

*На правах рукописи*

**РАДАЕВ Александр Иванович**

**РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ РАСЧЕТНОЙ ПОДДЕРЖКИ ЭКСПЛУАТАЦИИ И  
ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ ПО КОНВЕРСИИ НА НИЗКООБОГАЩЕННОЕ  
УРАНОВОЕ ТОПЛИВО ДЛЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РЕАКТОРОВ**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Автор:



Москва – 2015 г.

**Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете**

**«МИФИ»**

НАУЧНЫЙ  
РУКОВОДИТЕЛЬ: Тихомиров Георгий Валентинович  
доктор физико-математических наук,  
доцент, Национальный исследовательский ядерный  
университет «МИФИ»

ОФИЦИАЛЬНЫЕ  
ОППОНЕНТЫ: Калугин Михаил Александрович  
доктор технических наук,  
начальник отдела, Курчатовский Центр Ядерных  
Технологий, НИЦ «Курчатовский институт»

Марихин Николай Юрьевич  
кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник, АО «ГНЦ НИИАР»

ВЕДУЩАЯ  
ОРГАНИЗАЦИЯ: АО «ВНИИАЭС»

Защита состоится «20» мая 2015 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.130.04 при НИЯУ МИФИ по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, д.31., тел.: (499) 324-84-98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте <http://ods.mephi.ru>.

Автореферат разослан «    » апреля 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
д.ф.-м.н., профессор



И.И. Чернов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Исследовательские ядерные реакторы (ИЯР) являются важной составляющей ядерного комплекса России и широко используются для исследований в фундаментальной физике, материаловедческих исследованиях, для производства радиоизотопов и медико-биологических облучений.

В настоящее время в России проводится «целенаправленная переоценка уровней безопасности исследовательских ядерных реакторов в свете событий, которые произошли на АЭС Фукусима» в соответствии с «Программой целевой оценки безопасности исследовательских ядерных установок в Российской Федерации (стресс-тесты)». Одной из актуальных научно-технических проблем применительно к исследовательским реакторам также является обоснование конверсии (перевода) с высокообогащенного уранового (ВОУ) топлива на низкообогащенное урановое (НОУ) топливо. Задачи, связанные как с обоснованием безопасности, так и с конверсией на использование НОУ топлива, требуют совершенствования технологий расчетной поддержки исследовательских реакторов. В частности, необходима разработка специализированных прецизионных расчетных моделей индивидуально для каждого конкретного реактора, позволяющих проводить многовариантные нейтронно-физические расчеты с приемлемой точностью за разумное время.

Таким образом, разработка и верификация прецизионных расчетных моделей, основанных на программах расчета методом Монте-Карло и отвечающих современным требованиям по точности и быстродействию, для исследовательских реакторов бассейнового типа является актуальной задачей.

**Цель работы.** Разработка и верификация специализированных прецизионных расчетных моделей исследовательских реакторов на основе использования программ, реализующих метод Монте-Карло, для обоснования конверсии на использование низкообогащенного топлива и обоснования безопасности.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Проведены расчетные исследования по обоснованию выбора параметров модели исследовательского реактора бассейнового типа для расчета по программе MCU-PTR. В результате этих исследований выбрано пространственно-временное разбиение, обеспечивающее достаточную для решаемых задач погрешность при минимальном времени счета, а также

- выбраны библиотеки констант, обеспечивающие наилучшее совпадение с расчетами по другим прецизионным программам.
2. Разработаны инженерные методики, дополняющие прецизионную модель, а именно методика оценки изотопного состава выгоревших ТВС на основе данных о глубине выгорания урана-235 для полномасштабного нейтронно-физического расчета состояния активной зоны по прецизионной модели и методика оценки выгорания поглощающего стержня для реактора типа ИРТ с помощью данных об эксплуатации реактора.
  3. Разработан набор тестовых задач для кросс-верификации прецизионных программ, отражающий основные изменения нейтронно-физических характеристик активной зоны при переходе с ВОУ на НОУ топливо ИРТ-3М. Проведена верификация программы MCU-PTR для расчета нейтронно-физических характеристик реактора типа ИРТ с ВОУ и НОУ топливом путем сопоставления с расчетами по другим прецизионным программам.
  4. Разработаны специализированные прецизионные модели исследовательских реакторов МАРИЯ, ВВР-К и ИРТ МИФИ для расчета по программе MCU-PTR стационарных задач и процесса выгорания.
  5. С использованием разработанных прецизионных моделей проведены исследования возможности конверсии исследовательских реакторов МАРИЯ, ВВР-К и ИРТ МИФИ на использование НОУ топлива и расчетное обоснование испытаний ТВС с НОУ топливом на реакторах МАРИЯ, ВВР-К.

#### **Научная новизна.**

- Впервые проведен полный комплекс расчетных исследований, обосновывающий выбор параметров модели нейтронно-физического расчета методом Монте-Карло, обеспечивающих приемлемую для решения инженерных задач погрешность при минимальном времени счета для исследовательского реактора бассейнового типа и сформулированы рекомендации по выбору параметров модели.
- Получены новые результаты для кросс-верификации программ MCU-PTR, MCNP+MCREB и SERPENT 2.
- Впервые разработаны и апробированы специализированные прецизионные модели исследовательских реакторов МАРИЯ, ВВР-К и ИРТ МИФИ для расчета по программе MCU-PTR стационарных задач и процесса выгорания.

### **Практическая значимость работы**

- С помощью расчетов по прецизионной программе MCU-PTR обоснована возможность конверсии исследовательских реакторов МАРИЯ и ВВР-К на использование НОУ топлива.

- Проведена верификация программы MCU-PTR для расчета реактора ИРТ МИФИ с ВОУ топливом ИРТ-3М на основе сопоставления с экспериментальными данными.

- Проведена верификация результатов обоснования конверсии ИРТ МИФИ на использование НОУ топлива ИРТ-3М.

- Проведено расчетное обоснование испытаний ТВС с НОУ топливом на исследовательских реакторах МАРИЯ, ВВР-К.

Практическая значимость результатов работы подтверждена актами о внедрении НИЯУ МИФИ и АО «НИКИЭТ».

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

1. Разработанные модели исследовательских реакторов МАРИЯ, ВВР-К и ИРТ МИФИ для расчета стационарных нейтронно-физических задач и процесса выгорания по программе MCU-PTR.
2. Результаты выбора параметров геометрической модели, параметров статистической модели и библиотек ядерных данных при нейтронно-физическом расчете с помощью программы, основанной на методе Монте-Карло, для исследовательского реактора бассейнового типа.
3. Методика приближенной оценки выгорания поглощающего стержня для реактора типа ИРТ на основе расчетов по программе MCU-PTR и данных об эксплуатации реактора.
4. Результаты кросс-верификации программы MCU-PTR и других прецизионных программ для расчета загрузок активной зоны с высоко- и низкообогащенным топливом ТВС типа ИРТ-3М.
5. Результаты расчетного обоснования конверсии исследовательских реакторов МАРИЯ и ВВР-К на использование НОУ топлива.
6. Результаты верификация программы MCU-PTR для расчета нейтронно-физических характеристик реактора ИРТ МИФИ с ВОУ топливом ИРТ-3М.

### **Апробация работы**

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных семинарах и конференциях: Научная сессия НИЯУ МИФИ, Россия, г. Москва, 2012, 2013, 2014 гг.; НЕЙТРОНИКА-2011, 2012, 2013 – Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики, Россия, г. Обнинск, 2011, 2012, 2013 гг.; 9-я Курчатовская молодежная научная школа, Россия, г. Москва, 2011 г.; Конференции молодых ученых и специалистов «Актуальные вопросы мирного использования атомной энергии», г. Алматы, Республика Казахстан, 2012 г.; Школа-семинар по проблемам физики реакторов ("Волга-2012"), 2012 г.; Международная научно-техническая конференция «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики» (МНТК НИКИЭТ-2012, 2014), Россия, г. Москва, 2012, 2014 гг. Конференция молодых специалистов «Инновации в атомной энергетике», Россия, г. Москва, 2013, 2014 гг.; 35th International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors RERTR 2014, Vienna, Austria, 2014.

### **Публикации.**

По теме диссертации опубликовано 15 работ в научных журналах и сборниках трудов Международных и Российских конференций, совещаний и семинаров, в том числе 4 статьи в реферируемых изданиях из перечня ВАК РФ и 1 патент.

### **Личный вклад автора.**

Все представленные в диссертации результаты получены лично автором или участием коллег-соавторов по приведенным публикациям.

### **Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Работа содержит 174 страниц печатного текста, 58 рисунков, 59 таблиц. Библиография насчитывает 66 наименований.

### **Основное содержание работы.**

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована цель и решаемые задачи, указана новизна и практическая значимость работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** диссертационной работы описано назначение исследовательских реакторов, рассмотрена проблема перевода топлива исследовательских реакторов с высокообогащенного урана на низкообогащенный

уран. Приведен обзор программных средств, используемых для нейтронно-физических расчетов исследовательских реакторов.

В рамках обоснования конверсии исследовательских реакторов на НОУ топливо проводятся многовариантные нейтронно-физические расчеты загрузок с новым НОУ и существующим ВОУ топливом для сравнения параметров активных зон и выбора оптимальных вариантов загрузок с НОУ топливом. При этом экспериментальные данные о нейтронно-физических характеристиках для загрузок с разрабатываемым НОУ топливом отсутствуют, следовательно, применения инженерных программных средств недостаточно, так как они требуют адаптации к реальному объекту на основе сопоставления с экспериментом. То есть необходимо использовать прецизионные программы, при этом время, затрачиваемое на расчет, должно по возможности быть сокращено.

Прецизионные расчетные модели включают в себя программу, реализующую метод Монте-Карло, позволяющий детально моделировать перенос нейтронов по пространству, описание геометрии объекта с использованием универсального языка задания геометрии сложных систем, а также описание параметров расчетной модели, а именно, пространственного и временного разбиения, используемых библиотек ядерных данных и параметров статистической модели. Разработка специализированной расчетной модели для конкретного исследовательского реактора, основанной на методе Монте-Карло и ориентированной на использование программ типа MCU, MCNP, является достаточно трудоемкой задачей. Выбор параметров модели индивидуален для каждого типа реактора и оказывает существенное влияние на результаты расчета и, в особенности, на время, затрачиваемое на расчет. В настоящее время для исследовательских реакторов бассейнового типа (ИРТ, ВВР-КН, ВВР-ц) не существует четко сформулированных рекомендаций по выбору вышеперечисленных параметров расчетной модели для расчета методом Монте-Карло, хотя опыт расчетов этих реакторов имеется.

**Во второй главе** представлены исследования, проведенные для выбора параметров прецизионных (реперных) моделей ИР бассейнового типа, используемых для обоснования перевода на низкообогащенное топливо, расчетного сопровождения эксплуатации и обоснования безопасности. Перечисленные задачи предполагают использование прецизионной программы для решения инженерных задач. В данных

условиях требования к погрешности модели смягчаются, а требования к быстродействию – ужесточаются.

Опыт верификации и использования прецизионных программ для расчетного сопровождения ИР позволяет сформулировать следующие достижимые и приемлемые для решаемых задач требования к погрешности расчета по прецизионной программе ( $K_{эфф}$  – эффективный коэффициент размножения нейтронов,

$$\Delta K/K = \frac{K_{эфф} - 1}{K_{эфф}}):$$

при сопоставлении:	с другими расчетами	с экспериментом
в $K_{эфф}$ , % $\Delta K/K \dots$	<0,5	<1
в эффективности стержней, % ...	<5	<10
в энерговыделении, % ...	<5	<10
в выгорании выгружаемых ТВС, % (отн.)	<5	<10

Для реализации поставленных целей необходимо было разработать модель с минимальной степенью детализации, обеспечивающей требуемые погрешности. Степень детализации выбиралась путем сравнения расчетов с менее детальной моделью с расчетами с более детальной моделью (по одной и той же программе).

Предложено обоснование выбора пространственного разбиения для расчета по Монте-Карловской программе распределения энерговыделения и выгорания для исследовательского реактора с ТВС типа ИРТ-3М.

#### *Оптимальный размер расчетной ячейки с максимальным энерговыделением*

Выбор размера области, которая рассматривается как “горячая” точка, оказывает существенное влияние как на результат определения максимального энерговыделения, так и на вычислительные затраты. Последние могут существенно возрастать из-за медленного набора необходимой статистики в мелких зонах. Проведены расчеты максимального удельного энерговыделения для реакторов с ВОУ и НОУ ТВС типа ИРТ-3М с разным пространственным разбиением твэлов в горизонтальной плоскости и по высоте при разной статистике. В горизонтальной плоскости рассмотрено разбиение каждого трубчатого твэла на 4 угла и 4 грани. По высоте рассмотрено разбиение на 12, 24 или 30 расчетных зон ( $N_z = 12, 24, 30$ ). Получены эмпирические соотношения для статистической ошибки в максимальном энерговыделении в зависимости от числа историй при разном пространственном



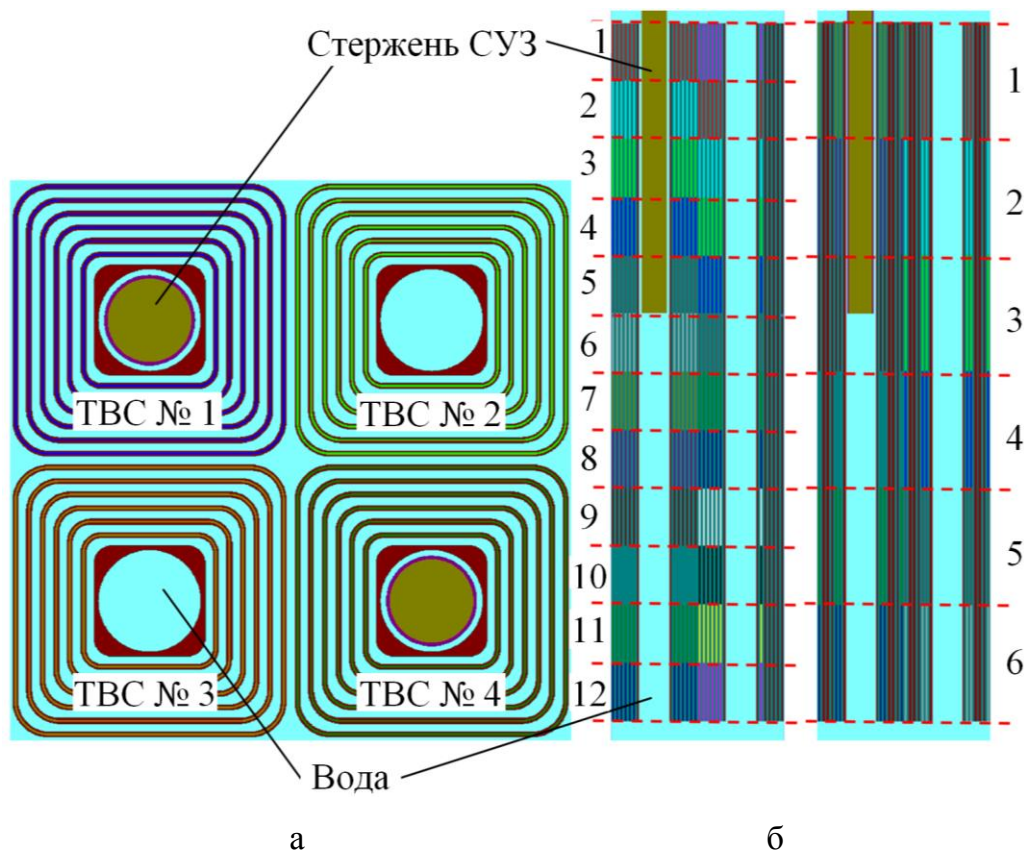
разбиении. Показано, что при расчете на основе метода Монте-Карло размер области, которая рассматривается как “горячая” точка (наиболее напряженная область), нецелесообразно выбирать меньшим, чем  $0,1 \text{ см}^3$ . При выполнении этого требования статистика, необходимая для статистической погрешности в максимальном энерговыделении  $\sim 1 \%$ , составляет  $\sim 5 \cdot 10^7$  историй. Для ТВС ИРТ-3М указанный объем расчетной области соответствует размеру ячейки по высоте  $\sim 5 \text{ см}$  (12 высотных слоев). Дальнейшая детализация высотного разбиения не приводит к уточнению максимального энерговыделения вследствие достаточной гладкости его распределения (в окрестности  $\pm 2,5 \text{ см}$  от максимума энерговыделение меняется не более чем на  $\pm 0,5 \%$ ). В тоже время при расчете с разбиением на 30 слоев по высоте по 2 см, для статистической погрешности в максимальном энерговыделении  $\sim 1 \%$ , необходим расчет не менее  $1,5 \cdot 10^8$  историй.

#### *Выбор пространственного разбиения при расчете распределения выгорания*

Выбор пространственного разбиения для расчета максимального энерговыделения и расчета процесса выгорания являются разными задачами. Чтобы исследовать влияние детальности расчета распределения глубины выгорания по высоте ТВС на основные нейтронно-физические характеристики исследовательского реактора, проведены расчеты двух модельных задач. В задаче 1 с помощью программы MCU-PTR рассчитан процесс выгорания в полиячейке из четырех ТВС. Рассмотрены ТВС ИРТ-3М с НОУ топливом, в центре двух ТВС расположен частично погруженный поглощающий стержень из карбида бора (рисунок 1). Рассчитано два варианта: в первом ТВС разделены на двенадцать равных высотных слоев, выгорающих как единый материал, во втором – на шесть. В таблице 1 приведены результаты расчета заданной системы с разным числом слоев по выгоранию  $N_z^{\text{выг}}$  (стандартное отклонение в  $K_{\text{эфф}}$  равно 0,00025). Различие в коэффициенте размножения варианта с 6 слоями по высоте от варианта с 12 слоями составляет 0,09 %  $\Delta K/K$  на момент времени 438 сут и 0,26 %  $\Delta K/K$  на момент времени 877 сут. Различие в среднем по ТВС выгорании практически равно нулю.

В задаче 2 рассмотрена активная зона из 16-ти 6-трубных ТВС ИРТ-3М с НОУ топливом в бериллиевом отражателе с двумя полностью погруженными стержнями. Исследовано три варианта задания распределения выгорания по высоте каждой ТВС: единое выгорание по высоте, выгорание задано в 6-ти и 12-ти слоях по высоте

(разбиение на слои равномерное). Рассчитаны коэффициент размножения, распределение мощностей ТВС в активной зоне, коэффициенты неравномерности энерговыделения по объему ТВС и максимальное удельное энерговыделение. Различие в перечисленных параметрах между вариантами с 6-ю и 12-ю слоями не превышает статистической погрешности.



а – горизонтальное сечение; б – вертикальное сечение

Рисунок 1 – Расчетная полячейка с нумерацией ТВС и расчетных высотных слоев по выгоранию (6 и 12 слоев)

Таблица 1 – Коэффициент размножения полячейки и средняя по ТВС глубина выгорания, рассчитанные с разным числом слоев по выгоранию  $N_z^{ВЫГ}$

Время, сут	$K_{эфф}$		Выгорание $^{235}\text{U}$ , %			
			ТВС № 1		ТВС № 2	
	$N_z^{ВЫГ}=6$	$N_z^{ВЫГ}=12$	$N_z^{ВЫГ}=6$	$N_z^{ВЫГ}=12$	$N_z^{ВЫГ}=6$	$N_z^{ВЫГ}=12$
3	1,4017	1,4019	0,21	0,21	0,24	0,24
219	1,3202	1,3194	14,70	14,72	16,75	16,74
438	1,2393	1,2379	28,81	28,82	32,72	32,70
877	1,0361	1,0333	54,88	54,86	61,93	61,88

В результате проведенных исследований сделан вывод, что для расчета максимального энерговыделения в “горячей” ТВС типа ИРТ с погрешностью ~1 %

достаточно использовать размер ячейки по высоте ~5 см (12 высотных слоев), при этом выгорание может быть распределено по 6-ти высотным слоям.

#### *Выбор шага по времени при расчете выгорания*

Чтобы выбрать шаг по времени для модели реактора типа ИРТ проведены расчеты с различным числом временных шагов двух вышеописанных задач: полячейки из 4-х НОУ ТВС с двумя погруженными наполовину поглощающими стержнями (см. рисунок 1), и активной зоны из 16 НОУ ТВС с двумя полностью погруженными стержнями. Расчеты проведены с кусочно-линейным и кусочно-постоянным описанием зависимости от времени потока и сечений.

Результаты расчетов показали, что шаг по времени, при котором средняя по активной зоне глубина выгорания изменяется на ~5 %, достаточен для того, чтобы изменение спектра нейтронов за счет изменения изотопного состава было описано корректно, как с кусочно-линейным, так и с кусочно-постоянным описанием зависимости от времени потока и сечений. Для реактора мощностью 2,5 МВт из 16 ТВС такой временной шаг соответствует энерговыработке ~5000 МВт·ч. Длительность одной кампании (время работы между перегрузками) для реакторов типа ИРТ составляет 1000–10000 МВт·ч (чаще всего 2000–5000 МВт·ч). Таким образом, представленные результаты показывают, что для моделирования практически любой кампании реактора типа ИРТ достаточно одного шага по времени. Данное утверждение о выборе шага по времени сделано для случая, когда глубина погружения поглощающих стержней не меняется в процессе кампании. Следовательно, выбор шага по времени при расчете выгорания реальных задач целиком определяется тем, насколько подробно предполагается учитывать перемещение стержней в процессе кампании.

В результате проведенных исследований разработана модель реактора типа ИРТ из 16 ТВС со следующими параметрами:

Статистическая погрешность в $K_{эфф}$ ...	<0,0002
Статистическая погрешность в макс. энерговыделении ...	~1 %
Число историй ...	~(5–7)·10 <sup>7</sup>
Время расчета одного состояния (1 процессор 3GHz) ...	24–48 ч
Число зон по высоте для расчета энерговыделения ...	12
Число зон по высоте для расчета выгорания ...	6

Изменение среднего по активной зоне выгорания

за 1 временной шаг ... ~5 %

Временной шаг для расчета выгорания ... ~5000 МВт·ч

Данные параметры могут быть рекомендованы для расчета любого исследовательского реактора с топливом трубчатого (пластинчатого) типа с учетом числа ТВС в активной зоне. Сокращать время, затрачиваемое на расчет по прецизионной программе, можно не только путем выбора параметров модели, но и дополняя в некоторых случаях прецизионную модель инженерными методиками.

*Методика задания изотопного состава выгоревшего топлива для прецизионной модели на основе данных о выгорании урана-235*

Для расчета выгоревших активных зон энергетических реакторов по Монте-Карловским программам в основном используется изотопный состав, полученный в результате ячеечного расчета. Для исследовательских реакторов во многих случаях используется такая же технология, однако, благодаря их малым размерам, есть возможность проводить и полномасштабный реакторный расчет выгорания.

В рамках данной работы впервые было проведено детальное сравнение результатов расчета с «ячеечным» и «реакторным» изотопным составом. Показано, что в коэффициенте размножения расхождение не превышает 0,15 % (для активной зоны с типичным средним выгоранием 30 %). Оценено расхождение в концентрациях изотопов плутония. Например при выгорании 30 % количество  $^{239}\text{Pu}$  в НОУ ТВС, оцененное в реакторном расчете, составляет от 7,5 до 10 г в зависимости от условий облучения ТВС, а ячеечный расчет дает значение 8,7 г.

Кроме того, была разработана методика задания изотопного состава выгоревшего топлива для расчета по программам MCNP и MCU, основанная на ячеечном расчете и введении фиктивного осколка (в качестве которого были выбраны  $^{101}\text{Ru}$  и  $^{95}\text{Mo}$ ) для учета вклада в поглощение слабопоглощающих продуктов деления. Разработанная методика позволяет проводить расчет выгоревшей активной зоны по MCNP и MCU с идентичным изотопным составом, что важно для верификации программы MCU-PTR.

### *Модель выгорания поглощающего стержня*

В реакторах типа ИРТ, ВВР-К, ВВР-ц используются поглощающие стержни из карбида бора диаметром ~2 см. Время эксплуатации поглощающих стержней составляет несколько десятков лет. За это время происходит выгорание  $^{10}\text{B}$  в поглотителе. Выгорание поглощающего стержня представляет собой процесс с характерным временем, намного превышающим время эксплуатации ТВС, и поэтому проводить расчет выгорания поглотителя вместе с выгоранием топлива трудоемко.

Проведена оценка выгорания поглощающих стержней для реактора ИРТ МИФИ мощностью 2,5 МВт при интегральной энерговыработке активной зоны со стержнями ~45000 МВт·ч, а также для модельного реактора мощностью 6 МВт при интегральной энерговыработке активной зоны со стержнями ~380000 МВт·ч.

Были решены следующие задачи:

- Путем двумерного ячеечного расчета определен изотопный состав поглощающего стержня в зависимости от времени эксплуатации.
- Путем трехмерного расчета активной зоны определена зависимость потери полной эффективности стержня за счет выгорания  $^{10}\text{B}$  от времени эксплуатации (при выбранной мощности) без учета распределения выгорания  $^{10}\text{B}$  по высоте.
- На основе эксплуатационных данных реактора (интегральная энерговыработка ТВС со стержнем, схема перемещения стержней) и результатов расчета распределения энерговыделения по высоте ТВС со стержнем при разной глубине погружения стержня определено эффективное время эксплуатации для шести высотных слоев стержня.
- На основе рассчитанного эффективного времени эксплуатации для шести высотных слоев оценено выгорание  $^{10}\text{B}$  в трех радиальных зонах. Путем трехмерного расчета активной зоны получены кривые интегральной эффективности стержней для данного распределения выгорания  $^{10}\text{B}$  и для свежего поглотителя.
- Показано, что для ИРТ МИФИ потеря эффективности стержней за счет выгорания поглотителя пренебрежимо мала (0,9 %), а для рассмотренного модельного реактора мощностью 6 МВт сопоставима с погрешностью экспериментального определения эффективности стержней (3 %).

Модель для расчета по программе MCU-PTR, сформированная с учетом вышеописанных рекомендаций, позволяет проводить расчет одного состояния и

процесса выгорания за приемлемое время без использования суперкомпьютеров. При этом проведенные исследования показали, что погрешность расчета основных нейтронно-физических характеристик остается вполне удовлетворительной. Это позволяет проводить многовариантные расчеты, необходимые при обосновании конверсии на НОУ топливо.

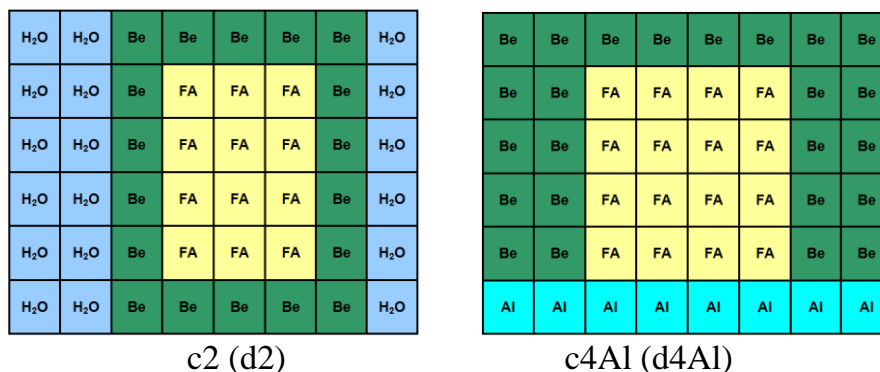
**Третья глава** посвящена кросс-верификации прецизионных программ нейтронно-физического расчета, используемых для обоснования конверсии ИР на использование НОУ топлива. Верификация программ нейтронно-физического расчета может основываться на сопоставлении с результатами реперных экспериментов или с реакторными экспериментальными данными. Однако для топлива 20%-ного обогащения имеется мало оцененных экспериментальных данных, кроме того, критические сборки активных зон обычно имеют менее гетерогенную структуру, чем реальные активные зоны ИР. Реакторные экспериментальные данные для новых (разрабатываемых) видов НОУ топлива вовсе отсутствуют. Поэтому для расчетных моделей активных зон с новыми видами НОУ топлива предлагается использовать процедуру сравнительной верификации прецизионных Монте-Карловских программ.

Был разработан набор тестовых задач для исследовательского реактора типа ИРТ с уран-молибденовым НОУ топливом и оксидным ВОУ топливом. Тестовые задачи были рассчитаны по программам MCU-PTR, MCNP, MCREB (MCNP+REBUS), SERPENT 2. Расчеты по MCNP с библиотеками констант ENDF/B-VII.0 и MCREB были проведены специалистами Аргоннской Национальной Лаборатории (США). Расчеты по SERPENT 2 были проведены специалистами Южно-Африканской Корпорации по Атомной Энергии (NECSA).

Картограммы двух тестовых задач изображены на рисунке 2. Загрузка d4A1 моделирует существующую загрузку из 16 ВОУ ТВС с отражателем из бериллия и алюминия (в упрощенном виде, без экспериментальных каналов). Загрузка c2 моделирует начальную загрузку из 12 свежих НОУ ТВС, которая возникает после одномоментной конверсии.

Результаты расчета 3-х наиболее важных тестовых задач по программам MCNP, MCU-PTR и SERPENT 2 представлены в таблице 2 (расчет без стержней, кроме c2г. Вариант c2г – это расчет загрузки c2 с двумя полностью погруженными стержнями в центре). В расчетах, приведенных в таблице 2, варьировались

библиотеки констант для отдельных элементов. Расчеты по MCU-PTR проведены в двух вариантах: с использованием библиотеки BNAB/MCU при  $E > 4,65$  эВ или библиотеки ACE/MCU при  $100 \text{ кэВ} < E < 20 \text{ МэВ}$  и библиотеки BNAB/MCU при  $2,15 \text{ эВ} < E < 100 \text{ кэВ}$ ).



FA – 6-трубная ТВС, Be – бериллиевый блок, Al – алюминиевый блок, H<sub>2</sub>O – вода.  
Рисунок 2 – Картограммы загрузки с ВОУ и НОУ топливом (с2, с4Al – НОУ, d2, d4Al – ВОУ)

Таблица 2 – Результаты расчета тестовых задач по MCNP, MCU-PTR и SERPENT 2 с разными библиотеками констант (статистическая погрешность <0,0003)

Программа	Библиотеки (за исключением)	$K_{эфф}$ (различие, % $\Delta K/K$ )			
		с4Al	d4Al	с2	с2r
MCNP	ENDF/B-VII	1,1904 (0)	1,2248 (0)	1,1615 (0)	1,0836 (0)
MCNP	ENDF/B-VII, (42000.66с)	1,1882 (-0,16)	-	1,1599 (-0,12)	1,0821 (-0,13)
MCNP	ENDF/B-VII, (Be-ENDF/B-VI)	1,1916 (0,08)	1,2259 (0,07)	1,1627 (0,09)	1,0857 (0,18)
MCNP	ENDF/B-VI*	1,1872 (-0,23)	1,2250 (0,01)	1,159 (-0,19)	1,0822 (-0,12)
MCU-PTR	ACE/MCU	1,1879 (-0,18)	1,2253 (0,03)	1,1587 (-0,21)	1,0796 (-0,34)
MCU-PTR	BNAB/MCU	1,1944 (0,28)	1,2326 (0,52)	1,1603 (-0,09)	1,0848 (0,10)
SERPENT 2	ENDF/B-VII, (be.60t)	1,1912 (0,05)	-	-	1,0857 (0,18)

\*При расчете варианта MCNP/ENDF/B-VI использовались константы 1001.62с, 4009.62с, 8016.62с, 13027.62с, 42000.66с, 92235.66с, 92238.66с, be.60t, lwtr.60t.

Отличие результатов расчета по MCU-PTR с библиотеками BNAB/MCU от результатов расчета по MCNP с константами ENDF/B-VII составляет от -0,1 %  $\Delta K/K$  до 0,5 %  $\Delta K/K$ . То есть, если рассматривать переход от загрузки d4Al к загрузке с2, то

различие в прогнозе изменения запаса реактивности по рассматриваемым программам может составить 0,6 %  $\Delta K/K$ , что является довольно существенным.

Отличие результатов расчета по MCU-PTR с библиотеками ACE/MCU от результатов расчета по MCNP с библиотеками ENDF/B-VII меньше, чем для расчетов по программе MCU-PTR с библиотеками BNAB/MCU. Разброс в значениях отклонения составляет 0,37 %  $\Delta K/K$ . Таким образом, для обоснования конверсии реактора типа ИРТ на НОУ топливо с точки зрения лучшего согласования с другими прецизионными программами целесообразно использовать программу MCU-PTR с библиотеками констант ACE/MCU.

Проведен расчет тестовой задачи, моделирующей выгорание активной зоны из 12–16 ТВС с НОУ топливом в течение двух кампаний, начиная со «свежей» активной зоны. На рисунке 3 изображено изменение реактивности в течение первых двух кампаний, а также отклонение результатов расчета по MCU-PTR от результатов расчета по MCREB в %  $\Delta K/K$ .

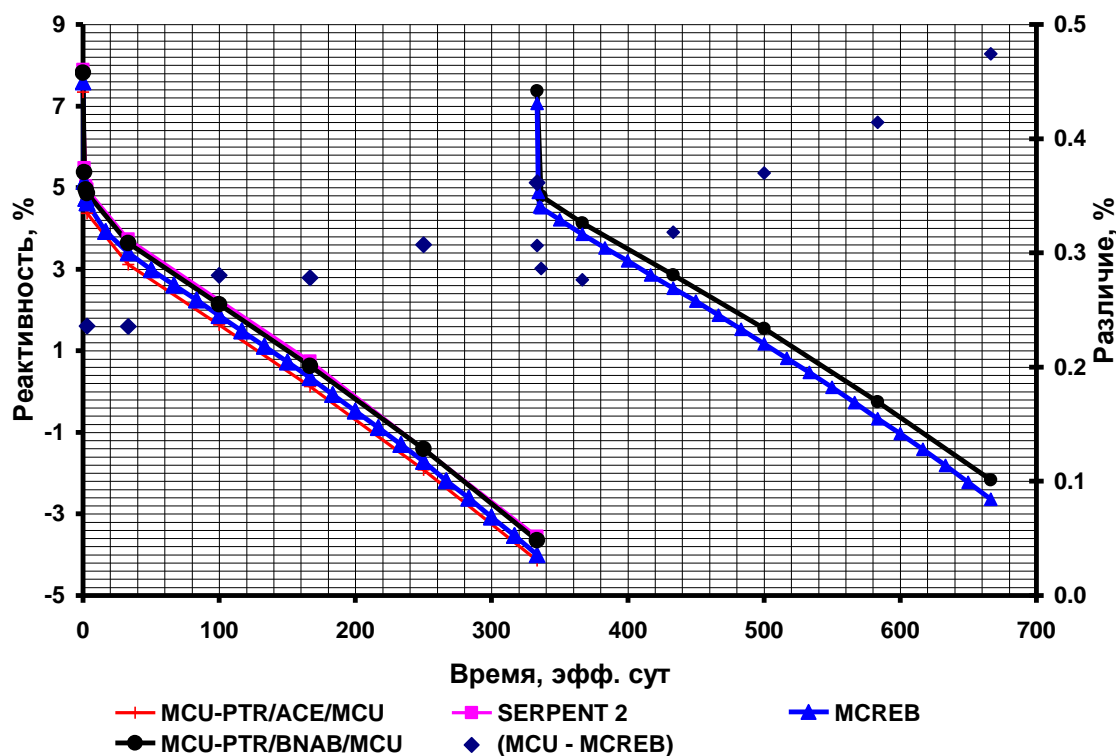


Рисунок 3 – Изменение расчетной реактивности в течение первой и второй кампаний, рассчитанное по программам MCREB и MCU-PTR.

Расчеты тестовой задачи с выгоранием показали, что наблюдается хорошее совпадение расчетов по выбранным программам. Увеличение расхождения в коэффициенте размножения между расчетами по MCREB и MCU-PTR в течение двух



кампаний не превышает 0,25 %  $\Delta K/K$ , что в основном связано с разной энергией деления и захвата, используемой в программах.

Таким образом, проведен расчет стационарных задач и задачи с выгоранием, проанализировано влияние используемых библиотек ядерных данных на расхождение расчетов по MCU-PTR и другим прецизионным программам. Выбраны библиотеки программы MCU-PTR, обеспечивающие наилучшее совпадение с другими прецизионными программами.

**В четвертой главе** приведены результаты использования прецизионных моделей исследовательских реакторов для обоснования конверсии на НОУ топлива реакторов ВВР-К, МАРИЯ и ИРТ МИФИ.

Прецизионные модели для расчетов по программе MCU, разработанные с учетом исследований, представленных в главе 2, были созданы для нескольких ИР и использованы для решения различных задач, включая проектные расчеты, обоснование безопасности, обоснование реакторных испытаний, эксплуатационные расчеты и верификационные расчеты. Большинство этих задач было связано с конверсией ИР на использование НОУ топлива.

*Целью разработки модели для ИРТ МИФИ* была верификация расчетов, выполненных для обоснования конверсии по программе MCNP, а также совершенствование расчетной поддержки эксплуатации ИРТ МИФИ.

Последние несколько лет проводятся исследования по обоснованию конверсии реактора ИРТ МИФИ на использование НОУ топлива. В качестве НОУ топлива для исследований возможности конверсии ИРТ МИФИ была выбрана ТВС ИРТ-3М с топливом на основе U-9%Mo-Al обогащением 19,7 % по  $^{235}\text{U}$ .

Проведен стационарный нейтронно-физический расчет трех образцовых (референтных) загрузок активной зоны ИРТ МИФИ: существующей активной зоны из 16 ТВС с ВОУ топливом (загрузка от 04.02.2009 г.), «свежей» загрузки активной зоны из 12 ТВС с НОУ топливом и восьми свежих бериллиевых блоков и предполагаемой рабочей загрузки активной зоны из 16 ТВС с НОУ топливом.

В таблице 3 приведены результаты расчета образцовых загрузок при разных положениях стержней СУЗ (АР, КС-1,2,3) по программам MCNP с константами ENDF/B-VI и MCU-PTR с библиотеками BNAB/MCU или ACE/MCU. Материальный состав топлива и отражателя в представленных моделях для MCNP и MCU-PTR

полностью идентичен. Изотопный состав для выгоревшего топлива получен путем ячеечных расчетов процесса выгорания по программе MCU-PTR. Максимальная статистическая ошибка в  $K_{эфф} - 0,0002$ .

Отклонение результатов расчета по MCU-PTR/BNAB/MCU от MCNP составляет (0,6–0,8) %  $\Delta K/K$  для всех положений стержней.

Таблица 3 – Результаты расчета критического состояния, запаса реактивности и подкритичности образцовых загрузок по программам MCNP и MCU-PTR (АЗ-1,2,3 =0 мм)

Глубина погружения, мм				MCNP	MCU-PTR		$\rho_{MCU}^{BNAB} - \rho_{MCNP}$ , % $\Delta K/K$	$\rho_{MCU}^{ACE} - \rho_{MCNP}$ , % $\Delta K/K$
AP	КС-1	КС-2	КС-3	$K_{эфф}$	$K_{эфф}$ (BNAB)	$K_{эфф}$ (ACE)		
Рабочая загрузка с ВОУ топливом								
250	0	0	393	1,00326	1,01043	1,00323	0,71	0
0	0	0	0	1,05781	1,06567	1,05844	0,70	0,06
580	580	580	580	0,89172	0,89757	0,89139	0,73	-0,04
«Свежая» загрузка с НОУ топливом								
250	0	180	580	1,0009	1,00868	1,00176	0,77	0,09
0	0	0	0	1,1114	1,12017	1,11245	0,70	0,08
580	580	580	580	0,9470	0,95287	0,94626	0,65	-0,08
Рабочая загрузка с НОУ топливом								
250	0	0	390	1,00592	1,0124	1,00625	0,64	0,03
0	0	0	0	1,05291	1,06013	1,05406	0,65	0,10
580	580	580	580	0,90551	0,910319	0,90517	0,58	-0,04

Отклонение в  $K_{эфф}$  результатов расчета по MCU-PTR с библиотеками ACE/MCU от MCNP составляет не более 0,1 %  $\Delta K/K$  для всех положений стержней, различие в интегральной эффективности стержней не превышает 1 %. Различие в максимальном удельном энерговыделении между расчетами по MCNP и MCU-PTR не превышает 2 % для всех рассматриваемых загрузок и не зависит от используемой библиотеки констант.

Представленные результаты демонстрируют удовлетворительное совпадение расчетов по программам MCNP и MCU-PTR. Результаты расчета референтных загрузок подтверждают правильность выбора библиотек констант при расчете по MCU-PTR, который был осуществлен в результате расчета тестовых задач.

Верификация MCU-PTR для расчета ИРТ МИФИ с ВОУ топливом проведена на основе сопоставления с реакторными эксплуатационными данными. Проведены расчеты 8-ми циклов работы ИРТ МИФИ в 2004–2009 гг. В таблице 4 представлен краткий обзор основных результатов расчета нейтронно-физических характеристик для трех рассмотренных циклов.

Таблица 4 – Результаты расчета нейтронно-физических характеристик ИРТ МИФИ

Параметр	Цикл #114		Цикл #120		Цикл #121	
	Эксперимент	MCU-PTR	Эксперимент	MCU-PTR	Эксперимент	MCU-PTR
$\rho, \beta_{эфф}$ (критичность)	0	0,05	0	0,70	0	0,54
Интегральная эффективность, $\beta_{эфф}$						
АЗ-1	4,9	4,86	4,2	4,24	4,2	4,23
АЗ-2	5,1	5,03	5,0	5,23	5,0	5,24
АЗ-3	3,5	3,39	3,3	3,08	3,3	3,35
АЗ	13,5	13,28	12,5	12,55	12,5	12,82
АР	2,16	2,42	2,35	2,72	2,45	2,72
КС-1	5	5,36	4,4	4,66	4,31	4,06
КС-2	5,15	5,51	5,1	5,37	5,03	4,99
КС-3	6,5	6,79	6,85	7,17	7,01	6,98
Запас реактивности, $\beta_{эфф}$	8,7	8,88	7,9	9,01	6,3	7,24
Подкритичность, $\beta_{эфф}$	-10,11	-11,2	-10,8	-10,91	-12,5	-11,51

Верификация MCU-PTR подтвердила удовлетворение требований к погрешности модели, сформулированных в главе 2.

*Расчетная модель ВВР-К* была разработана для решения следующих задач:

- проектные расчеты ОАО «НИКИЭТ» по созданию новой ТВС ВВР-КН;
- разработка и оптимизация процедуры перехода активной зоны реактора ВВР-К от загрузки из ВОУ ТВС ВВР-Ц к загрузке из ТВС нового поколения (ТВС ВВР-КН) с низкообогащенным топливом;
- обоснование безопасности эксплуатации реактора ВВР-К с ТВС ВВР-КН;
- разработка программы реакторных испытаний ТВС ВВР-КН в составе активной зоны реактора ВВР-К.

С помощью расчетов по программе MCU определена и оптимизирована процедура перехода активной зоны реактора ВВР-К, состоящей из ТВС ВВР-Ц с боковым водяным отражателем, на активную зону, состоящую из бериллиевого отражателя и ТВС ВВР-КН с низкообогащенным топливом.

В таблице 4 представлены некоторые параметры активной зоны реактора ВВР-К с ТВС ВВР-Ц и ТВС ВВР-КН.

Таблица 4 – Сравнительные характеристики ИР с ТВС ВВР-Ц и ВВР-КН

Параметр	Значение		
	ИР с ТВС ВВР-Ц	ИР с ТВС ВВР-КН (отражатель из воды)	ИР с ТВС ВВР-КН (отражатель из Be)
Номинальная мощность, МВт	6		
Число ТВС рабочей загрузки	68	26	26
Масса $^{235}\text{U}$ в рабочей загрузке, г	6000–6300 при среднем выгорании 18%	6000–6300 при среднем выгорании 10%	3600–3900 при среднем выгорании 40%
Число рабочих органов СУЗ, шт.	8	10	10
Макс. поток тепловых нейтронов, $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$ в активной зоне в отражателе	$\sim 1,44 \cdot 10^{14}$ $\sim 0,28 \cdot 10^{14}$	$\sim 1,9 \cdot 10^{14}$ $\sim 0,4 \cdot 10^{14}$	$\sim 2,1 \cdot 10^{14}$ $\sim 0,7 \cdot 10^{14}$
Запас реактивности в начале цикла, % $\Delta K/K$	$\sim 4,85$	$\sim 7$	$\sim 6$
Кампания, сут	$\sim 12,5$	$\sim 75$	$\sim 15$
Среднее выгорание в выгружаемых ТВС, %	$\sim 40$	$< 15$	$\sim 50$

Нейтронно-физическими и теплогидравлическими расчетами обоснована работоспособность ТВС ВВР-КН в реакторе ВВР-К и перспективных бассейновых исследовательских реакторах, отвечающих современным эксплуатационным потребностям и требованиям безопасности. Конверсия реактора ВВР-К является положительным примером снижения обогащения топлива без ущерба для потребительских характеристик реактора.

*Расчетная модель ИР МАРИЯ* была разработана для решения следующих задач:

- проектные расчеты АО «НИКИЭТ» по техническому обоснованию ТВС МР с топливом  $\text{UO}_2+\text{Al}$  с обогащением 19,7 % по урану-235 и плотностью урана в топливных сердечниках  $3,83 \text{ г/см}^3$ ;

- обоснование безопасности эксплуатации реактора МАРИЯ с ТВС МР;
- разработка программы реакторных испытаний ТВС МР в составе активной зоны реактора МАРИЯ.

При переходе на НОУ топливо требуется модификация расчетных моделей, разработанных для реакторов с ВОУ топливом, и их дополнительная верификация. В частности, возникает необходимость более детального учета особенностей конструкции реактора. Например, особенность конструкции реактора МАРИЯ заключается в применении переменного по высоте шага между каналами. В верхнем, среднем и нижнем сечениях активной зоны этот шаг равен 140, 130 и 120 мм соответственно. Проведено исследование влияния переменного шага между каналами по высоте активной зоны на нейтронно-физические характеристики реактора МАРИЯ на примере ячеечного и полномасштабного реакторного расчета.

Сравнение двух моделей реактора (с постоянным и переменным шагом между каналами) была проведена на примере реальной загрузки от 04.03.2011 г. Результаты расчета активной зоны реактора МАРИЯ при критическом положении рабочих органов (РО) СУЗ представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Эффективный коэффициент размножения нейтронов  $K_{эфф}$  и коэффициент неравномерности энерговыделения по объему активной зоны  $K_v$  модели реактора МАРИЯ для загрузки от 04.03.2011 г. Топливо –  $UO_2+Al$ , обогащение – 36 %, плотность – 2,5 гU/см<sup>3</sup>.

Шаг между каналами	$K_{эфф}$ (погрешность)	$K_v$	Максимально энергонапряженная зона		
			Номер ТВС	Высота расположения центра, мм	Координата, (сектор; твэл)
Переменный по высоте	1,0051 (0,0004)	3,82	9	310	(6; 1)
Постоянный по высоте (130 мм)	0,9998 (0,0004)	3,74	9	290	(5; 1)

В случае полномасштабного расчета учет переменного шага между каналами дает по-сравнению с вариантом с постоянным шагом не только другое расположение максимально энергонапряженной зоны по высоте, но и другое ее расположение в горизонтальной плоскости, а также отличие в  $K_{эфф}$  ~0,5 %. Проведенные исследования обосновали необходимость учета переменного шага между каналами в расчетной геометрической модели для адекватной оценки основных нейтронно-физических характеристик.

Расчеты активной зоны исследовательского реактора МАРИЯ с НОУ топливом показали, что при переходе на ТВС МР с топливом обогащения 19,7 %:

- 1) плотность потока нейтронов в местах расположения облучательных устройств уменьшается на 5–10 %;
- 2) суммарная эффективность РО СУЗ уменьшается на 4,8 % (относительных);
- 3) среднее выгорание топлива в выгружаемых ТВС и продолжительность равновесного топливного цикла сохраняются;
- 4) требование правил ядерной безопасности ИР к подкритичности при взведенных РО АЗ ( $K_{эфф} \leq 0,99$ ) с учетом погрешности расчета эффективного коэффициента размножения нейтронов для реактора МАРИЯ выполняется только при работе в режиме частичных перегрузок при среднем по объему активной зоны выгорании  $^{235}\text{U}$  в топливе не менее 29 % (2795 МВт·ч на ТВС).

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ**

1. Сформулированы рекомендации по выбору параметров модели расчета методом Монте-Карло для исследовательского реактора бассейнового типа.

2. Разработаны инженерные методики, дополняющие прецизионную модель, а именно – методика оценки изотопного состава выгоревших ТВС для полномасштабного нейтронно-физического расчета состояния активной зоны по прецизионной модели и методика оценки выгорания поглощающего стержня для реактора типа ИРТ с помощью данных об эксплуатации реактора.

3. Получены новые результаты для кросс-верификации программ MCU-PTR, MCNP+MCREB и SERPENT 2.

4. Разработаны и апробированы специализированные прецизионные модели исследовательских реакторов МАРИЯ, ВВР-К и ИРТ МИФИ для расчета по программе MCU-PTR стационарных задач и процесса выгорания.

5. С использованием разработанных прецизионных моделей проведены исследования возможности конверсии исследовательских реакторов МАРИЯ, ВВР-К и ИРТ МИФИ на использование НОУ топлива и расчетное обоснование испытаний ТВС с НОУ топливом на исследовательских реакторах МАРИЯ, ВВР-К.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. С.В. Ивахин, А.И. Радаев, Г.В. Тихомиров, М.В. Щуровская. Расчетное моделирование выгорания топлива исследовательского реактора ИРТ при анализе конверсии на НОУ топливо. – В сб.: Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики («НЕЙТРОНИКА»), г. Обнинск, ГНЦ РФ-ФЭИ, 2012, т. 2, с. 597–602.
2. С.А. Соколов, А.И. Радаев, О.А. Кравцова, В.А. Лукичев. Исследование конверсии исследовательского реактора «МАРИЯ» на низкообогащенное урановое топливо. – В сб.: Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики («НЕЙТРОНИКА-2012»), г. Обнинск, ГНЦ РФ-ФЭИ, 2013, т. 1, с. 21–27.
3. С.В. Ивахин, А.И. Радаев, Г.В. Тихомиров, М.В. Щуровская. Расчетное моделирование выгорания топлива исследовательского реактора ИРТ при анализе конверсии на низкообогащенное урановое топливо. – Известия вузов. Ядерная энергетика, 2012, № 3, с. 81–90.
4. С.В. Ивахин, Г.В. Тихомиров, М.В. Щуровская, А.И. Радаев. Разработка тестовых задач активной зоны исследовательского реактора ИРТ для нейтронно-физических расчетов. – ВАНТ. Сер.: Обеспечение безопасности АЭС. Исследовательские реакторы, 2013, вып. 33, с. 91–96.
5. С.А. Соколов, А.И. Радаев, О.А. Кравцова, В.А. Лукичев. Использование программного комплекса MSU в задачах перевода исследовательских реакторов на низкообогащенное топливо. – См. п. 4, с. 87–91.
6. С.А. Соколов, А.И. Радаев, О.А. Кравцова, В.А. Лукичев. Исследование конверсии исследовательского реактора «МАРИЯ» на низкообогащенное урановое топливо. – См. п. 4, с. 96–102.
7. И.Т. Третьяков, С.А. Соколов, В.И. Трушкин, Р.П. Куатбеков, О.А. Кравцова, С.В. Осипович, К.А. Никель, А.В. Горячих, А.И. Радаев, А.Е. Кулаков. Разработка проектов перспективных бассейновых исследовательских реакторов. – См. п. 4, с. 103–110.
8. С.В. Ивахин, А.И. Радаев, Г.В. Тихомиров, М.В. Щуровская. Проблемы верификации программ нейтронно-физического расчета исследовательского реактора типа ИРТ с низкообогащенным уран-молибденовым топливом. – М.: Препринт 001-2013, НИЯУ МИФИ, 2013, –54с.

9. Ю.С. Черепнин, С.А. Соколов, С.Ю. Булкин, В.А. Лукичев, О.А. Кравцова, А.И. Радаев. Перевод исследовательского реактора ВВР-К на низкообогащенное урановое топливо как основа для разработки и внедрения ТВС ВВР-КН в существующих и перспективных бассейновых исследовательских реакторах. – В сб.: Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики, г. Москва, НИКИЭТ, 2014, т. 1, с. 384–394.
10. М.В. Щуровская, В.П. Алферов, А.А. Портнов, А.И. Радаев. Расчет реактивностных аварий ИРТ МИФИ для обоснования конверсии на использование низкообогащенного топлива. - Атомная энергия, 2014, т. 117, вып. 2, с. 63–69.
11. V.P. Alferov, M.V. Shchurovskaya, A.I. Radaev, N.A. Hanan. Comparative Validation of Monte Carlo Codes for Conversion of IRT MEPHI Research Reactor to LEU Fuel. – In proc. of the 35th Internat. Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors RERTR 2014, Vienna, 2014, S12–P2.
12. М.Л. Душкин, О.А. Кравцова, Р.П. Куатбеков, К.А. Никель, С.В. Осипович, А.И. Радаев, С.А. Соколов, И.Т. Третьяков, В.И. Трушкин, С.Г. Ухаров, Г.А. Хачересов. Ядерный реактор для производства изотопов. - Патент на изобретение № 2497207, заявка № 2012131856/07, приоритет от 24.07.2012, регистрация в Госреестре 17.01.2014.
13. V.P. Alferov, A.I. Radaev, M.V. Shchurovskaya, G.V. Tikhomirov, N.A. Hanan, F.A. Van Heerden. Comparative validation of Monte Carlo codes for the conversion of a research reactor. – Annals of nuclear energy, 2015, v. 77, p. 273-280.
14. А.И. Радаев, М.В. Щуровская. Обоснование параметров геометрической модели активной зоны исследовательского реактора при расчете методом Монте-Карло. – ВАНТ. Сер.: Физика ядерных реакторов, 2014, № 4, с. 21–33.
15. С.В. Ивахин, Г.В. Тихомиров, М.В. Щуровская, А.И. Радаев. Сравнение результатов расчёта исследовательского реактора ИРТ МИФИ с помощью программ MCSU-PTR и MCSNP. – В сб.: Научная сессия НИЯУ МИФИ – 2014, г. Москва, НИЯУ МИФИ, 2014, т. 1, с. 134.