

На правах рукописи

Сорокин Анатолий Александрович

**СОЗДАНИЕ РАСЧЕТНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ПОВЕДЕНИЯ НЕГЕРМЕТИЧНЫХ ТВЭЛОВ И АКТИВНОСТИ  
РАДИОНУКЛИДОВ В ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ ПЕРВОГО КОНТУРА  
ЛЕГКОВОДНЫХ РЕАКТОРОВ**

Специальность 05.13.18

«Математическое моделирование, численные методы и комплексы  
программ»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Троицк 2010

Работа выполнена в ФГУП «Государственный научный центр Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований»

Научный руководитель: доктор ф.-м. наук, профессор Лиханский В.В.

Научный консультант: кандидат ф.-м. наук, Евдокимов И.А.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор  
Чернов Иван Ильич, НИЯУ МИФИ

кандидат физико-математических наук,  
заведующий сектором  
Пергамент Анна Халиловна, ИПМ РАН

Ведущая организация: Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт атомных реакторов (ОАО «ГНЦ НИИАР»),  
г. Димитровград.

Защита состоится 21 апреля 2010 г. в \_\_\_\_ часов

На заседании диссертационного совета Д212.130.09 в Национальном исследовательском ядерном университете МИФИ по адресу 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д.31, тел. 324-84-98, 323-92-56.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью организации.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор физико-математических наук,  
профессор

Леонов А.С.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АЗ	- активная зона (реактора)
ВВЭР	- водо-водяной энергетический реактор
КГО	- контроль герметичности оболочек (ТВЭЛОВ)
ПД	- продукты деления
ГПД	- газовые продукты деления
РПД	- радиоактивные продукты деления
ТВС	- тепловыделяющая сборка
ТВЭЛ	- тепловыделяющий элемент
PWR	- реактор с водой под давлением (Pressurized Water Reactor)
BWR	- реактор с кипящим теплоносителем (Boiling Water Reactor)

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Важным условием развития ядерной энергетики является обеспечение безопасной работы энергоблоков атомных станций. Поддержка конкурентоспособности отечественных производителей ядерного топлива требует развития и обоснования методов контроля радиационной обстановки на энергоблоке. Одним из таких методов является контроль герметичности оболочек (КГО) тепловыделяющих элементов (ТВЭлов) во время работы реактора. Появление сквозного дефекта в оболочке топливного элемента ведет к выходу радиоактивных продуктов деления (РПД) в первый контур реактора. Высокое значение активности реперных РПД служит критерием останова реактора и проведения работ, направленных на поиск негерметичных тепловыделяющих сборок (ТВС). Издержки, вызванные простоем энергоблока, приводят к снижению экономических показателей работы АЭС. Одним из способов сокращения времени на поиск негерметичных ТВС является заблаговременное определение выгорания и количества негерметичных ТВЭлов, исходя из активности РПД в теплоносителе первого контура реактора.

Важным элементом безопасной и рентабельной работы энергоблоков ВВЭР является прогнозирование поведения негерметичных ТВЭлов и активности РПД в теплоносителе первого контура реактора. Необходимость задачи прогнозирования возникает при обосновании безопасной эксплуатации топлива с модифицированными параметрами (размеры топливных таблеток, высота топливного столба, обогащение топлива, размер зерна), а также для обоснования возможности повторной загрузки негерметичных ТВС (не достигших критерия отбраковки при пенальном КГО) в АЗ. Решение последней задачи заключается в выборе оптимального режима эксплуатации дефектной топливной кассеты.

Одной из тенденций в проектировании и эксплуатации топлива в настоящее время является переход на более высокие выгорания. Это также позволяет повысить экономические показатели работы АЭС. Моделирование поведения ТВЭлов с высоким выгоранием необходимо как для герметичного, так и для дефектного топлива.

Для решения описанных задач необходим подход с детальным моделированием физических процессов, как в герметичных, так и в

негерметичных твэлах. Детальное моделирование физических процессов позволяет рассчитывать выход РПД в теплоноситель при изменении параметров топлива (геометрия твэла, структура топливных таблеток, условия эксплуатации топлива) в рамках справедливости физических моделей.

**Состояние проблемы.** Адекватный подход к исследованию проблемы, основанный на численном моделировании, должен включать в себя, как моделирование поведения топлива и изменения его свойств, так и выход РПД под оболочку, их перенос и выход в теплоноситель. Общепринятой практикой при численном моделировании поведения топлива является создание интегральных топливных кодов. Общей чертой данного класса программ является описание термомеханического поведения топлива, включающее в себя определение полей температуры в твэле и геометрических параметров газовых зазоров, а также поведения газовых продуктов деления (ГПД).

Моделирование термомеханического поведения твэла и выхода ГПД из топлива было реализовано в базовой версии кода РТОП. По назначению и структуре топливный код РТОП аналогичен расчетным программам для моделирования поведения топлива в реакторных условиях, созданным за рубежом. Наиболее разработанными и признанными за рубежом являются интегральные топливные коды FRAPCON-3, TRANSURANUS и другие программы. Подробная детализация физических процессов в топливных кодах позволяет на их основе создавать более специализированные программы, направленные на моделирование сопутствующих, или сопряженных явлений. Моделирование выхода РПД из негерметичного твэла реализовано в программе DIADEME (Франция).

Наиболее известной отечественной разработкой в этом направлении является программа RELWVER (РНИЦ "Курчатовский Институт"), использующая корреляционные зависимости. Созданный на основе интегрального топливного кода РТОП код РТОП-СА построен на базе физических моделей и направлен на моделирование поведения дефектного топлива и выхода активности в теплоноситель первого контура реактора ВВЭР.

**Цель работы.** Целью данной работы являлось:

- создание компьютерного кода РТОП-СА, моделирующего поведение негерметичных ТВЭЛов и активности радионуклидов в теплоносителе первого контура легководных реакторов.

- проведение с помощью кода РТОП-СА расчетно-теоретического исследования поведения негерметичных ТВЭЛов и активности продуктов деления в теплоносителе первого контура реактора ВВЭР.

**Научная новизна.**

- Разработан программный код РТОП-СА, включающий в себя самосогласованное моделирование следующих физических процессов:
  - накопление в топливе изотопов плутония и формирование поля энерговыделения,
  - тепловое поведение ТВЭЛА,
  - изменение физических свойств  $UO_2$  – топлива при разгерметизации,
  - поведение продуктов деления (ПД) в зерне и их выход в межзеренную пористость,
  - поведение ПД в межзеренной пористости и образование каналов выхода ПД под оболочку,
  - перенос водорода под оболочкой и окисление топлива,
  - перенос ПД с учетом адсорбции под оболочкой и их выход в теплоноситель,
  - выход ПД из топливных отложений в активной зоне реактора,
  - поведение ПД в первом контуре реактора.
- Создана модель массопереноса РПД и водорода внутри негерметичного ТВЭЛА.
- Создана модель массообмена между негерметичным ТВЭЛОМ и теплоносителем, учитывающая размер дефекта, его высотное положение, а также размеры газовых зазоров под оболочкой и пульсации давления теплоносителя в первом контуре реактора.

**Практическая значимость работы.**

- Реализованный в коде РТОП-СА механистический подход, базирующийся на физическом моделировании, позволяет описывать

выход активности и поведение негерметичного топлива в широком диапазоне параметров твэла и условий его эксплуатации. Программа применяется для оценки выхода РПД из твэлов модифицированной конструкции.

- Код РТОП-СА применяется для моделирования поведения активности продуктов деления в теплоносителе первого контура реактора на энергоблоках ВВЭР. С помощью кода дается прогноз поведения активности нуклидов в теплоносителе.
- На основе созданного компьютерного кода в настоящее время создана и внедряется методика определения выгорания негерметичных ТВС и эффективного гидравлического диаметра дефекта. Методика позволяет сократить время простоя энергоблока при поиске негерметичных ТВС.

### **Защищаемые положения.**

- Создан расчетный код РТОП-СА, моделирующий поведение негерметичных твэлов и активности радионуклидов в теплоносителе первого контура легководных реакторов. Реализованные в коде РТОП-СА физико-математические модели позволяют рассчитывать поведение активности РПД в теплоносителе первого контура с учетом параметров твэла (геометрия, эффективный гидравлический диаметр дефекта и его высотное положение, размер зерна  $UO_2$  и др.) и условий его эксплуатации (линейная мощность тепловыделения, параметры пульсаций давления теплоносителя).
- Проведено тестирование программных блоков на результатах аналитических тестов. Показана сходимость результатов расчетов по коду РТОП-СА по временной и пространственным сеткам.
- Показана адекватность математических моделей программы на данных мелкомасштабных экспериментов.
- Показано, что рассчитанная по коду РТОП-СА кинетика активности РПД в теплоносителе первого контура хорошо согласуется с результатами измерений на исследовательских реакторах и реакторах ВВЭР.

## **Достоверность полученных результатов.**

Достоверность полученных результатов подтверждается аттестацией программы, включающей в себя:

- Верификацию численных алгоритмов и программной реализации кода на аналитических тестах.
- Обоснование сходимостью численных схем программы
- Верификацию физических моделей кода на данных мелкомасштабных реакторных и вне реакторных экспериментов.
- Интегральную верификацию программы на данных исследовательских реакторов ВК-50 (НИИАР), реактор МИР (НИИАР) и Siloe (Франция)
- Сопоставление результатов расчетов с результатами измерений активности нуклидов на энергоблоках АЭС с ВВЭР.

По результатам аттестации программы РТОП-СА в Ростехнадзоре получен аттестационный паспорт программного средства № 258 от 17.03.2009.

**Апробация работы.** Основные положения работы докладывались и обсуждались на следующих научных семинарах, совещаниях и конференциях:

Международные конференции: “WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support”, (Болгария, 2003, 2005 ), “Meeting on LWR Fuel Performance”, (Orlando, Florida, 2004), “Water Reactor Fuel Performance Meeting”, (Kyoto, Japan, 2005), “Meeting on LWR Fuel Performance, TopFuel”, (Salamanca, Spain, 2006). Российские конференции: по реакторному материаловедению (Димитровград, 2003, 2007), «Материалы ядерной техники», (Агой 2006). Научно-технические семинары: «Физическое моделирование изменения свойств реакторных материалов в номинальных и аварийных условиях», (Обнинск, 2002), «Обеспечение безопасности АЭС в ВВЭР», (2003), семинар по опыту эксплуатации и внедрению нового топлива ВВЭР, ОАО «ТВЭЛ», (Болгария, 2004), семинар по вопросам совершенствования методов контроля герметичности оболочек ТВЭЛ ВВЭР, (Моск. обл., 2004), IAEA Tech. Meet. High Burnup Fuel Experience and Economics, (Sofia, Bulgaria, 2006).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 27 печатных работ, из них 7 статей в реферируемых журналах («Атомная энергия», «Вопросы атомной науки и техники», Международный научный журнал «Ядерная



физика и инжиниринг»), статьи в сборниках докладов международных и всероссийских конференций, 2 препринта.

**Личный вклад автора.** Создание расчетного кода РТОП-СА и получение основных результатов проводилось совместно с соавторами программы, под научным руководством В.В. Лиханского. Диссертантом была проведена численная и программная реализация физических моделей кода РТОП-СА, включающая следующие программные блоки: расчет наработки изотопов плутония и выгорания топлива; моделирование выхода радиоактивных продуктов деления (РПД) из топлива и их поведения в межзеренной пористости; перенос РПД под оболочкой и их вынос в теплоноситель; перенос водорода под оболочкой и окисление топлива; поведение РПД в теплоносителе первого контура реактора. Проведена верификация кода РТОП-СА.

Создан современный интерфейс пользователя программы, позволяющий проводить разовые и серийные расчеты.

Диссертант принимал активное участие в разработке физико-математических моделей программы, анализе и обсуждении результатов численного моделирования.

**Объем и структура диссертации.** Работа состоит из введения, четырех глав, основных результатов, списка литературы из 93 наименований, изложена на 131 листе, содержит 42 рисунка и 19 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** показана актуальность решаемой задачи, обсуждается назначение и область применимости программы РТОП-СА.

**В первой главе** дано описание физических моделей программы и их взаимосвязь.

Код РТОП-СА был создан на базе интегрального топливного кода РТОП, рассчитывающего тепловое поведение герметичного твэла и выход под оболочку стабильных газов деления. Первым шагом при модернизации программы РТОП была ее адаптация для моделирования теплового поведения топлива высокого выгорания (выгорание  $bu > 40$  МВт·суткг/U). С ростом выгорания топлива происходит образование делящихся изотопов плутония ( $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ). Учет распределения делящихся изотопов по

топливу необходим при расчете наработки РПД. Эффективность выхода РПД на одно деление  $^{235}\text{U}$  и изотопов Pu для ряда радионуклидов может значительно отличаться. Поэтому с ростом выгорания скорость наработки РПД может меняться.

Наработка  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Pu}$  происходит более интенсивно на краю топливных таблеток вследствие резонансного захвата нейтронов атомами  $^{238}\text{U}$ . Повышенное образование делящихся изотопов Pu приводит к более высокому энерговыделению и выгоранию топлива на периферии по сравнению с центральной частью топливных таблеток. Смещение энерговыделения на край топлива ведет к изменению температурного поля внутри твэла. Влияние неоднородного распределения выгорания на поле температуры обусловлено уменьшением теплопроводности  $\text{UO}_2$  с ростом выгорания топлива.

Приводится описание модели наработки изотопов плутония и формирования поля энерговыделения в топливе. Реализованная в программе физическая модель учитывает жесткость нейтронного спектра реактора.

Отличительной особенностью негерметичного топлива является присутствие внутри твэла теплоносителя в виде пара и водяной пленки на внутренней поверхности оболочки. Наличие воды под оболочкой приводит к окислению  $\text{UO}_2$  и изменению его свойств. Так, при увеличении показателя нестехиометричности  $x$  в  $\text{UO}_{2+x}$  уменьшается теплопроводность топлива и растет его температура. Присутствие водяного пара между топливом и оболочкой также повышает температуру топлива. Подъем температуры приводит к росту темпов окисления топлива. Высокая температура топливных таблеток и их окисление ведут к росту коэффициента диффузии летучих и газовых ПД в зерне  $\text{UO}_{2+x}$ .

Реализованная в коде физическая модель выхода активности в теплоноситель включает в себя следующие логические блоки

- поведение РПД в зерне и в межзеренной пористости и выход их под оболочку
- перенос РПД под оболочкой и выход в теплоноситель,
- перенос водорода и окисление топлива и оболочки,
- поведение РПД в первом контуре реактора.

Взаимосвязь физических моделей программы представлена на рисунке. 1.1

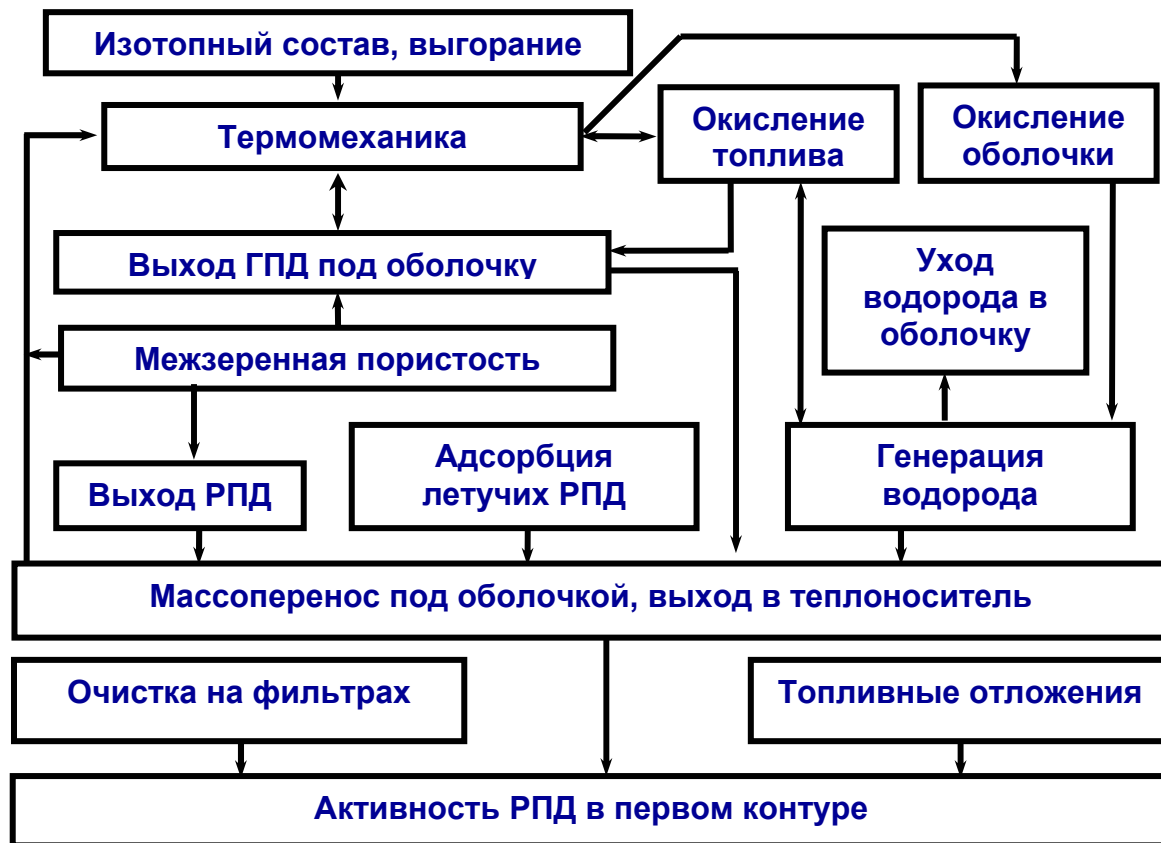


Рис. 1.1 Самосогласованный учет физических процессов в коде РТОП-СА.

Во второй главе представлена численная реализация решаемых задач, дано описание расчетных схем и геометрических моделей программы.

Расчетная область кода РТОП-СА включает в себя зерно  $UO_2$ , топливный сердечник, оболочку, свободные объемы под оболочкой. Расчетная область твэла разбита на несколько концентрических расчетных зон по радиусу и несколько аксиальных зон по высоте. Теплофизические свойства топлива (температура, частота делений и др.) в пределах расчетной ячейки считаются постоянными. Решение задач поведения ПД на уровне зерна  $UO_2$  производится для каждой расчетной ячейки топлива.

- Для самосогласованного учета разнородных физических явлений на каждом временном шаге применяется метод расщепления задачи по процессам. На первом этапе рассчитываются радиальные распределения делящихся изотопов ( $U$ ,  $Pu$ ), выгорания топлива и тепловыделения. Далее находится поле температуры в твэле. На третьем этапе определяется скорость выхода продуктов деления (ПД) из топлива. На заключительном этапе рассчитывается перенос компонентов газовой фазы под оболочкой,

окисление топлива в пароводородной атмосфере, скорости выхода ПД из твэла и поведение ПД в теплоносителе первого контура.

- Динамика изотопного состава топлива в каждой расчетной ячейке описывается системой линейных дифференциальных уравнений, которая интегрируется численно с первым порядком точности по выгоранию.

- Задача теплового поведения твэла для каждой аксиальной зоны решается численно неявным способом, с первым порядком точности по времени, в одномерной цилиндрической геометрии. Зависимость величины зазора топливо-оболочка и теплофизических свойств топлива от температуры учитывается с помощью итераций.

- Для описания выхода ПД из поликристаллического  $UO_2$ -топлива используется модель среднего сферического зерна. Зерно разбито на несколько концентрических зон. Диффузия ПД в зерне  $UO_2$  рассчитывается в одномерной сферической геометрии для каждой ячейки топлива с заданной температурой и скоростью делений. Скорость наработки ПД рассчитывается с учетом изотопного состава делящихся атомов.

Внутризеренное поведение стабильных ПД моделируется системой дифференциальных уравнений, описывающих кинетику распределения концентрации растворенного в матрице газа, концентрации газа в пузырьках, среднего объема пузырьков и количества газа в межзеренной пористости. Система уравнений аппроксимируется неявной разностной схемой первого порядка точности по времени и решается методом Ньютона.

Для определения скорости выхода РПД на границы зерен решается уравнение диффузии с учетом радиоактивного распада. Выход РПД под оболочку твэла рассчитывается с учетом задержек и распада в межзеренной пористости, параметры которой меняются по мере накопления в топливе стабильных газов деления. Выход ПД посредством прямого вылета осколков деления из топлива рассчитывается с учетом геометрических параметров газовых зазоров, давления и состава газовой смеси под оболочкой.

Диффузионный и прямой выходы РПД задают поток нуклидов в газовые полости под оболочкой. Большая часть РПД выходит в межзеренную пористость и не сразу попадает под оболочку. Время

задержки РПД на межзеренных границах представляет собой период, за который в среднем каждый зернограничный пузырек оказывается захваченным в перколяционный канал. Поскольку считается, что весь газ сверх пороговой концентрации стабильных ГПД выходит с границы зерна, время задержки можно рассчитать как отношение скорости ухода газа с границы к пороговой концентрации стабильного газа. При этом обратные времена задержки на гранях ( $\omega_{fc}$ ) и ребрах ( $\omega_{ed}$ ) зерен  $UO_2$  имеют вид:

$$\omega_{fc} = \frac{\dot{C}_{ed} + \dot{C}_{cl}}{C_{fc}} \quad \omega_{ed} = \frac{\dot{C}_{cl}}{C_{ed}} \quad (1)$$

Здесь  $C_{fc}$ ,  $C_{ed}$ ,  $C_{cl}$  – средняя по топливной ячейке концентрация стабильного газа на гранях, на ребрах и вышедшего под оболочку, соответственно. За время  $\omega^{-1}$  происходит полная смена газа на границе зерна.

В коде РТОП-СА принимается, что для некоторой доли топлива с открывшейся межзеренной пористостью перколяционные каналы после образования уже не разрушаются. В дефектных твэлах это может быть связано, например, с частичным окислением открытых межзеренных границ. Таким образом, после достижения перколяционного предела по межзеренной концентрации газа с некоторой части межзеренной поверхности ПД могут выходить из топлива без задержек во времени. В коде РТОП-СА данный тип пористости характеризуется параметром  $\varepsilon_0$  (принимается  $\varepsilon_0 = 0.03$ ). Параметр  $\varepsilon_0$  задает долю топлива, в которой продукты деления с граней зерен непосредственно выходят под оболочку.

Количество  $i$ -го изотопа на гранях ( $N_i$ ) и ребрах ( $M_i$ ) для каждой расчетной топливной ячейки описывается системой уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{N}_i &= \alpha(1-\varepsilon) \text{Re}_{gr}^i - \lambda_i N_i - \omega_{fc} N_i + \Lambda_{p \rightarrow i} \lambda_p N_p \\ \dot{M}_i &= (1-\alpha)(1-\varepsilon) \text{Re}_{gr}^i + \omega_{fc} N_i - \lambda_i M_i - \omega_{ed} M_i + \Lambda_{p \rightarrow i} \lambda_p M_p \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $\text{Re}_{gr}^i$  – плотность потока  $i$ -го изотопа на межзеренную поверхность,  $\varepsilon$  – доля открытой пористости, параметр  $\alpha$  учитывает различия при выходе газа по механизму диффузии и по механизму прямого вылета;  $\varepsilon = \zeta_{ed} \varepsilon_0$ , где  $\zeta_{ed}$  – функция сглаживающая скорость выхода ГПД под оболочку в зависимости от достижения порога перколяции. Для диффузионного выхода РПД в межзеренную пористость  $\alpha = 1$ , для прямого вылета:

$$\alpha = \frac{swe_{fc}}{swe_{fc} + swe_{ed}} \quad (3)$$

где  $swe_{fc}$ ,  $swe_{ed}$  – газовое распухание топлива из-за образования пузырей на гранях и ребрах зерен, соответственно. Полный поток РПД под оболочку из межзеренной пористости  $Re_i$  определяется их количеством на ребрах и частотой открытия ребер:

$$Re_i = \omega_{ed} M_i + \zeta_{ed} \varepsilon_0 Re_{gr}^i \quad (4)$$

Уравнения (2) интегрируются численно со вторым порядком точности по времени.

- Перенос ПД по высоте твэла к дефекту осуществляется по системе связанных каналов, включающих центральное отверстие топливного сердечника, зазор топливо-оболочка, трещины в топливных таблетках и межтаблеточные промежутки. Текущие геометрические параметры газовых каналов находятся из решения задачи теплового поведения твэла.

Перенос компонент газовой смеси под оболочкой описывается одномерным диффузионным уравнением с эффективным коэффициентом диффузии. Эффективный коэффициент диффузии учитывает вклад пульсационного движения газа под оболочкой в процесс переноса. Пульсационное движение газа возникает за счет пульсаций давления теплоносителя в первом контуре. Для химически активных РПД (I, Br, Te, Cs) эффективный коэффициент диффузии также учитывает адсорбцию на внутренней поверхности оболочки.

Газовая смесь под оболочкой дефектного твэла содержит водяной пар, стабильные и радиоактивные ПД, водород и гелий. В типичных условиях преобладающим компонентом под оболочкой негерметичного твэла является водяной пар. Относительная концентрация других газов, в том числе и гелия, исходно находящегося под оболочкой, мала. Это позволяет упростить модель и рассматривать диффузию ПД, гелия и водорода, как диффузию малых примесей. В этом случае перенос каждого газа определяется только градиентом его собственной концентрации. Принимается, что перенос происходит по обобщенному каналу, включающему компенсационный объем, центральное отверстие топливного сердечника, зазор между топливом и оболочкой и трещины в топливе:

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = \frac{1}{S} \frac{\partial}{\partial z} \left( D_i^{eff} S n_V^{tot} \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{n_i}{K_{s,i} n_V^{tot}} \right) \right) - \omega_i n_i + Q_i \quad (5)$$

На нижнем и верхнем концах твэла используются граничные условия:

$$\left. \frac{\partial n_i}{\partial z} \right|_{z=0} = \left. \frac{\partial n_i}{\partial z} \right|_{z=L} = 0 \quad (6)$$

Здесь  $z$  – положение по высоте в обобщенном канале;  $n_V^{tot}(z)$  – полное количество частиц на единицу объема газовой фазы под оболочкой твэла;  $n_i(z)$  – концентрация  $i$ -го компонента (для летучих ПД включает как частицы в газовой фазе, так и частицы, адсорбированные на внутренней поверхности оболочки);  $S$  – площадь поперечного сечения канала;  $D_i^{eff}$  – эффективный коэффициент диффузии  $i$ -го компонента;  $L$  – длина канала;  $K_{s,i}$  – параметр адсорбции летучих ПД. В квазистационарных условиях параметр адсорбции  $K_{s,i}$  имеет вид:

$$K_s = \frac{C_g + C_s}{C_g} = 1 + \frac{\xi}{\lambda + \chi} \quad (7)$$

где  $C_g, C_s$  – объемные концентрации газовой и адсорбированной фазы,  $\xi, \chi$  – скорости адсорбции и десорбции, соответственно.

Эффективный источник РПД под оболочкой на заданной высоте  $z$  получается суммированием скорости выхода  $Re_i$  по радиальным зонам таблетки:

$$Q_i(z) = \frac{2}{R_p^2 - R_h^2} \int_{R_h}^{R_p} Re_i(z, r) r dr + \Lambda_{p \rightarrow i} \lambda_p n_p(z) \quad (8)$$

$R_p, R_h$  – внешний и внутренний радиусы таблеток. Второе слагаемое описывает эффективный источник для дочерних нуклидов, при распаде предшественника. Для стабильных ПД источник определяется только выходом из топлива. Скорость генерации водорода определяется процессами окисления топлива  $\dot{x}$  и оболочки, а также уходом водорода в оболочку:

$$Q(z) = \frac{2\pi\rho_f N_A}{M_f S} \int_{R_h}^{R_p} \dot{x}(r, z) r dr + Q_{clad.ox}(z) \quad (9)$$

где  $\rho_f, M_f$  – плотность и молярная масса топлива;  $N_A$  – число Авогадро.  $Q_{clad.ox}(z)$  – источник водорода за счет окисления внутренней поверхности оболочки с учетом частичного ухода водорода в оболочку. Функция  $\omega(z)$  в

(5) описывает изменение концентрации компонентов газовой смеси при изменении проходного сечения канала (при сужении или расширении зазора топливо-оболочка) и вынос компонентов смеси в теплоноситель. Для РПД также учитывается радиоактивный распад. Скорость выноса каждого компонента газовой смеси считается пропорциональной его локальной концентрации вблизи дефекта:

$$\begin{aligned}\omega_i(z) &= \lambda_i + \frac{\dot{S}(z)}{S(z)} + \mu(z) \\ \mu(z) &= \delta(z - z_{def}) \mu_V^{eff} / S\end{aligned}\quad (10)$$

Здесь  $\mu_V^{eff}$  – эффективная скорость массообмена с теплоносителем (см<sup>3</sup>/с);  $\delta(z - z_{def})$  – дельта-функция;  $z_{def}$  – высотное положение дефекта в твэле. Скорость массообмена с теплоносителем определяется параметрами пульсационного течения газа в твэле.

Решение задачи диффузии РПД в матрице топлива и под оболочкой для долгоживущих радионуклидов производится конечно-разностным методом с использованием неявной схемы Кранка-Николсона второго порядка точности по времени. Для определения скорости выхода короткоживущих радионуклидов используются квазистационарные аналитические решения.

Для расчета стехиометрического состава топлива  $UO_{2+x}$  решается задача диффузии водорода с учетом окисления и наводороживания оболочки. Эволюция стехиометрического состава топлива и распределения концентрации водорода под оболочкой описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений, которая аппроксимируется неявной разностной схемой и решается путем итераций по методу Ньютона.

Считается, что скорость выноса ПД в теплоноситель пропорциональна их концентрации вблизи дефекта. Коэффициент пропорциональности определяется параметрами пульсаций давления теплоносителя в первом контуре и геометрическими параметрами твэла. Концентрация ПД в придефектной области находится из решения задачи переноса под оболочкой.

- Для определения активности в первом контуре решается система линейных дифференциальных уравнений, описывающих поведение РПД с учетом очистки теплоносителя, адсорбции радионуклидов на поверхности конструкций и дополнительного выхода РПД из топливных отложений в



активной зоне. Система уравнений интегрируется численно со вторым порядком точности по времени.

- Программа имеет современный интерфейс, позволяющий формировать задания на единичный, или серийный расчет.

**В третьей главе** изложены основные результаты верификации программы. Верификация кода РТОП-СА включает в себя, как интегральную верификацию, так и верификацию отдельных его моделей.

Проведены расчеты динамики накопления изотопов Pu в топливе. Результаты моделирования сравнивались с расчетами по нейтронному коду KORIGEN (США) для PWR и BWR топлива (рис 3.1).

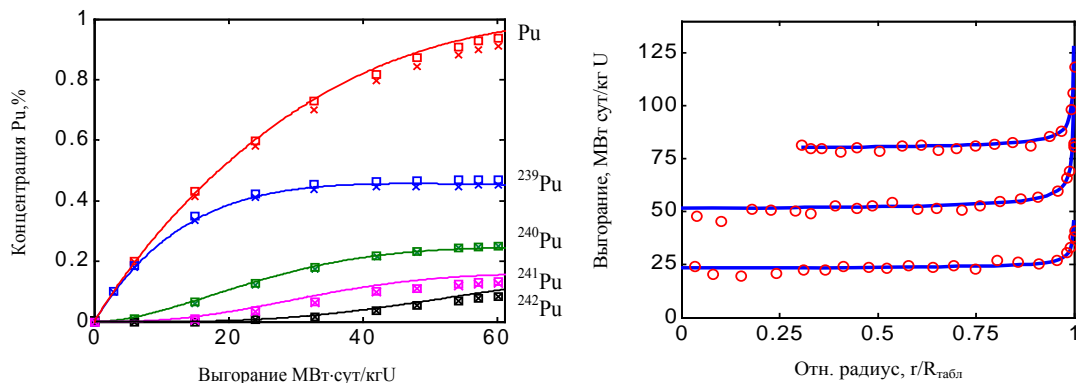


Рис. 3.1 Слева:Наработка Pu в топливе. Сплошные линии – расчет по коду РТОП-СА;  $\times$  – расчет по коду KORIGEN для топлива PWR,  $\square$  – расчет по коду KORIGEN для топлива BWR. Справа: Радиальный профиль выгорания по топливной таблетке:  $\circ$  – данные программы НВЕР,  $bu = 25$  MBт-сут/кг U (облучение в реакторе Obrigheim PWR),  $bu = 55$  MBт-сут/кг U (реактор TV0-1 BWR) и  $bu = 83$  MBт-сут/кг U (реактор BR-3 PWR); — — — — — расчет по коду РТОП-СА.

Приводятся результаты расчета радиальных распределений выгорания и их сравнение с экспериментальными данными НВЕР (рис. 3.1).

Решение задачи формирования распределений изотопов U, Pu в топливе с учетом характеристик нейтронного спектра позволяет заметно улучшить предсказание основных характеристик выгорающего топлива по сравнению, например, с модулем TUBRNP, где моделирование радиального распределения плутония производится путем подбора подгоночных параметров.

Верификация модели теплового поведения герметичного топлива высокого выгорания проводилась по результатам измерения центральной температуры в зависимости от мощности облучения твэла. Результат представлен на рисунке 3.2. Топливо, использованное в эксперименте, предварительно облучалось в коммерческом реакторе RINGHALS 1

(Швеция) до выгорания 59 МВт·сут/кгUO<sub>2</sub>. В расчете учитывалось неоднородное по радиусу топливной таблетки распределение энерговыделения и выгорания, а также возникновение высокопористого *rim* – слоя. Учет указанных факторов позволил получить хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных.

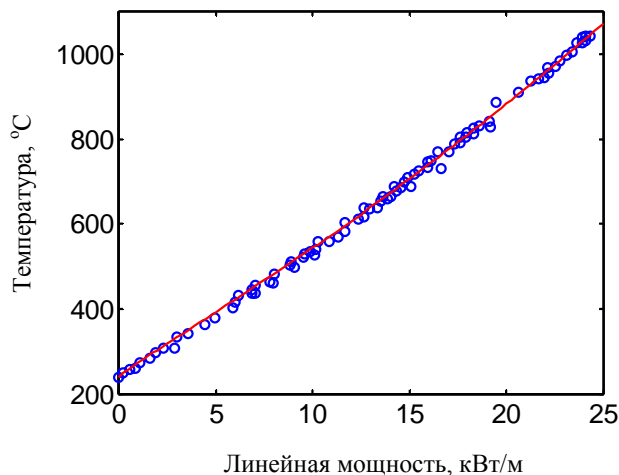


Рис. 3.2 Зависимость центральной температуры топлива от линейной мощности. — расчет по коду РТОП-СА, o – экспериментальные данные для топлива BWR с выгоранием 59 МВт·сут/кгUO<sub>2</sub>.

Для верификации модели выхода РПД из топлива под оболочку проводилось сравнение расчетных скоростей выхода РПД с результатами измерений (рис. 3.3). Получено удовлетворительное согласие с экспериментом.

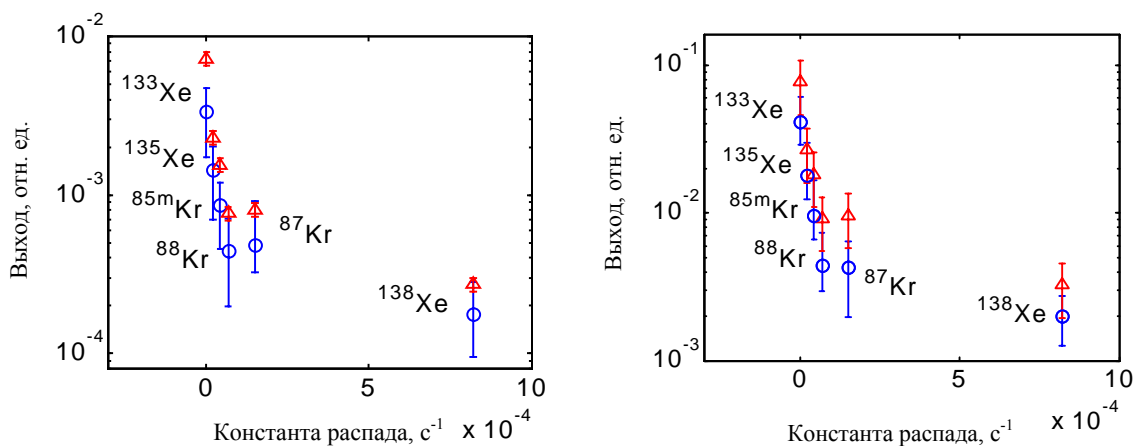


Рис. 3.3 Относительный выход РПД из топлива для монокристаллов (слева) и для поликристаллического UO<sub>2</sub>: o – экспериментальные данные, Δ – расчет по коду РТОП-СА.

В экспериментах облучение монокристаллических и поликристаллических образцов топлива с высоким обогащением (20% <sup>235</sup>U) производилось в вентилируемой капсуле в реакторе DIDO (Harwell).

В капсуле с помощью электрических нагревателей поддерживалась постоянная температура 1400 °С. При данной температуре основным механизмом выхода РПД из кристаллов  $UO_2$  являлась термически активированная диффузия. Величина расчетной погрешности (рис. 3.3) связана с неопределенностью площади открытой поверхности топливных образцов.

В серии экспериментов на исследовательском реакторе Siloe (Grenoble) изучалось поведение стандартных герметичных твэлов PWR. Твэлы облучались в реакторной петле высокого давления. В ходе экспериментов линейная мощность поддерживалась постоянной 25 кВт/м. Центральная температура топлива измерялась с помощью термопары, ее значение составляло  $T = 965$  °С. На рисунке 3.4 для твэла с выгоранием  $Bu = 0.44$  МВт·сут/кгU показано сравнение расчетной и экспериментальной скорости выхода РПД из топлива.

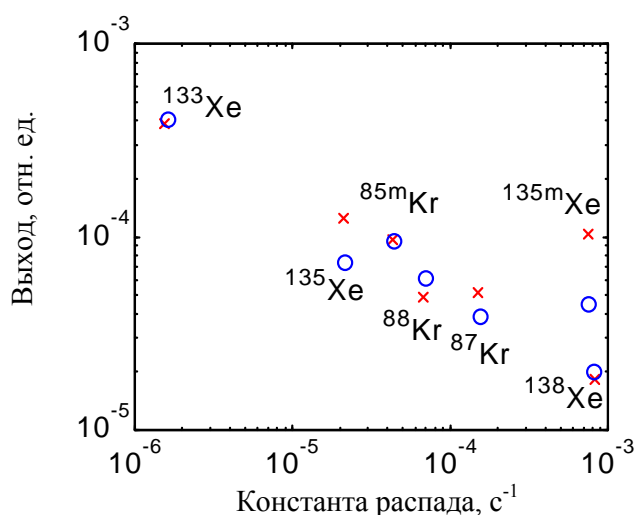


Рис. 3.4 Относительный выход РПД из топлива:  $\circ$  – экспериментальные данные,  $\times$  – расчет по коду РТОП-СА. Линейная мощность 25 кВт/м, выгорание топлива  $Bu = 0.44$  МВт·сут/кгU.

Проведено моделирование выхода РПД из негерметичного топлива с искусственным дефектом в ходе эксперимента на реакторе ВК-50 (рис. 3.5). Облучение проводилось при относительно невысокой линейной мощности  $LP = 5-12$  кВт/м. Искусственный дефект размером 0.9-1 мм находился на уровне максимума тепловой нагрузки. Согласно данным, амплитуда пульсаций давления теплоносителя на реакторе ВК-50 лежит в диапазоне 7-14 кПа, частота пульсаций составляет около 1 Гц. Для оценки влияния параметров пульсаций давления расчет проводился для трех значений амплитуды пульсаций  $A_{puls} = 7, 10, 14$ , кПа. Как видно, расчетные

результаты хорошо согласуются с экспериментальными. Отклонение расчета от экспериментальных данных не превышает погрешности измерений.

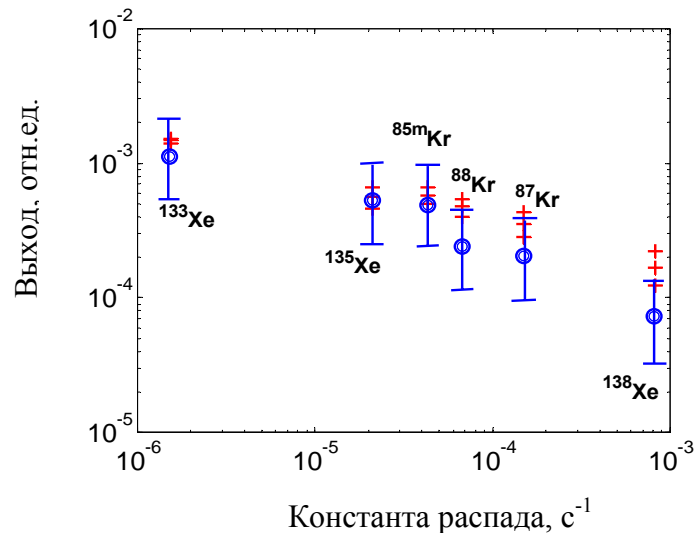


Рис. 3.5 Относительный выход РПД на 20-й день после начала облучения;  
 ○ – эксперимент, + – расчет по коду РТОП-СА.

**В четвертой главе** представлены результаты применения кода РТОП-СА для описания кинетики активности РПД в теплоносителе первого контура на энергоблоках российских АЭС. Данные по активности теплоносителя получены в ходе КГО на работающем реакторе. Для задания параметров дефектности АЗ (количество и выгорание негерметичных твэлов, размеры дефектов) использовались результаты КГО на остановленном реакторе. Количество негерметичных твэлов выбиралось равным или несколько превышающим количество негерметичных ТВС. Размер дефекта задавался исходя из результатов КГО на остановленном реакторе. Согласно существующей в настоящее время методике степень дефектности кассет определяется в ходе КГО на остановленном реакторе. Негерметичные ТВС классифицируются, как “газонеплотные” и “имеющие контакт топлива с теплоносителем”. Согласно исследованиям, проведенным компанией Edf максимальный размер дефекта, соответствующий газонеплотному твэлу составляет 35 мкм. В расчетах “газонеплотным” твэлам ставился в соответствие дефект размером до  $d = 7-30$  мкм, в зависимости от уровня активности радионуклидов. В твэлах, классифицированных как “имеющие контакт топлива с теплоносителем” задавался дефект размером  $d = 1000$  мкм. Расчеты по коду РТОП-СА показали, что интенсивность выхода РПД в

теплоноситель при достаточно крупных дефектах ( $d > 50$  мкм) не зависит от размера дефекта. Количество топливных отложений, определяющих уровень фоновой активности оценивалось из активности короткоживущих нуклидов ( $^{134}\text{I}$ ,  $^{87}\text{Kr}$ ).

В расчетах моделировался выход активности для условий облучения на энергоблоках Нововоронежской, Калининской, Балаковской и Ростовской АЭС. В качестве примера на рисунке 4.1 показано сопоставление расчетной и измеренной активностей  $^{131}\text{I}$  и  $^{134}\text{I}$  на первом блоке Калининской АЭС (ВВЭР-1000), в ходе 11-ой топливной загрузки.

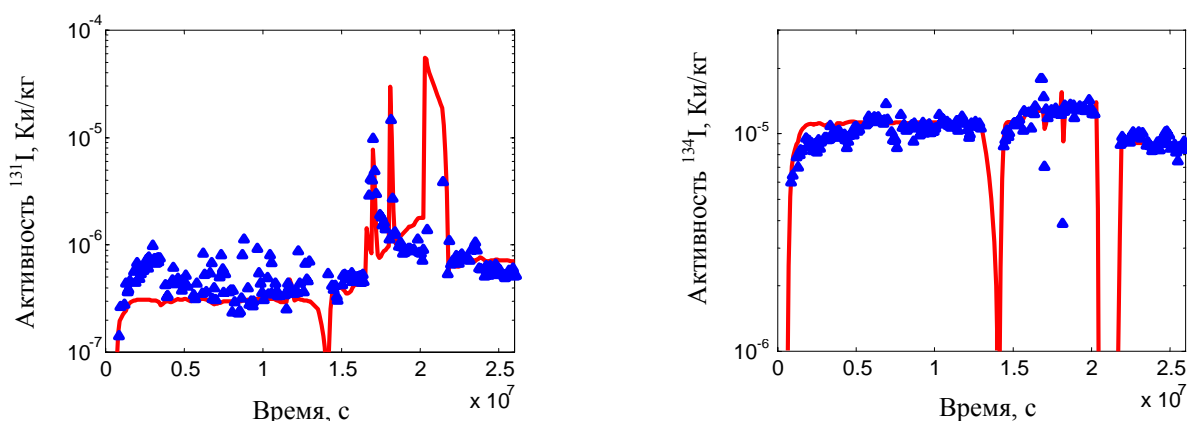


Рис. 4.1. Кинетика активности  $^{131}\text{I}$  (слева) и  $^{134}\text{I}$  (справа) на первом блоке Калининской АЭС (ВВЭР-1000), 11-ая топливная загрузка.  $\Delta$  - результаты измерений, — - расчет.

В настоящее время ведутся работы по обоснованию уровня активности в теплоносителе ВВЭР при выходе РПД из негерметичных твэлов при повышенных выгораниях топлива – до 70 МВт·сут/кгU. Для моделирования выхода радионуклидов из негерметичного твэла ВВЭР и для верификации расчетных кодов на петлевой установке ПВ-1 реактора МИР была выполнена серия экспериментов с рефабрикованными твэлами ВВЭР с искусственно изготовленным дефектом. Среднее выгорание топлива в рефабрикованном твэле составляло 59.7 МВт·сут/кгU. Для исследования выхода продуктов деления в оболочке экспериментального твэла был изготовлен искусственный дефект в виде сквозного отверстия диаметром 1 мм в области компенсационного объема. В ходе экспериментов, в частности, проводилось измерение активности РПД в теплоносителе петлевой установки. В работе приводится сравнение расчетной и измеренной кинетики активности радионуклидов йода и

газовых ПД. В качестве примера на рисунке 4.2 показана кинетика активности  $^{131}\text{I}$  и  $^{134}\text{I}$ .

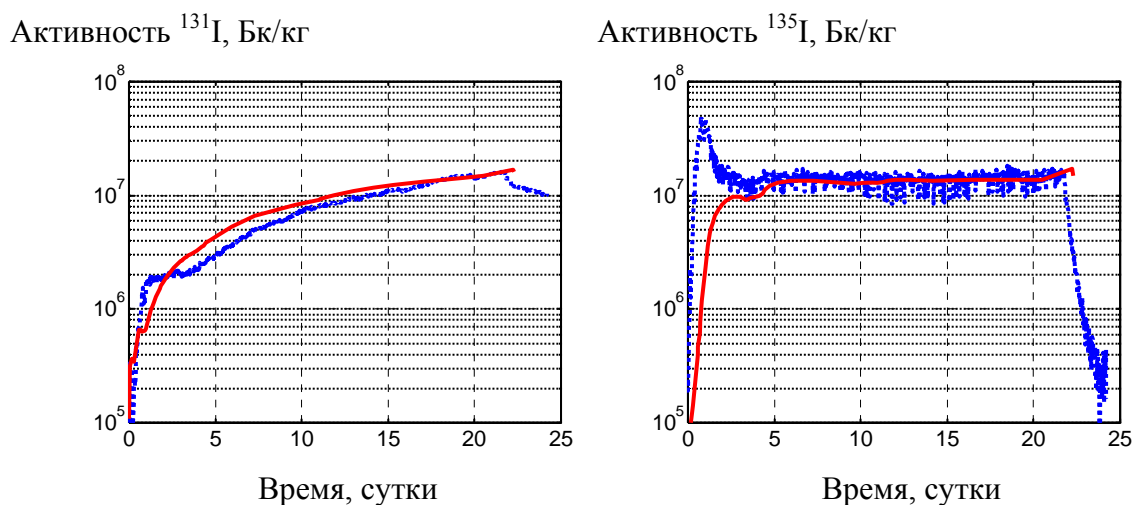


Рис. 4.2. Кинетика активности  $^{131}\text{I}$  (слева) и  $^{135}\text{I}$  (справа) в теплоносителе петлевой установки ПВ1 реактора МИР. (—)– расчет по коду РТОП-СА, (.....) – эксперимент.

В настоящее время отечественным производителем ядерного топлива (ОАО «ТВЭЛ») ведутся работы по модернизации ядерного топлива ВВЭР и режимов его эксплуатации на АЭС. Параметры модернизированных и штатных твэлов ВВЭР, а также параметры эксплуатации топлива, использованные в расчетах по коду РТОП-СА, представлены в таблице 4.1. Приводятся результаты анализа изменения параметров топлива и условий его эксплуатации на выход активности в теплоноситель первого контура в случае разгерметизации. Показано что изменение геометрических параметров твэла и увеличение размеров зерна  $\text{UO}_2$  в сумме приводят к уменьшению выхода активности в первый контур реактора (рис.4.3).

Параметр	ВВЭР-1000	Модернизированное топливо ВВЭР
Размер зерна $\text{UO}_2$ , мкм	6	50
Диаметр центрального отверстия в топливных таблетках, мм	1.5	0
Диаметр топливных таблеток, мм	7.57	7.8
Максимальный радиальный зазор между топливом и оболочкой, мкм	130	110
Толщина оболочки, мкм	650	570
Длина топливного стержня, м	3.53	3.68
Температура теплоносителя на входе, °C	289.7	298.6
Давление теплоносителя, атм	157	162

Таблица 4.1 Параметры, использованные в расчетах по коду РТОП-СА.

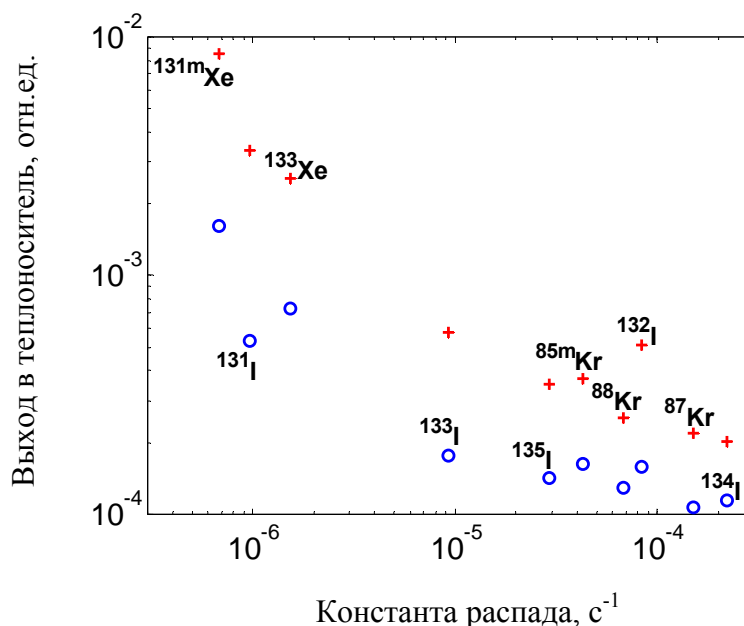


Рис. 4.3. Интегральное влияние модификации топлива ВВЭР на выход РПД в теплоноситель из топлива третьего года эксплуатации, с учетом выхода из топливных отложений в АЗ. Масса топливных отложений  $M_m = 1$  г. + - штатное топливо ВВЭР, o – модифицированное топливо.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

1. Создан расчетный код РТОП-СА, моделирующий поведение негерметичного твэла и активности в теплоносителе первого контура реактора ВВЭР. Программа основана на механистическом подходе, использующем детальное моделирование физических процессов.
2. Проведено тестирование программных модулей на аналитических решениях. Показана сходимость численных схем.
3. Проведена верификация моделей программы на результатах мелкомасштабных экспериментов.
4. Проведена интегральная верификация кода РТОП-СА на экспериментальных данных по выходу РПД из твэлов с искусственными дефектами. Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментами. В расчетах учитывались результаты КГО на остановленном реакторе (количество негерметичных ТВС, срок эксплуатации, степень дефектности ТВС).
5. По результатам верификации код РТОП-СА аттестован в Ростехнадзоре.
6. С помощью кода РТОП-СА проведена оценка поведения активности при эксплуатации топлива модернизированной конструкции.

Показано, что в случае разгерметизации выход РПД из модернизированного топлива значительно ниже (~ в 2-6 раз), чем из штатного топлива ВВЭР.

7. В настоящее время программа применяется для прогноза поведения активности радионуклидов в теплоносителе первого контура реакторов ВВЭР.

#### ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. В.Д. Канюкова, С.Ю. Курчатов, В.В. Лиханский, Л.В. Матвеев, А.А. Сорокин, О.В. Хоружий “Возможности кода РТОП-2 при моделировании поведения ядерного топлива и твэла в номинальных, переходных и аварийных условиях”. Труды 2-ой Всероссийской научно-технической конференции – Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР.
2. S.Yu. Kourtchatov, V.V. Lichanskii, L.V. Matveev, V.V. Novikov, O.V. Khoruzhi, A.A. Sorokin “Analysis of physical processes affecting restructuring of UO<sub>2</sub> - fuel in rim-zone”. In Proceedings of International Conference on WWER fuel performance, modeling, and experimental support. 1-5 October 2001, Albena, Bulgaria.
3. С.Ю. Курчатов, В.В. Лиханский, А.А. Сорокин, О.В. Хоружий “Моделирование кодом РТОП радиальных профилей тепловыделения и накопления изотопов плутония в UO<sub>2</sub> – топливе высокого выгорания”. Атомная Энергия, 2002, т. 92, вып. 4.
4. О.В. Аполлонова, В.В. Лиханский, А.А. Сорокин, О.В. Хоружий “Поведение дефектов кристаллической структуры UO<sub>2</sub> топлива в условиях внутриреакторного облучения при температурах ниже 1000<sup>0</sup> С”. Препринт ГНЦ РФ ТРИНИТИ 0103-А, 2002, Москва, ЦНИИАТОМИНФОРМ.
5. E.Yu. Afanasieva, I.A. Evdokimov, V.V. Likhanskii, V.V. Novokov, A.A. Sorokin “Model development of fuel failure in water reactors due to cladding hydronization”. In Proceedings of IAEA, International Technical Meeting on Fuel Failure in Water Reactors: Causes and Mitigation. 17-21 June, Bratislava, VÚJE Trnava, Inc., SLOVAK REPUBLIC, 2002.
6. В.В. Лиханский, А.А. Сорокин, О.В. Хоружий “Особенности распределения точечных дефектов внутри зерен диоксид-уранового топлива при формировании ободкового слоя”. Атомная Энергия, 2004, т. 96, вып. 2.
7. Е.Ю. Афанасьева, И.А. Евдокимов, В.В. Лиханский, В.В. Новиков, А.А. Сорокин, О.В. Хоружий “Моделирование гидридного разрушения твэлов в водоохлаждаемых реакторах”. Атомная Энергия, 2003, т. 95, вып.4.



8. Е.Ю. Афанфсьева, И.А. Евдокимов, В.В. Лиханский, В.В. Новиков, А.А. Сорокин, О.В. Хоружий “Моделирование гидридного разрушения твэлов в водоохлаждаемых реакторах”. Труды Российской научной конференции «Материалы ядерной техники: Радиационная повреждаемость и свойства – Теория, моделирование, эксперимент», Агой, 22-26 Сентября 2003 г., ВАНТ, серия “Материаловедение и новые материалы”, выпуск 2 (63), 2004г., с. 225.
9. В.Д. Канюкова, В.В. Лиханский, Г.А. Солодовников, А.А. Сорокин, О.В. Хоружий “Тепловое поведение  $UO_2$  топлива высокого выгорания: моделирование в поддержку кода РТОП”. Труды третьей научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС в ВВЭР», 2003, т. 4.
10. В.Д. Канюкова, В.В. Лиханский, Г.А. Солодовников, А.А. Сорокин, О.В. Хоружий “Проблемы моделирования топлива ВВЭР высокого выгорания”. Труды 7-ой Всероссийской конференции по реакторному материаловедению, Димитровград, сентябрь 2003.
11. О.В. Апполонова, В.В. Лиханский, А.А. Сорокин, О.В. Хоружий “Численное моделирование поведения точечных дефектов в области  $grm$ -слоя  $UO_2$  – топлива”. Российская научная конференция «Материалы ядерной техники», Агой, Краснодарский край, 22-26 сентября 2003. ВАНТ, серия “Материаловедение и новые материалы”, выпуск 1 (62), 2004 г., с. 358.
12. О.В. Апполонова, В.Д. Канюкова, В.В. Лиханский, Г.А. Солодовников, А.А. Сорокин, О.В. Хоружий “Влияние радиационно-индуцированных процессов на изменение физических свойств и микроструктуры  $UO_2$  топлива высокого выгорания”. Российская научная конференция «Материалы ядерной техники», Агой, Краснодарский край, 22-26 сентября 2003. ВАНТ, серия “Материаловедение и новые материалы”, выпуск 2 (63), 2004 г., с. 189.
13. V.V. Likhanskii, I.A. Evdokimov, O.V. Khoruzhii, V.V. Novikov, A.A. Sorokin “Physical Models and Codes for Prediction of Activity Release from Defective Fuel Rods under Operation Conditions and in Leakage Tests during Refuelling”. In Proceedings of International 5<sup>th</sup> Int. Conf. on WWER Fuel Performance “Modelling and Experimental Support”, Albena, Bulgaria, 29 September - 03 October 2003, pp.341-353.
14. В.Д. Канюкова, В.В. Лиханский, Г.А. Солодовников, О.В. Хоружий, А.А. Сорокин “Physical Models for high burnup fuel”. Труды 5-ой Международной конференции «Рабочие характеристики топлива реакторов ВВЭР, моделирование и экспериментальные данные», 29.09.-3.10.2003 г., Альбена, Болгария.
15. Е.Ю. Афанфсьева, И.А. Евдокимов, В.Д. Канюкова, В.В. Лиханский, В.В. Новиков, А.А. Сорокин, О.В. Хоружий “Моделирование в поддержку усилий по минимизации деградации твэлов ВВЭР”. Труды 3-й Всероссийской научно-технической конференции “Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР”, май 2003, Подольск.

16. Е.Ю. Афанасьева, И.А. Евдокимов, В.В. Лиханский, В.В. Новиков, А.А. Сорокин, О.В. Хоружий "Modelling of fuel rod hydriding failures in water reactors". Proceedings of 17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 17), Prague, Czech Republic, 2003.
17. E.Yu. Afanasieva, I.A. Evdokimov, Khoruzhii O.V., V.V. Likhanskii, V.V. Novikov, A.A. Sorokin "Modelling of primary and secondary hydriding failures in operating fuel rods". Proceedings of ASTM 14th International Symposium on Zirconium in the Nuclear Industry, 13-17 June 2004, Stockholm, Sweden, 11 pp.
18. V. Likhanskii, I. Evdokimov, O. Khoruzhii, V. Novikov, A. Sorokin "Modeling of fission product release from defective fuel rods under WWER operation conditions and in leakage tests during refueling". Proc. of the 2004 Int. Meeting on LWR Fuel Performance, Orlando, Florida, September 19-22, 2004, Paper 1083, pp.798-812.
19. V. Likhanskii, I. Evdokimov, A. Sorokin, V. Kanukova, A. Khromov, E. Afanasieva "Failed fuel diagnosis during WWER reactor operation using the RTOP-CA code". Proceedings of 6<sup>th</sup> Int. Conf. on WWER Fuel Performance "Modelling and Experimental Support", Albena, Bulgaria, 19-23 September 2005, paper 1.13
20. V. Likhanskii, I. Evdokimov, E. Afanasieva, N. Efremov, D. Kirilenko, A. Khromov, A. Sorokin, P. Svoitin, V. Zborovskiy "Development of defect size determination procedure in cask of WWER defective assembly detection system". Proceedings of 6<sup>th</sup> Int. Conf. on WWER Fuel Performance "Modelling and Experimental Support", Albena, Bulgaria, 19-23 September 2005, paper 1.12.
21. V. Likhanskii, E. Afanasieva, N. Efremov, I. Evdokimov, V. Kanukova, D. Kirilenko, A. Khromov, P. Svoitin, A. Sorokin, V. Molchanov, A. Sharikov "Integrated approach to detection of defective WWER fuel assemblies". Proceedings of Water Reactor Fuel Performance Meet., Kyoto, Japan, 2-6 October 2005, pp.382-395.
22. В.В. Лиханский, И.А. Евдокимов, А.А. Сорокин, В.Д. Канюкова "Использование экспериментальной базы данных OECD/NEA/IAEA IPRE по выходу активности из негерметичных ТВЭЛов для верификации кода РТОП-СА". Препринт ТРИНИТИ № 126-А. М., ЦНИИАтоминформ, 2006, 27 С.
23. Е.Ю. Афанасьева, И.А. Евдокимов, О.В. Аполлонова, В.Д. Канюкова, В.В. Лиханский, А.А. Сорокин "Моделирование выхода продуктов деления из UO<sub>2</sub>-топлива в условиях разгерметизации". Труды конференции МАЯТ-ОФИЭ, Агой, 3-7 октября 2006.
24. Е.Ю. Афанасьева, И.А. Евдокимов, В.Г. Зборовский, Н.М. Ефремов, Д.А. Кириленко, В.В. Лиханский, П.А.Своитин, А.А. Сорокин "Применение топливных кодов для оценки размера дефекта в негерметичных ТВЭлах ВВЭР". Труды конференции МАЯТ-ОФИЭ, Агой, 3-7 октября 2006.

25. V.V. Likhanskii, I.A. Evdokimov, A.A. Sorokin, A.G. Khromov, V.D. Kanukova, O.V. Apollonova, V.B. Ionov, A.V. Ugryumov. "Development of Expert System for Failed Fuel Diagnosis under WWER Operation Conditions". Proceedings of International Meeting LWR Fuel Performance, TopFuel 2006, Salamanca, Spain, 22-26 October 2006, pp.466-470.
26. А.А. Сорокин, В.В. Лиханский, И.А. Евдокимов, О.В. Аполлонова, Е.Ю. Афанасьева "Моделирование выхода продуктов деления из негерметичных твэлов ВВЭР модифицированной конструкции". Труды 8-ой Российской конференции по реакторному материаловедению, Димитровград, 2007.
27. В.В. Лиханский, Т.Н. Алиев, И.А. Евдокимов, В.Г. Зборовский, В.Д. Канюкова, А.А. Сорокин "Моделирование UO<sub>2</sub>-топлива высокого выгорания". Международный научный журнал "Ядерная физика и инжиниринг", № 1, 2010 г.