
 - Эффективность стержня СУЗ при его вводе в активную зону с разной скоростью при проведении реального эксперимента на реакторе будет неодинаковой из-за различного накопления и распада предшественников запаздывающих нейтронов в процессе движения стержня;
 - Эффективность стержней СУЗ при их вводе в разгоняющийся реактор (т.е. фактическая их эффективность, реализуемая в аварийных ситуациях) будет меньше, чем было определено из стационарных оценок или в штатных экспериментах. При этом плутониевая загрузка активной зоны нивелирует данный эффект

вследствие более низкого значения доли запаздывающих нейтронов, присущей ^{239}Pu .

- Решение оптимизационной задачи на базе первой гармоники может быть использовано для выбора такого места размещения стержней СУЗ в активной зоне, при котором обеспечивается меньшее изменение локальных характеристик реактора и более быстрое достижение асимптотического состояния.
- Расчетная оценка эффективности детектора может быть использована для обоснования оптимального места расположения детектора, обеспечивающего минимальное искажение его показаний.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Работы, опубликованные в ведущих реферируемых отечественных журналах из списка, рекомендованного ВАК при Минобрнауки России:

1. Чернова И.С., Селезнев Е.Ф., Асатрян Д.С. и др. — Комплекс программ ГЕФЕСТ800 для проведения эксплуатационных расчетов нейтронно-физических характеристик БН-800 в нестационарном режиме // Атомная энергия. — Москва. — 2015. — Том 119. — Выпуск 1. — С. 3 – 8.
2. Чернова И.С., Селезнев Е.Ф., Асатрян Д.С. и др. — Комплекс программ ГЕФЕСТ800 для проведения эксплуатационных расчетов нейтронно-физических характеристик БН-800 в стационарном режиме // Атомная энергия. — Москва. — 2015. — Том 118. — Выпуск 6. — С. 303 – 308.
3. Чернова И.С., Селезнев Е.Ф. — Зависимость эффективности стержней СУЗ от начальных условий их движения // Атомная Энергия. — Москва. — 2016. — Том 20 — Выпуск 5. — С. 258 – 261.
4. Панова И.С., Селезнев Е.Ф., Белов А.А. и др. — Пространственная кинетика в реакторах на быстрых нейтронах // Известия российской академии наук. Энергетика. — ФГУП Издательство «Наука» — 2013. — №3. — С. 41 – 52.

Другие публикации:

1. Панова И.С. — Влияние пространственной кинетики на эффективность органов СУЗ в реакторах на быстрых нейтронах // Сборник трудов XV научной школы молодых ученых ИБРАЭ РАН. — Москва. — ИБРАЭ РАН. — 2014. — С. 165 – 168.
2. Чернова И.С. — Модификация улучшенного квазистатического приближения для решения нестационарной задачи переноса нейтронов // Сборник трудов XVII научной школы молодых ученых ИБРАЭ РАН. — Москва. — ИБРАЭ РАН. — 2016. — С. 189 – 192.
3. Панова И.С. — Применение программного кода TIME для исследования пространственной кинетики реакторов на быстрых нейтронах. // Сборник трудов XIV научной школы молодых ученых ИБРАЭ РАН — Москва. — ИБРАЭ РАН. — 2013. — С. 150 – 153.
4. Панова И.С., Селезнев Е.Ф., Асатрян Д.С. и др. — Нейтронно-физические коды // Сборник докладов международной научно-технической конференции "Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики" («МНТК НИКИЭТ-2012»). — Москва. — ОАО «НИКИЭТ». — 2012. — С. 396 – 407.

5. Панова И.С., Селезнев Е.Ф., Асатрян Д.С. и др. — Комплекс программ ГЕФЕСТ800 для проведения эксплуатационных расчетов нейтронно-физических характеристик РУ БН 800 // Сборник трудов девятой международной научно-технической конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» (МНТК-2014). — Москва. — ОАО «Концерн Росэнергоатом». — 2014. — С. 120 – 125.
6. Панова И.С., Селезнев Е.Ф. — Модули нестационарных расчетов задач кинетики в комплексе программ ГЕФЕСТ-800 // Материалы межведомственного XV семинара «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики» (Нейтроника-2014). — Обнинск. — ГНЦ РФ-ФЭИ. — 2014. — С. 76 – 77.
7. Панова И.С., Асатрян Д.С. — Программа обработки экспериментов по определению эффективности стержней СУЗ в комплексе ГЕФЕСТ-800 // Материалы межведомственного XXV семинара «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики» (Нейтроника-2014). — Обнинск. — ГНЦ РФ-ФЭИ. — 2014. — С. 7 – 9.
8. Панова И.С., Селезнев Е.Ф. — Особенности расчета пространственной кинетики в реакторах на быстрых нейтронах // Сборник докладов межведомственного XXIII семинара «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики с замкнутым топливным циклом» (Нейтроника-2012). — Обнинск. — ГНЦ РФ-ФЭИ. — 2013. — Том 2. — С. 406 – 415.
9. Panova I.S., Belov A.A., Seleznev E.F. and etc. — Spatial Kinetics in Fast Reactors // Proceedings of the International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Safe Technologies and Sustainable Scenarios (FR13, Paris, France) on CD-ROM. — Vienna. — IAEA. — 2013. — 10 p (available on web-site www-pub.iaea.org).
10. Panova I.S., Seleznev E.F., Belov A.A. and etc. — Some results of studying of spatial kinetics in fast reactors // Proceedings of the International Conference on the Physics of Reactors: The Role of Reactor Physics toward a Sustainable Future on CD-ROM (PHYSOR 2014, Kyoto, Japan) — 2014. — 10 p (available on [http://jolissrhc-inter.tokai-sc.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Conf-2014-003-appendix\(CD-ROM\).zip](http://jolissrhc-inter.tokai-sc.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Conf-2014-003-appendix(CD-ROM).zip)).
11. Белов А.А., Белоусов В.И., Чернова И.С. и др. — Использование комплекса ГЕФЕСТ800 для проведения эксплуатационных расчетов нейтронно-физических характеристик РУ БН-800 // Сборник трудов десятой международной научно-технической конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» (МНТК-2016). — Москва. — АО «Концерн Росэнергоатом» — 2016. — С. 112 – 117.
12. Chernova I., Seleznev E. — Analysis of various approximations in neutronic calculations of transient in fast reactors // Proceeding of International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development on CD (FR17, Yekaterinburg, Russian Federation). — Vienna. — IAEA. — 2017. — Index of paper CN245-036. — 10 p.

Чернова Ирина Сергеевна

Создание и использование программ полномасштабной
пространственной кинетики для расчетов реакторов на быстрых
нейтронах

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 22.11.2017
Формат 60 × 84 1/16. Усл. печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 1,05.

Тираж 110 экз.
Печать на аппарате Rex-Rotary. ИБРАЭ РАН.
115191, Москва, ул. Б.Тульская, 52
Телефон: 8-495-955-22-66