

*На правах рукописи*

**ИВАНОВ Илья Евгеньевич**

**РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ РЕАКТОРНЫХ РАСЧЕТОВ С  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ НА  
ГРАФИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОРАХ**

05.13.18 – Математическое моделирование, численные  
методы и комплексы программ

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Автор:



Москва – 2014 г.

**Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете**

**«МИФИ»**

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:	Щукин Николай Васильевич доктор физико-математических наук, профессор, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:	Ковалишин Алексей Анатольевич доктор физико-математических наук, директор отделения, Курчатовский центр ядерных технологий (КЦЯТ), институт перспективных энергетических технологий, отделение физики и моделирования энергетики, НИЦ «Курчатовский институт»  Келлин Николай Сергеевич кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, ФГБУН Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН
ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ:	ФГБУН Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН

Защита состоится 24 сентября 2014 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.130.09 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 \_\_\_\_\_ 2014 г.

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



А.С.Леонов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современная атомная энергетика – это высокотехнологичная и наукоемкая отрасль экономики, развитие которой требует постоянного повышения культуры безопасности и экономической эффективности. Это неразрывно связано с разработкой и внедрением более совершенных методик, проведением массовых расчетных исследований, как при разработке проектов новых типов реакторов, так и в области сопровождения эксплуатации. Качественный скачок вычислительной техники создал необходимые предпосылки и возможности для существенного обновления технологий реакторных расчетов для проектирования и сопровождения эксплуатации ядерных энергетических установок (ЯЭУ).

В этой связи особую значимость приобретает задача разработки более совершенных программных средств (ПС) нового поколения, которые должны удовлетворять следующим требованиям:

- ориентация на решение широкого круга проектных и эксплуатационных задач;
- иметь в своей основе адекватные физические модели протекающих процессов;
- обеспечивать необходимую для практики проектирования и эксплуатации ЯЭУ точность и представительность оценки расчетных параметров;
- быть конкурентоспособно на рынке программных продуктов в ядерно-энергетической отрасли.

Представленные в настоящей работе методики, алгоритмы и разработанные ПС (коды MNT-CUDA и GETERA-GPU) соответствуют вышеназванным требованиям и направлены на совершенствование расчетного обеспечения проектирования и эксплуатации действующих и перспективных ЯЭУ. В этой связи тема диссертации является актуальной.

### Цель и задачи работы.

Целью работы является разработка методических, алгоритмических и программных средств нового поколения для инженерных и прецизионных расчетов ЯЭУ на этапе проектирования и эксплуатации. В этой связи были сформулированы и решены следующие задачи:

- Разработка новых методик и алгоритмов расчета нейтронных полей многогрупповыми методами вероятности первых столкновений (ВПС) и Монте-Карло, адаптированными к использованию на ЭВМ с графическими процессорами (GPU).
- Разработка программы полномасштабного моделирования переноса нейтронов во всём объёме реакторе методом Монте-Карло, содержащей принципиально новый алгоритм коррекции модели по показаниям внутриреакторных датчиков (ВРД).
- Создание новой версии спектральной программы GETERA-GPU, предназначенной для расчета сложных по геометрии фрагментов активных зон.
- Разработка специального программного обеспечения для организации процедуры тестирования и оценки качества тестируемого ПС. Специфика процедуры тестирования заключается в использовании принципиально новых математических бенчмарк-задач, основанных на прецизионных расчетах

полномасштабных активных зон реактора РБМК-1000 по программе MCU с коррекцией по показаниям ВРД.

- Проведение опытной эксплуатации разработанных кодов на примере расчетов нейтронно-физических характеристик действующих энергоблоков РБМК-1000 с использованием реальных показаний ВРД.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- Предложен новый подход для проведения корректировки параметров расчетной модели физически большого реактора по показаниям ВРД в рамках метода Монте-Карло.
- Разработаны новые методики и алгоритмы решения уравнения переноса нейтронов в рамках группового метода Монте-Карло, метода ВПС и диффузионного приближения, обеспечивающие эффективные вычисления на GPU.
- Впервые для тестирования разработанных кодов применены принципиально новые математические тесты (бенчмарки), основанные на прецизионных расчетах полномасштабных трехмерных активных зон и ячеек реактора РБМК-1000.
- Впервые получены эмпирические соотношения, связывающие расчетные параметры статистической модели (величина пакета нейтронов, общая статистика и др.) с величиной статистической ошибки пространственно-распределенных функционалов для активной зоны реактора РБМК-1000.

Практическая значимость

- Программы MNT-CUDA и GETERA.GPU внедрены в опытную эксплуатацию в ОАО «ВНИИАЭС». Имеется акт о внедрении.
- Обеспечено повышение качества эксплуатационных расчетов, расширение области применимости инженерного программного обеспечения, используемого для эксплуатационных расчетов РБМК. (Сопоставлена точность прецизионных и вновь предложенных инженерных расчетов)
- Программа GETERA.GPU и реализованные в ней новые методики и алгоритмы внедрены в учебный процесс в НИЯУ МИФИ. Имеется акт о внедрении.
- Реализована возможность эффективного использования современного вычислительного оборудования на базе GPU для решения задач нейтронно-физического расчета реакторов.

Положения, выносимые на защиту:

- Новые методики и алгоритмы, ориентированные на использование современных графических процессоров.
- Новая методика коррекции параметров расчетной модели по показаниям ВРД в рамках метода Монте-Карло при расчете физически большого реактора.
- Разработанные программы (GETERA.GPU и MNT-CUDA).
- Результаты тестирования и апробации разработанного программного обеспечения, включая тестирование на трехмерных бенчмарках активных зон реактора РБМК-1000, подготовленные по прецизионной программе MCU.

- Результаты исследования особенностей регистрации пространственно распределенных функционалов при моделировании переноса нейтронов в физически больших системах методом Монте-Карло.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных семинарах и конференциях:

- 130-е заседание семинара «Физика ядерных реакторов» Курчатовского центра ядерных технологий НИЦ «Курчатовский институт» 2013 г.
- XXII семинар по нейтронно-физическим проблемам атомной энергетики «Нейтроника», 2011 г.
- XVI, XVII семинары по проблемам физики ядерных реакторов («ВОЛГА-2010», «ВОЛГА-2012»)
- XIII, XV научная сессия НИЯУ МИФИ (2010, 2012)
- VIII международная научно-техническая конференция «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» МНТК-2012
- Баксанская молодежная школа экспериментальной и теоретической физики (БМШ ЭТФ 2010)

Публикации. Основные результаты, изложенные в диссертации, опубликованы в 15 научных работах, из них 4 опубликованы в журналах из списка ВАК.

#### Личный вклад автора

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

#### Структура и объем диссертации:

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения. Содержит 135 печатного текста, 65 рисунков, 37 таблиц. Библиография насчитывает 95 наименований.

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Энергетическая политика Российской Федерации ориентирована на широкое использование атомной энергии как внутри страны, так и за ее пределами. Правительством поставлены задачи качественного обновления структуры атомной энергетики, повышения ее доли в общем энергетическом балансе страны за счет создания безопасных и конкурентоспособных ЯЭУ. В этой связи особую значимость приобретает разработка программного обеспечения нового поколения которое должно удовлетворять следующим требованиям:

- ориентироваться на решение широкого круга проектных и эксплуатационных задач;
- иметь в своей основе адекватные физические модели протекающих процессов;
- обеспечивать необходимую для практики проектирования и эксплуатации ЯЭУ точность и представительность оценки расчетных параметров;
- быть конкурентоспособно на рынке программных продуктов в ядерно-энергетической отрасли.

**Главной темой настоящей работы являлась разработка методик и**

## **программного обеспечения повышенной точности для проведения проектных и эксплуатационных нейтронно-физических расчетов ядерных энергетических установок (ЯЭУ).**

**Во введении** приведен обзор доступной информации о развитии программного обеспечения применяемого для расчета нейтронно-физических характеристик АЭС, рассмотрены новые возможности, появившиеся в результате развития вычислительной техники, и сформулированы актуальные задачи и требования к проектированию нового программного обеспечения повышенной точности для инженерных и проектных расчетов ядерных реакторов. Обосновывается актуальность работы, формулируются цели, изложены научная новизна, практическая ценность, достоверность полученных результатов, личный вклад автора, а также положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассматриваются проблемы расчета нейтронного поля в физически больших системах средствами стохастического моделирования и описываются методики, позволяющие рассчитывать даже такой физически большой реактор как РБМК-1000 методом Монте-Карло с коррекцией по показаниям внутрореакторных датчиков.

Обсуждается проблема оценки величины статистических ошибок трехмерных пространственно-распределённых функционалов, например, при проведении полномасштабных расчетов нейтронно-физических характеристик (НФХ) энергоблоков РБМК-1000. Эта проблема связана с наличием в таких системах сильной пространственной корреляции источников деления на соседних итерациях и сильной корреляции числа столкновений в ноде с числом поглощений в ней. Это не позволяет для оценки ошибок среднего числа столкновений в регистрационном объекте пользоваться упрощенными формулами, опирающимися на независимость событий. В диссертации предложен подход к оценке статистических ошибок пространственно-распределенных функционалов в физически больших системах, опирающийся на возможность быстрого моделирования прямого переноса нейтронов в подобных системах на ЭВМ с графическими процессорами и сопоставлении полученных результатов с аналитическим решением. Используя разработанную в рамках диссертации программу MNT-CUDA, на модельной задаче были получены эмпирические соотношения, связывающие расчетные параметры статистической модели (величина пакета нейтронов, общая статистика и др.) с величиной статистической ошибки пространственно-распределенных функционалов для активной зоны реактора РБМК-1000. На рисунке 1 представлены некоторые наиболее важные результаты этих расчетов. На основании них были получены рекомендации по выбору параметров модели при проведении полномасштабных прецизионных расчетов реактора РБМК-1000 методом Монте-Карло. Полученные результаты в настоящее время используются в ОАО «ВНИИАЭС» для выбора параметров расчетной модели при проведении трехмерных прецизионных расчетов полномасштабных загрузок реактора РБМК-1000 по программе MCU и при проведении расчетов по программе MNT-CUDA разработанной в рамках диссертации.

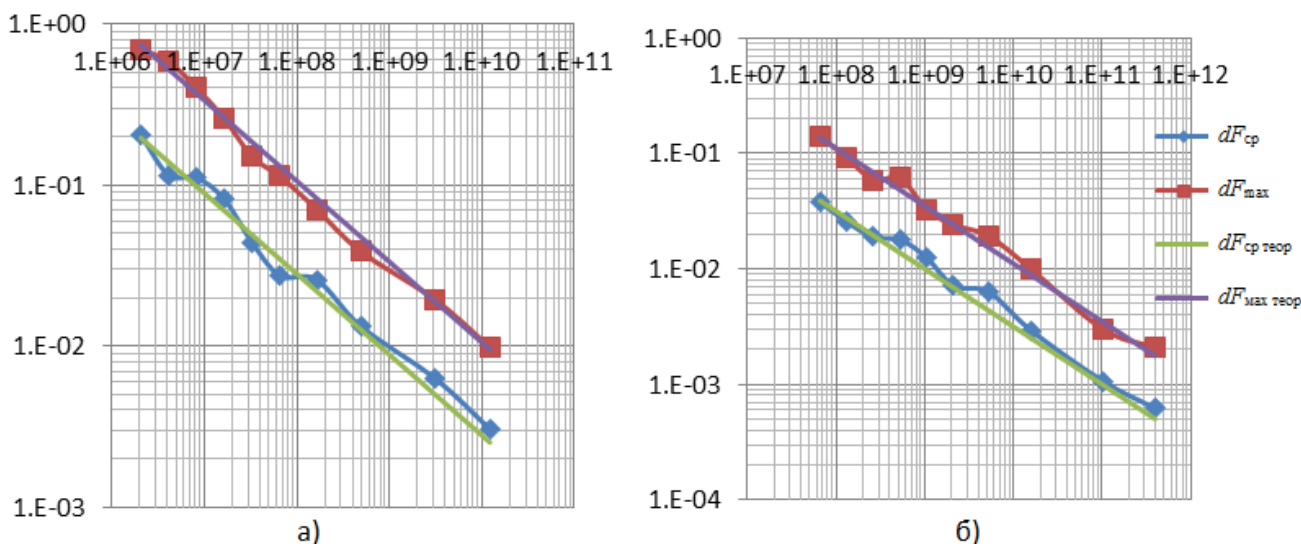


Рис. 1. График зависимости точности расчёта относительного числа столкновений в ноде от числа историй ( $dF_{cp}$  – величина среднеквадратического относительного отклонения,  $dF_{max}$  – величина максимального относительного отклонения): а) размер пакета 4 096, б) размер пакета 131 000

Другой проблемой расчета физически больших систем методом Монте-Карло (в задачах эксплуатации реактора), является необходимость корректировки расчетной модели по показаниям внутриреакторных датчиков (ВРД). Погрешность прямого расчёта энергораспределения без использования информации от ВРД достаточно велика (10-50 %). Неопределённость исходных данных может приводить к заметному отклонению расчетных и измеренных полей энергосвечения.

В общем случае уравнение переноса нейтронов в терминах скорости генерации можно записать в следующем виде:

$$q = \frac{1}{K_{eff}} \hat{Q} \hat{L}^{-1} q \quad (1)$$

Суть метода коррекции модели заключается в нахождении такого корректирующего диагонального оператора  $\hat{\delta}$ , который будучи умноженным на оператор  $\hat{Q}$  позволит переписать исходную задачу в следующем виде:

$$q_{cor} = \hat{\delta} \hat{Q} \hat{L}^{-1} q_{cor}$$

Где  $q_{cor}$  скорость генерации нейтронов, полученная коррекцией исходного решения (1) на показания ВРД ( $\hat{S}q = q_{cor}$ ).

Регистрация полей нейтронов в методе Монте-Карло связана с наличием статистической погрешности. Это не позволяет применять методики коррекции, традиционно используемые в детерминистических расчётах, которые основаны на сравнении источников нейтронов деления на двух соседних итерациях. В этой связи в диссертации предложены и апробированы две методики нахождения поправок расчётной модели в рамках метода Монте-Карло.

На рисунке 2 представлена упрощенная схема организации итерационного процесса, позволяющая рассчитать корректирующий оператор  $\hat{\delta}$ , в рамках метода Монте-Карло.

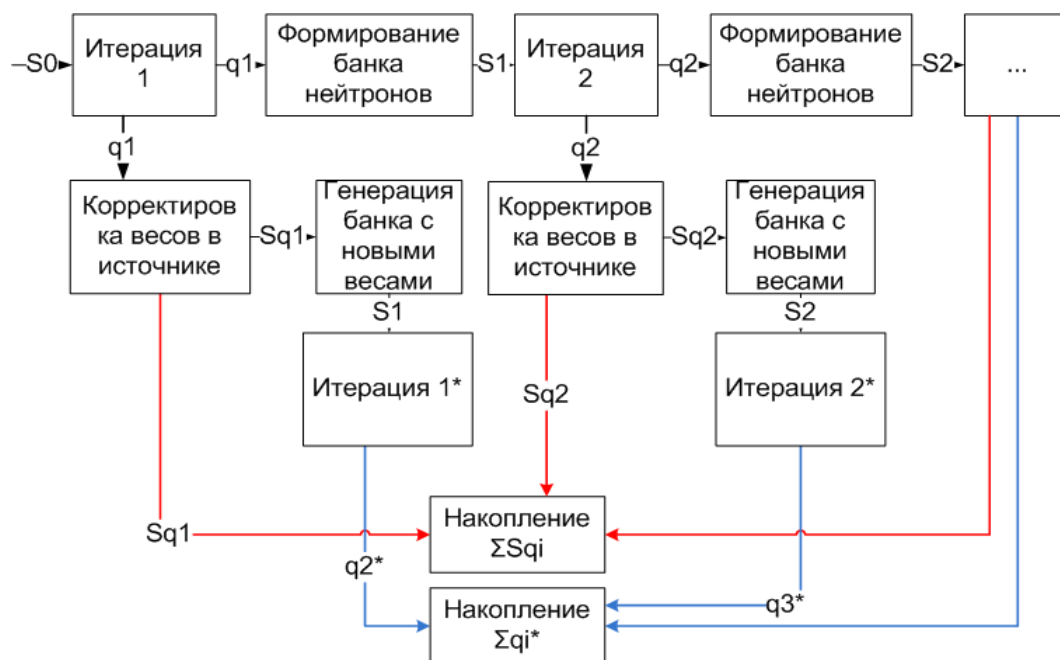


Рис. 2. Упрощенная схема итерационного процесса расчета поправок к сечениям генерации

В диссертации представлены результаты апробации предложенных разработанных методик, как на модельных задачах, так и на реальных состояниях энергоблоков РБМК-1000. Обе методики позволят обеспечить приемлемую для инженерных расчетов точность восстановления на показания ВРД.

**Во второй главе** предложены два метода детального расчета пространственно-энергетического распределения нейтронов во фрагментах активных зон со сложной геометрией - комбинированный метод вероятностей первых столкновений (ВПС) и групповой метод Монте-Карло ориентированные на использование графических процессоров. Рассмотрены проблемы, возникающие при адаптации и реализации этих методов на современных графических процессорах.

В рамках диссертационной работы была разработана и апробирована новая версия программы GETERA, предназначенная для детального расчета ячеек и полиячеек ядерных реакторов в сложной геометрии в большом числе энергетических групп.

Новизна подхода при построении комбинированного метода МВП-ВПС состоит в том, что объектами являются не элементарные зоны, а неоднородные по физическим свойствам ячейки сложной геометрии, описываемые своими матрицами вероятностей, зависящими только от свойств данной ячейки. Использование такого подхода позволяет выделять в системе области, которые необходимо рассчитывать детально численным интегрированием по геометрически сложным объемам и области, которые допустимо рассчитывать с использованием тех или иных приближений.

Математически задача выглядит следующим образом. Записывается система уравнений для ячеек, каждая из которых может состоять из зон.



$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{\Sigma}_{tot} \vec{F} = \hat{P}_{ij} \vec{Q}_v + \hat{P}_{S>V}^* \vec{J}_{in} \\ \vec{J}_{out} = \hat{P}_{V>S} \vec{Q} + \hat{P}_{S>S} \vec{J}_{in} \\ \vec{J}_{in} = \hat{A} \vec{J}_{out} \end{array} \right.$$

Эти уравнения отражают скорости столкновений в каждой из зон системы ячеек, а вектора  $J_{in}$  и  $J_{out}$  вместе с матрицей  $A$  описывают перетечки нейтронов между внешними границами ячеек системы. Следует отметить, что внутренняя и внешняя структура ячеек может быть достаточно сложной, так как расчет вероятностей внутри ячеек осуществляется прямым численным интегрированием. Основное приближение состоит в том, что необходимо априорно задать пространственно-угловое распределение на внешних границах ячеек. Это позволяет рассчитать матрицы  $P_{sv}$   $P_{ss}$  и, опираясь на них, вычислить полную матрицу вероятностей по формуле

$$\hat{P}_{ij} = \hat{P}_{V>V} + \hat{P}_{S>V}^* \hat{A} [\hat{E} - \hat{P}_{S>S} \hat{A}]^{-1} \hat{P}_{V>S}.$$

Комбинированный метод МВП-ВПС потребовал разработки эффективных и быстродействующих алгоритмов численного расчета ВПС в геометрически сложных объектах, что стало возможным только за счет эффективного распараллеливания вычислений на GPU.

Особенности архитектуры графических процессоров потребовали разделить алгоритм на несколько независимых блоков (модулей) выполняющихся последовательно. Внутри каждого из модулей организуются параллельные вычисления с высокой степенью параллелизма и высокой эффективностью использования кэш-памяти. Схема взаимодействия этих модулей представлена на рисунке 3.



Рис. 3. Схема взаимодействия модулей блока расчета ВПС в произвольной 2D геометрии.

Одной из существенных особенностей разработанного геометрического модуля является то, что в нем реализована возможность эффективно моделировать на GPU перенос частиц в геометрии, описанной системой плоскостей, цилиндров и других поверхностей без необходимости проводить процедуру триангуляции поверхностей или воксельного описания геометрических объектов. Следует отметить, что из-за особенностей архитектуры графически процессоров, первые поколения GPU, поддерживающие программно-аппаратную платформу CUDA, не позволяли реализовать достаточно эффективные алгоритмы трассировки лучей через объекты со сложной геометрией. В новом поколении GPU NVIDIA FERMI получение существенного выигрыша в производительности стало возможным за счет использования L1 и L2 кэша глобальной памяти и некоторых других особенностей архитектуры. Кроме того, наличие кэша глобальной памяти и новые эффективные атомарные инструкции для целых чисел и чисел с плавающей точкой дали предпосылки для возможности эффективной реализации на них метода Монте-Карло.

Для апробации модулей детального расчета ВПС в сложной геометрии был проведен расчет топливной ячейки реактора ИРТ МИФИ, геометрия которой представлена на рисунке 4.

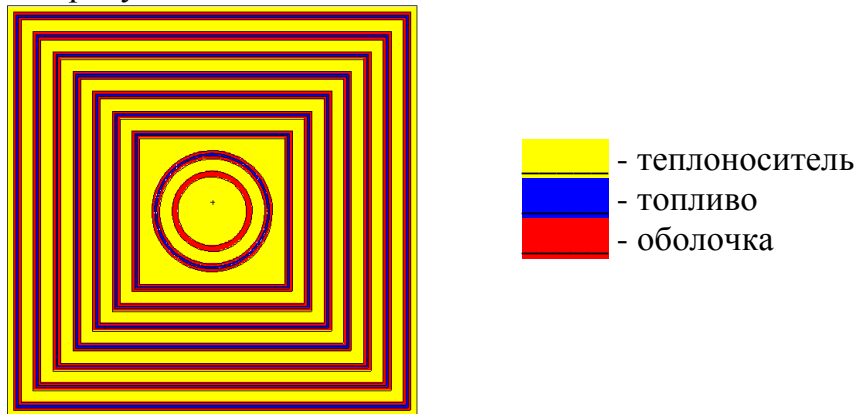


Рис. 4. Геометрия ячейки ИРТ МИФИ

Проводились сравнения результатов расчетов по программе GETERA-GPU и по прецизионной программе MCNP. На рисунках 5-6 представлены результаты сравнения. Наблюдается хорошее согласие с прецизионными расчетами и существенное увеличение точности по сравнению со старой версией программы GETERA. При этом использование GPU позволило уменьшить время расчета ячейки в сложной геометрии с 6,5 минут на современном 4-х ядерном центральном процессоре до 1 минуты на видеокарте NVIDIA GTX450.

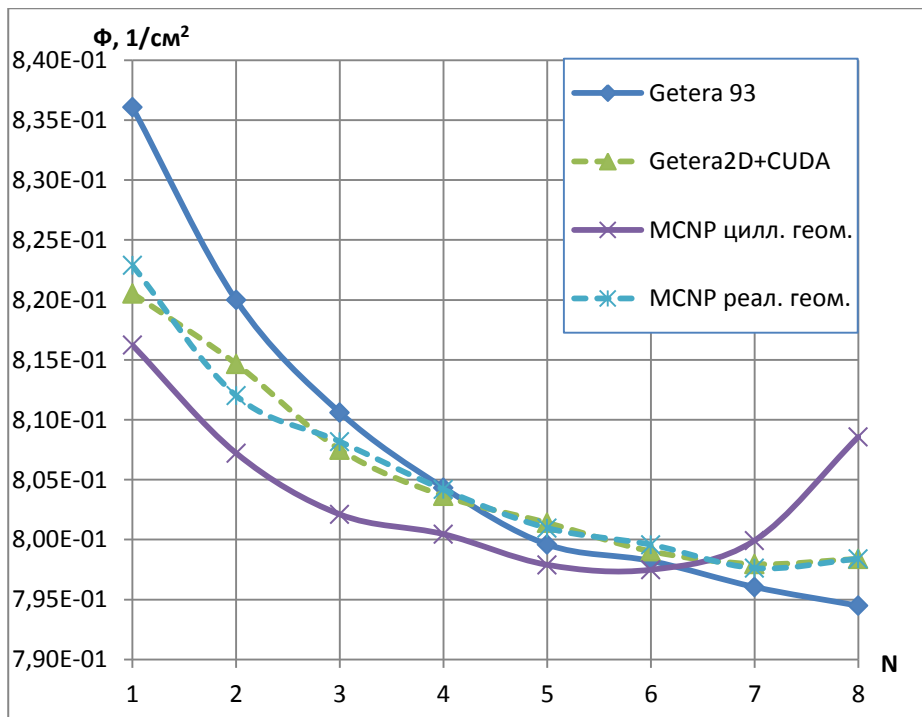


Рис. 5. График зависимости плотности потока нейтронов от номера ТВЭЛа

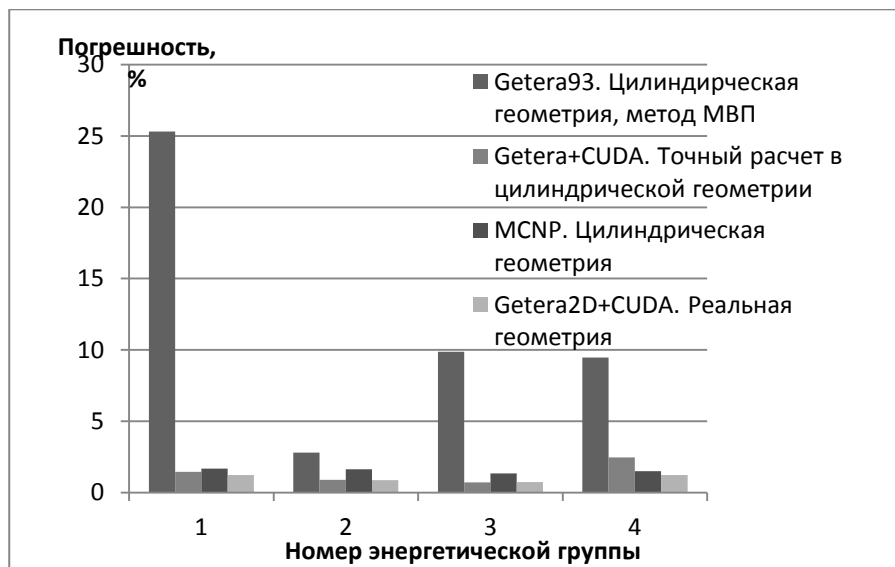


Рис. 6. Отклонение результатов расчета плотности потока нейтронов в 4-х энергетических группах от прецизионного расчета по программе MCNP

Опыт эксплуатации ПС GETERA-GPU показал, что с ростом детализации геометрии и с увеличением числа энергетических групп использование метода ВПС становится существенно менее эффективным в смысле времени счета. В этой связи был разработан модуль моделирования переноса нейтронов в геометрически сложных ячейках и полях многогрупповым методом Монте-Карло. В отличие от метода ВПС, который является методом, легко векторизуемым и удобным для реализации на GPU, при реализации метода Монте-Карло на GPU возникает ряд принципиальных сложностей:

1) между стохастической природой моделирования методом Монте-Карло и преимущественно векторной архитектурой GPU существует противоречия.

Необходимо разрабатывать такие алгоритмы, в которых параллельно выполняемые нити большую часть времени выполняют одни и те же процессорные инструкции;

2) в большинстве случаев расчеты методом Монте-Карло требуют большого количества случайных обращений к памяти для чтения различных параметров. Случайный доступ к памяти на GPU обладает крайне большой задержкой. Необходимы проблемно-ориентированные алгоритмы, позволяющие:

- компенсировать время, в течение которого одни нити получают данные вычислениями в других нитях;
- уменьшить количество случайных обращений к памяти.

Разработанный с учетом вышеприведенных требований модуль был апробирован на прецизионном бенчмарке топливной ячейки реактора РБМК-1000 (см. рис. 7), подготовленным по программе MSU. Анизотропия рассеяния нейтронов моделировалась дельта-рассеянием следующим образом:

$$F(\mu|n_0 \rightarrow n) = \begin{cases} \left[ \frac{1-\bar{\mu}(n_0 \rightarrow n)}{2} + \bar{\mu}(n_0 \rightarrow n)\delta(\mu - 1) \right], & \text{при } \bar{\mu} > 0 \\ \left[ \frac{1-|\bar{\mu}(n_0 \rightarrow n)|}{2} + |\bar{\mu}(n_0 \rightarrow n)|\delta(\mu + 1) \right], & \text{при } \bar{\mu} < 0 \end{cases}$$

где  $F(\mu|n_0 \rightarrow n)$  – функция распределения по косинусу угла рассеяния;

$\bar{\mu}(n_0 \rightarrow n)$  – средний косинус угла рассеяния зарегистрированный по программе MSU;

$\delta$  – дельта функция Дирака.

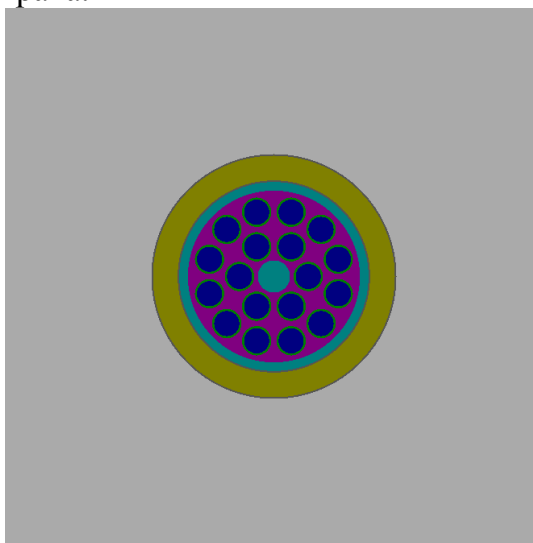


Рис. 7. Геометрия топливной ячейки РБМК-1000

На рисунках 8 и 9 представлены величины ошибок в плотности потока нейтронов с учетом и без учета анизотропии рассеяния в зависимости от номера энергетической группы. В таблице 1 представлены характерные времена счета ячейки по различным программам. Разработанный модуль расчета ячеек групповым методом Монте-Карло позволяет проводить детальный расчет за время близкое к времени расчета по приближенной модели в эквивалентной ячейке Вигнера-Зейтца. Такие времена счета позволяют использовать программу для проведения больших серий расчетов. Такие расчеты необходимы, например, при подготовке многопараметрических библиотек констант или при создании комбинированных кодов объединяющих в себе полномасштабный расчет реактора и детальный расчет отдельных его фрагментов.

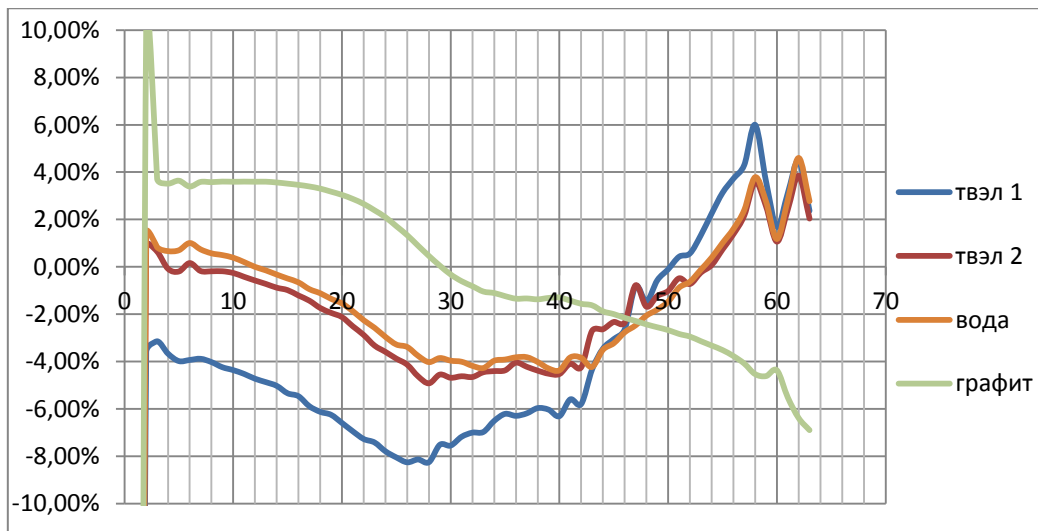


Рис. 8. График зависимости отклонения величины плотности потока нейтронов рассчитанной в модели изотропного рассеяния от рассчитанной по программе MCPU в зависимости от номера энергетической группы.  $((X-X_{MCPU})/X_{MCPU})$

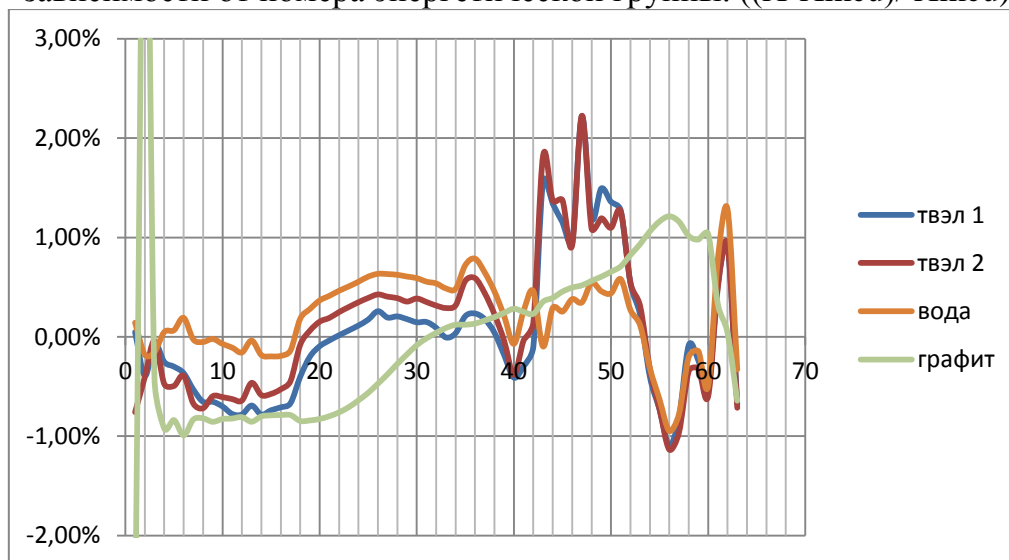


Рис. 9. График зависимости отклонения величины плотности потока нейтронов рассчитанной в модели дельта-рассеяния от рассчитанной по программе MCPU в зависимости от номера энергетической группы.  $((X-X_{MCPU})/X_{MCPU})$

Таблица 1 – Характерные времена счета ячейки по различным модификациям программы GETERA

Программа	Время счета
GETERA 93 (геометрия эквивалентной ячейки Вигнера-Зейтца)	2 сек
GETERA-GPU ВПС	20 сек
GETERA-GPU Monte-Carlo	3 сек (1,5 млн. ист./сек.)

**В третьей главе** приведено краткое описание разработанной в рамках диссертационной работы программы MNT-CUDA, результаты её тестирования и первичной верификации.

Программа предназначена для расчетов НФХ реактора групповым методом Монте-Карло с коррекцией модели по показаниям ВРД. Она ориентирована на

многопроцессорные технологии и опирается на современные вычислительные методы, использующие графические процессоры.

В результате проделанной работы MNT-CUDA позволяет:

- 1) Организовывать совместную работу с аттестованными кодами POLARIS, ТРОЙКА, БОКР. Реализованы интерфейсы для передачи констант из результатов прецизионных расчетов по программе MCU и различных многопараметрических библиотек констант.
- 2) проводить расчет переноса нейтронов следующими методами:
  - одноточечная диффузионная схема;
  - диффузионная схема с произвольным числом точек на ноду (от 1 до 64);
  - стохастическим методом решения уравнения диффузии;
  - методом прямого моделирования переноса нейтронов в квазигетерогенной системе;
- 3) регистрировать следующие функционалы:
  - эффективный коэффициент размножения;
  - доля нейтронов утечки;
  - трёхмерные распределения энерговыделения (РЭ), потоки и скорости реакций;
  - произвольные свертки РЭ, потоков и скоростей реакций;
- 4) проводить корректировку параметров расчетной модели:
  - по показаниям внутриреакторных датчиков;
  - по результатам расчета различных программных кодов.

При этом корректировка расчетной модели на показания ВРД, как при проведении детерминистических (диффузионных), так и стохастических (Метод Монте-Карло, стохастический метод решения уравнения диффузии)

Для обеспечения максимальной гибкости программы была разработана трехуровневая архитектура программы.

Для тестирования программы использовались принципиально новые бенчмарки, основанные на прецизионных расчетах полномасштабных трехмерных активных зон РБМК-1000. Использование бенчмарков такого рода позволяет увеличить набор верифицируемых функционалов в инженерных программах.

Для их подготовки, в рамках совместных договорных работ ОАО «ВНИИАЭС», НИЦ «Курчатовский институт» и ОАО «НИКИЭТ», проводились прецизионные расчеты состояний Курской, Ленинградской и Смоленской АЭС. Модель корректировалась по показаниям ВРД внесением поправок в энерговыработки ТВС. Для подготовки исходных данных для программы MCU использовался препроцессор КДМК. Для регистрации функционалов в нодах использовался разработанный в ОАО «ВНИИАЭС» специализированный регистрационный модуль USER для программы MCU5.

Тестирование программы MNT-CUDA производилось на следующих состояниях реактора РБМК-1000:

- энергоблок № 1 Смоленской АЭС на 05.02.2013;
- энергоблок № 4 Курской АЭС на 05.02.2013;
- энергоблок № 4 Ленинградской АЭС на 04.02.2013.

Проводились сравнения размножающих свойств в отдельных нодах (Keff и K0), распределения энерговыделения, потоков быстрых и тепловых нейтронов, эффекта обезвоживания контура многократной принудительной циркуляции в критике, оперативного запаса реактивности и величины подкритичности рассчитанные в различных моделях с константами зарегистрированными по MCU. Расчеты показали хорошее согласие («на уровне 1-3% СКО») результатов, полученных по методу Монте-Карло и по диффузионному методу с 64 точками на ноду с результатами по прецизионной программе MCU после проведения процедуры корректировки модели на MCU.

Кроме того проводились расчеты этих состояний с многопараметрическими библиотеками констант, подготовленными по программам MCU и MCU-FCP. При этом информация о картограмме загрузки, положениях стержней, показаниях ВРД и других параметрах бралась из фалов базы данных комплекса Энергия. Использовались те же теплогидравлические параметры и картограммы энерговыработок, что и в прецизионных бенчмарках. Это обеспечивало возможности сопоставления результатов и давало возможность тестировать различные библиотеки мало групповых констант.

В таблицах 2-3 приведены результаты сравнения.

Полученные результаты показывают хорошее согласие расчетов по MNT-CUDA и MCU.

Таблица 2 – Результаты расчета СКО\_2D (в процентах) РЭ с коррекцией на показания ВРД от расчета по MCU. Расчет проведен на константах из полномасштабного расчёта по MCU.

Энергоблок	САЭС	КАЭС	ЛАЭС
СКО НФР (без коррекции на ВРД)	8.77	7.52	5.12
СКО НФР скорректированного на ВРД	3.36	4.18	4,15
СКО НФР после призмы	1.33	1,37	1.36

Таблица 3 – Результаты расчета СКО\_2D (в процентах) РЭ с коррекцией на показания ВРД от расчета по MCU. Расчет проведен на константах из многопараметрической библиотеки gMCU.

Энергоблок	САЭС	КАЭС
СКО НФР	20,10	15,02
СКО НФР скорректированного на ВРД	7,63	5,55
СКО НФР после коррекции с помощью ПРИЗМА	1.95	1.91

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Разработаны проблемно-ориентированные методики и алгоритмы группового метода Монте-Карло, адаптированного к вычислениям на GPU и позволяющие проводить детальные полячеечные и полномасштабные расчеты реактора РБМК-1000.

2. Разработана принципиально новая методика коррекции полномасштабной расчетной модели реактора на показания ВРД в рамках метода Монте-Карло и

получены рекомендации по выбору параметров стохастической расчетной модели полномасштабного реактора РБМК-1000.

3. Разработана и внедрена в опытную эксплуатацию в ОАО «ВНИИАЭС» программа MNT-CUDA, ориентированная на расчет РБМК-1000 различными методами с использованием вычислений на GPU. Проведена ее апробация для расчета НФХ реальных энергоблоков РБМК-1000 и тестирование на новых прецизионных бенчмарк-задачах.

4. Разработаны и реализованы в новой версии программы GETERA(GETERA-GPU) новые методики и алгоритмы расчета ВПС, ориентированные на решение задач переноса нейтронов во фрагментах активной зоны со сложной геометрией на базе платформы CUDA.

### **СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**1. И.Е. Иванов, Н.В. Щукин, С.А. Бычков, В.Е. Дружинин, Д.А. Лысов, Ю.В. Шмонин // Принципиальные особенности применения метода Монте-Карло для расчета больших реакторов типа РБМК и коррекции модели по показаниям внутриреакторных датчиков // Вопросы атомной науки и техники, серия: Физика ядерных реакторов, 2013, вып. 4, стр. 17-27**

**2. А. В. Крянев, Н. В. Щукин, А. А. Дружаев, С. Г. Климанов, А. А. Семенов, Д. К. Удумян, А. Л. Черезов, К. Е. Шильников, А. Ю. Курченков, В. И. Митин, В. Е. Дружинин, С. А. Бычков, И. Е. Иванов, Д. А. Лысов // Математические методы и алгоритмы восстановления поля энерговыделения в активных зонах ядерных реакторов // Вестник национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», 2013, том 2, № 2, с. 169-175**

**3. И. Иванов, Н. Щукин, С. Бычков, И. Моисеев, В. Дружинин, Ю. Шмонин // Использование средств визуализации для анализа статистических ошибок расчета методом Монте-Карло поканальных функционалов реактора РБМК-1000 // Научная визуализация, 2012г., том 4, номер 1, квартал 1, стр. 22-30**

**4. Дружинин В.Е., Бычков С.А., Плеханов Р.В., Знаков Д.Л., Лысов Д.А., Иванов И.Е., Калугин М.А., Гомин Е.А., Гуревич М.И. // Комплекс работ по внедрению прецизионных кодов в практику эксплуатационных расчетов РБМК // Доклады восьмой международной научно-технической конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» Москва, ОАО «Концерн Росэнергоатом», 23-25 мая 2012 с 234-241.**

**5. С.А. Бычков, В.Е. Дружинин, Д.И. Знаков, И.Е. Иванов, Д.А. Лысов, И.С. Немиров, Р.В. Плеханов, Ю.В. Шмонин, Е.А. Гомин, М.И. Гуревич, М.А. Калугин, А.В. Пряничников, Е.А. Сухино-Хоменко // Внедрение прецизионных кодов в практику эксплуатационных расчетов РБМК // Атомные электрические станции России. XX лет ОАО «Концерн Росэнергоатом», М.:2012, стр. 301-314**

**6. И.Е. Иванов, Н.В. Щукин, С.А. Бычков, В.Е. Дружинин, А.Л. Черезов // Использование параллельных вычислений на графических процессорах в современных технологиях нейтронно-физических расчетов в рамках модернизации программы GETERA // Ядерная Физика и инжиниринг. 2012, Том 3, №1, стр. 188-192**



7. И.Е.Иванов, Н.В.Щукин, С.А.Бычков, В.Е.Дружинин, А.Л.Черезов. // Использование параллельных вычислений на графических процессорах в технологиях нейтронно-физических расчетов при модернизации программы GETERA // Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики / сборник докладов ежегодных межведомственных семинаров «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики (НЕЙТРОНИКА)». В 2-х томах. – Обнинск, ГНЦ РФ-ФЭИ. – 2012. – Том 1, стр. 330-336
8. И.Е. Иванов, Н.В. Щукин, С.А. Бычков, Д.А. Лысов, В.Е. Дружинин, Ю.В. Шмонин, Е.А. Родина. // Опыт использования видеопроцессоров для моделирования переноса нейтронов методом Монте-Карло в РБМК-1000 с коррекцией на показания внутриреакторных датчиков // Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики / сборник докладов ежегодных межведомственных семинаров «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики (НЕЙТРОНИКА)». В 2-х томах. – Обнинск, ГНЦ РФ-ФЭИ. – 2012. – Том 2, стр. 388-397
9. Иванов И.Е. // Применение технологии массовых параллельных вычислений на видеопроцессорах в задачах нейтронной физики". Труды Всероссийской конференции «11-я Баксанская молодежная школа экспериментальной и теоретической физики». БМШ ЭТФ – 2010. Том 2. М.: НИЯУ МИФИ, 2012.
10. И.Е. Иванов, С.А. Бычков, В.Е. Дружинин, Ю.В. Шмонин, Н.В. Щукин // Модернизированная версия программы Getera для решения задач сложной геометрии методом Монте-Карло // Научная сессия МИФИ, 2013г., Направление №1 - ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА И ЭНЕРГЕТИКА, Секция 01. ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ
11. И.А. Чернышева, И.Е. Иванов, С.А. Бычков, В.Е. Дружинин, Д.Л. Зинаков, Д.А. Лысов, Р.В. Плеханов, Ю.В. Шмонин, Н.В. Щукин // Оценка некоторых показателей топливного цикла по балансу нейтронов // Научная сессия МИФИ, 2013г., Направление №1 - ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА И ЭНЕРГЕТИКА, Секция 01. ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ
12. И.Е. Иванов. // Применение технологии массовых параллельных вычислений на видеопроцессорах в задачах нейтронной физики. // Тезисы лекций и докладов всероссийской конференции «11-я Баксанская молодежная школа экспериментальной и теоретической физики» БМШ ЭТФ – 2010. М.:МИФИ, 2010
13. И.Е. Иванов, Н.В. Щукин, С.А. Бычков. // Комбинированный метод расчета ВПС в системах со сложной геометрией на базе технологии параллельных вычислений CUDA. Модернизация программы GETERA // НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПЛАТФОРМА АТОМНОЙ ОТРАСЛИ: Материалы XVI семинара по проблемам физики реакторов. Москва, 3 – 7 сентября 2010 г. М.: НИЯУ МИФИ, 2010, стр. 142
14. И.Е. Иванов, Н.В. Щукин, С.А. Бычков. // Опыт применения технологии параллельных вычислений на графических процессорах при модернизации программного комплекса GETERA // НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПЛАТФОРМА АТОМНОЙ ОТРАСЛИ: Материалы XVI семинара по проблемам физики реакторов. Москва, 3 – 7 сентября 2010 г. М.: НИЯУ МИФИ, 2010, стр. 142
15. Иванов И.Е., Щукин Н.В., Бычков С.А. // Новая версия программного комплекса GETERA для константного обеспечения нейтронно-физического расчета ядерных реакторов // Научная сессия МИФИ-2010. Т.1 Ядерная физика и энергетика, стр. 52-53