

# СИСТЕМА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ БЕНЧМАРКОВ ДЛЯ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ ВВЭР

**И.Р. Суслов**

*ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск*



Представлено аннотационное описание системы вычислительных бенчмарков для нейтронно-физических расчетов реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 с урановым и МОХ-топливом. Ее особенностью является полная внутренняя согласованность исходных данных и расчетных моделей для всех бенчмарков. Она покрывает широкую область расчетных задач обоснования проектных характеристик ВВЭР: стационарные расчеты (ячеечные, покассетные, потвэльные), динамические расчеты (с обратными связями и без них, в нормальных и в аварийных ситуациях), расчеты выгорания и оптимизации загрузки. Система предназначена для верификации, развития программ и алгоритмов нейтронно-физических расчетов, оценок покомпонентных ошибок инженерных программ, для использования в обучении.

## ВВЕДЕНИЕ

Бенчмарки широко используются специалистами по численным методам как при работе с уже созданными программами, так и при создании новых алгоритмов и программ. Для уже готовых программ они применяются для решения следующих задач:

- верификация корректности работы программ;
- верификация корректности исходных данных, в частности, констант взаимодействия, используемых в программах;
- подтверждение, что пользователь правильно работает с программой;
- объективное сравнение различных расчетных алгоритмов.

Широко известным примером является часть документации по программе MCNP [1], включающая как вычислительные, так и экспериментальные бенчмарки для расчета переноса фотонов. В этом случае вычислительные бенчмарки являются частью общей системы бенчмарков, ориентированной, в первую очередь, на первый и третий пункты: программу и пользователя, в то время как экспериментальные бенчмарки прежде всего нужны для проверки констант и определения (подтверждения) уровня надежности совокупности вычислительных моделей и данных, которые программы могут использовать.

Второе направление использования вычислительных бенчмарков – развитие алгоритмов и программ. Они позволяют определить места, требующие улучшений

и уточнений. Развитие новых компьютерных программ для анализа ядерных реакторов требует сравнения их результатов с оцененными reference-результатами, полученными для хорошо, однозначно определенных задач. Это сравнение позволяет объективно оценить методическую, в том числе и покомпонентную погрешность проектных программ.

Говоря о роли бенчмарков стоит подчеркнуть и образовательный аспект. Их использование в обучении позволит глубже изучить важные понятия современных вычислительных методов: погрешность аппроксимации, сходимость к асимптотическому решению и другие, освоить их на практике.

Реакторы ВВЭР являются основой атомной энергетики России. Повышение требований к точности расчетов и увеличение производительности ЭВМ приводит к постепенной замене программ, основанных на упрощенных, инженерных методах, на программы, использующие математически последовательные алгоритмы. Важность вычислительных бенчмарков (наряду с экспериментальными) для реакторов ВВЭР хорошо осознается специалистами, большие усилия направлены на их создание и получение прецизионных (reference) решений, что отражено в большом количестве публикаций, представленных, прежде всего, в трудах Симпозиумов AER[2] и на ежегодных семинарах «Нейтроника» [3]. Частью представляемой системы [4] является обзор всех известных на 1996 год бенчмарков для ВВЭР, включающий 149 ссылок.

Работы по созданию системы, представленной в настоящей статье, были инициированы в 1995 году А.М. Оугуагом (А.М. Ougouag, INEEL). Автором настоящей статьи была сформулирована цель проекта как создание всестороннего взаимосвязанного набора вычислительных бенчмарков для реакторов ВВЭР. Рассмотрены задачи в основном для двух существующих типов реакторов: ВВЭР-440 и ВВЭР-1000. Охватываемый системой круг проблем очень широк. Он включает 36 различных задач для каждого из двух типов реакторов ВВЭР. Для каждого бенчмарка получено два независимых решения. Хотя система создавалась в первую очередь для нейтроники, часть задач включает теплогидравлические обратные связи, хотя и весьма упрощенные. Новая система является дополнением уже существующих нейтронно-физических бенчмарков для ВВЭР, в частности, бенчмарков AER.

Бенчмарки представляемой системы являются реалистичной моделью для ожидаемого поведения расчетных программ (зависимость от шага сетки, параметров итерационных процессов и других вычислительных параметров) для рассматриваемых реакторов, хотя и используют несколько огрубленные по сравнению с реальными модели и данные. Получаемые с их помощью численные результаты соответствуют физическим и вычислительным тенденциям, известным для реакторов ВВЭР. Они являются представительными для оценки методической точности расчетных программ в том смысле, что не завышают и не занижают методическую погрешность, в отличие от ряда других математических тестов, моделирующих заведомо более жесткие расчетные условия, чем требуется в реальных расчетах и поэтому дающих преувеличенное представление о погрешностях инженерных программ.

Содержание системы было совместно определено А.М. Оугуагом из INEEL и основными исполнителями проекта с российской стороны под руководством И.Р. Суслова. Бенчмарки созданы различными членами российской команды. Все они и полученные для них решения прошли экспертизу в INEEL.

Система бенчмарков является результатом коллективных усилий десяти специалистов из пяти российских организаций, вовлеченных в исследования, развитие и проектирование существующих и будущих реакторов ВВЭР. И.Р. Суслов, О.Г. Ком-

лев, В.А. Пивоваров, Е.В. Долгов, Д.М. Бабанак (ФЭИ), Е.А. Гомин, П.А. Болобов (КИ), О.Ю. Кавун (Атомэнергoproект), А.И. Попыкин (НТЦ ГАН), А.В. Марков (ВНИ-ИАЭС) участвовали в различных этапах проекта. В работе приняли участие специалисты как по численным методам, так и по проектным расчетам. Это позволило создать бенчмарки, которые объединяют строгие математические формулировки с реалистичными физическими и вычислительными характеристиками. Результаты работы доступны в виде совместного отчета INEEL и ФЭИ на CD[4] были широко представлены на семинарах «Нейтроника»[3], на Симпозиумах AER[2], на международной конференции M&C-99 [5 ].

#### **ЧЕТЫРЕ ЭТАПА СОЗДАНИЯ БЕНЧМАРКОВ**

Созданная система в целом соответствует стилю набора бенчмарков Американского ядерного общества, представленного в известном отчете [6] Аргоннской национальной лаборатории. Создание каждого из бенчмарков системы следовало четырем последовательным этапам.

На этапе 1 формулировалась исходная ситуация (Benchmark Source Situation, BSS). Каждый вычислительный бенчмарк основан на реалистичной ситуации, обычно нормальном режиме эксплуатации рассматриваемого реактора. На этом этапе собирались все необходимые данные, описывающие реактор. На основе полученной информации определялась идеализированная модель, описываемая упрощенным набором данных.

На этом этапе для моделей, соответствующих урановой загрузке, по существующим проектным программам получалось решение (Design Level Solution, DLS), по которому проверялась корректность данных и их интерпретации, физическая правдоподобность и представительность BSS. Когда это представлялось возможным, выполнялись сравнения с экспериментальными результатами. Хотя последние не являются частью системы бенчмарков, было продемонстрировано, что для всех BSS, включенных в систему, DLS полученные по инженерным программам воспроизводят экспериментальные величины с хорошей точностью.

На этапе 2 формулировались расчетные задачи (Benchmark Problem, BP). Формулировка задач, описывающих исследуемые феномены, выполнялась систематически, начиная с соответствующего описания BSS. На этапе BP подключались математически последовательные программы. В некоторых случаях для получения приемлемого качества BP требовалась небольшая корректировка макроконстант. Каждое определение BP включает описание изменений или дополнительных предположений по отношению к исходной ситуации, если это необходимо, и список обязательных и дополнительных расчетных величин, которые требуется получить при решении BP.

На этапе 3 вычислялись решения с разумной точностью (Reasonable Accuracy Solutions, RAcS). По ряду причин прямое, математически последовательное сравнение результатов инженерных, производственных программ с результатами других программ практически невозможно. Чтобы обеспечить сравнимость и воспроизводимость результатов, необходимую для развития новых усовершенствованных программ, нужно получить более точное reference-решение, однако это требует больших затрат. Практика создания и использования бенчмарков показала, что удобно дополнительно ввести отдельный этап – получение решений BP «с разумной точностью», RAcS, которые в отличие от решений по инженерным программам DLS, основаны на математически строгой формулировке BP и одновременно не требуют вычислений на очень мелких сетках и больших вычислительных затрат как reference-решения. Они позволяют оценить точность математически последо-

вательных программ в «нормальных условиях», таких как «стандартный», как правило, достаточно грубый шаг сетки и стандартные критерии сходимости. Для представляемой системы бенчмарков были получены два независимых решения RAcS для каждой сформулированной ВР. Они были использованы, чтобы проверить достоверность ВР, и физическую и вычислительную правдоподобность сформулированных задач на уровне ВР.

На этапе 4 вычислялись reference-решения (Reference Solution – RefS). Последовательная математическая формулировка ВР делает возможной получение reference-решений (RefS) с произвольно высокой методической точностью. Решения с методической точностью на один-два порядка выше, чем требуется в проектных расчетах, в высшей степени желательны и должны быть (завершающей) частью полного набора бенчмарков. Такие решения могут быть получены, например, с помощью экстраполяции результатов на бесконечно малый шаг сетки. RefS играют роль, подобную аналитическим решениям. Хотя для получения их требуются большие вычислительные затраты, reference-решения чрезвычайно полезны для дальнейшего развития быстрых и эффективных компьютерных программ.

### **ОБЗОР СОЗДАННЫХ БЕНЧМАРКОВ**

Список созданных бенчмарков представлен в таблице. Бенчмарки покрывают основные области физики реакторов ВВЭР. Это – реактор в стационарном состоянии, гомогенизация ТВС и подготовка макроконстант для покассетных и потвэльных диффузионных расчетов, расчет выгорания и нестационарные процессы в реакторе. Все бенчмарки подготовлены для двух типов реакторов и двух типов топлива: для ВВЭР-1000 и ВВЭР-440 с урановой загрузкой и для ВВЭР-1000 и ВВЭР – 640 с МОХ-загрузкой.

Исходные ситуации (BSS) для реакторов с урановой загрузкой были созданы на основе описания реакторов ВВЭР в документе МАГАТЭ [7]. Бенчмарки, описывающие реакторы с МОХ-топливом были приготовлены на основе предварительных расчетных исследований, и носят абстрактный характер, информация в них ограничена макроконстантами и расчетной геометрией. Все значительные нейтронно-физические свойства были сохранены и отражены в бенчмарках. Это подтверждено сравнением численных расчетов улучшенных кодов на основе данных ВР с результатами стандартных инженерных расчетов на основе собранной для бенчмарков информации до упрощения исходной информации в BSS.

В частности, разница в эффективном коэффициенте размножения около 0.5%, различия в распределении мощности в реакторе – порядка 3–5% для стационарных задач и порядка 20% для нестационарных задач. Более подробная информация представлена в [4].

### **Отличительные черты созданной системы бенчмарков**

1. Созданные бенчмарки образуют набор взаимосвязанных тестовых задач, т.е. систему бенчмарков. Слово «система» в данном случае использовано только для подчеркивания взаимосвязанности по данным и не несет значения «системы» в смысле компьютерной оболочки, автоматизации средств доступа и т.п.

2. Все бенчмарки, относящиеся к одному реактору, используют общие геометрические (расположение топлива) данные и макроконстанты. Для каждого типа активной зоны рассмотрены только два состояния АЗ – начальная загрузка (FC, fresh core) и равновесная зона (EC, equilibrium core). Соответственно во всем наборе задач (для каждого типа АЗ) использованы только три набора сечений – два для зоны на полной мощности (H, hot) и один (начальная загрузка ВВЭР-440 и

Таблица

**Список наборов бенчмарков для реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000**

БЕНЧМАРКИ ДЛЯ СТАЦИОНАРНЫХ РАСЧЕТОВ АКТИВНОЙ ЗОНЫ
<p>Урановое топливо:</p> <p>Стационарный покассетный расчет активной зоны: начальная загрузка</p> <p>Стационарный потвзльный расчет активной зоны : начальная загрузка</p> <p>Стационарный покассетный расчет активной зоны : равновесное состояние</p> <p>Стационарный потвзльный расчет активной зоны : равновесное состояние</p> <p>МОХ – топливо:</p> <p>Стационарный покассетный расчет активной зоны: начальная загрузка</p> <p>Стационарный потвзльный расчет активной зоны : начальная загрузка</p> <p>Стационарный покассетный расчет активной зоны : равновесное состояние</p> <p>Стационарный потвзльный расчет активной зоны : равновесное состояние</p>
БЕНЧМАРКИ ДЛЯ ГОМОГЕНИЗАЦИИ
<p>Бенчмарк для гомогенизации кассеты со свежим урановым топливом</p> <p>Бенчмарк для гомогенизации кассеты с урановым топливом после одной микрокампании</p> <p>Бенчмарк для гомогенизации кассеты с урановым топливом после двух микрокампаний</p> <p>Бенчмарк для гомогенизации кассеты со свежим МОХ топливом</p> <p>Бенчмарк для гомогенизации кассеты с МОХ топливом после одной микрокампании</p> <p>Бенчмарк для гомогенизации кассеты с МОХ топливом после двух микрокампаний</p>
БЕНЧМАРКИ ДЛЯ ВЫГОРАНИЯ
<p>Бенчмарк для расчета выгорания первых двух микрокампаний для реактора с урановым топливом</p> <p>Бенчмарк для расчета равновесной микрокампании для реактора с МОХ топливом.</p> <p>Бенчмарк для расчета оптимизации перегрузки</p> <p>Бенчмарк для расчета выгорания в кассете реактора VVER-440 (со сравнением с экспериментальными данными)</p>
КИНЕТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ БЕНЧМАРКИ (ТОЛЬКО ДЛЯ УРАНОВОГО ТОПЛИВА)
<p>Кинетический бенчмарк 1: Ступенчатый ввод стержней СУЗ</p> <p>Кинетический бенчмарк 2: Ступенчатый вывод стержней СУЗ</p> <p>Кинетический бенчмарк 3: Непрерывный ввод стержней СУЗ</p> <p>Кинетический бенчмарк 4: Непрерывный вывод стержней СУЗ</p> <p>Кинетический бенчмарк 5: Ступенчатый вывод реактора на мощность</p> <p>Кинетический бенчмарк 6: Непрерывный вывод реактора на мощность</p> <p>Кинетический бенчмарк 7: Ступенчатый ввод стержней СУЗ с учетом обратных связей</p> <p>Кинетический бенчмарк 8: Ступенчатый вывод стержней СУЗ с учетом обратных связей</p> <p>Кинетический бенчмарк 9: Непрерывный ввод стержней СУЗ с учетом обратных связей</p> <p>Кинетический бенчмарк 10: Непрерывный вывод стержней СУЗ с учетом обратных связей</p> <p>Кинетический бенчмарк 11: Ступенчатый вывод реактора на мощность с обратными связями</p> <p>Кинетический бенчмарк 12: Непрерывный вывод реактора на мощность с обратными связями</p> <p>Кинетический бенчмарк 13: Впрыск борной кислоты без обратных связей</p> <p>Кинетический бенчмарк 14: Впрыск борной кислоты с учетом обратных связей</p> <p>Кинетический бенчмарк 15: Разрыв трубопровода парогенератора</p> <p>Кинетический бенчмарк 16: Потеря давления без срабатывания аварийной защиты</p> <p>Кинетический бенчмарк 17: Отключение ГЦН срабатывания аварийной защиты</p> <p>Кинетический бенчмарк 18: Впрыск неборированной воды</p>

равновесная загрузка ВВЭР-1000) для «холодной» зоны, находящейся на мощности 10% от номинала. Эти три набора макроконстант используются во всем наборе статических и динамических бенчмарков для данной АЗ.

3. Во всех задачах отражатель включен в геометрическое описание.

4. Созданы микроскопические данные для использования в бенчмарках для выгорания.

5. Созданы пространственно-зависимые сечения, адекватно моделирующие изменение физических свойств по высоте для всех соответствующих бенчмарков.

6. Строго математически сформулированы бенчмарки для пространственно-зависимой кинетики с трехмерными пространственно распределенными обратными связями по температуре и плотностью теплоносителя, температуре топлива, концентрации борной кислоты.

7. Математически строго сформулированы бенчмарки по оптимизации загрузки активной зоны и найдены их точные решения.

### **БЕНЧМАРКИ ДЛЯ СТАЦИОНАРНЫХ РАСЧЕТОВ АКТИВНОЙ ЗОНЫ**

Бенчмарки этого раздела представляют собой решение задач на  $k_{eff}$  с вакуумными граничными условиями для двухгрупповых уравнений диффузии без рассеяния вверх. Для «равновесной» активной зоны сечения зависят от высоты. Для потвальных расчетов геометрия кассеты включает как регулярную гексагональную структуру для твэлов, так и нерегулярную (пятиугольники на периферии ТВС). В качестве основных результатов рассматриваются  $k_{eff}$  и распределение мощности в кассетах.

Раздел содержит 18 бенчмарков. Восемь в трехмерной геометрии были созданы для верификации программ и методов для стационарного расчета активной зоны. Восемь для потвального расчета и два для «свежей» загрузки были сформулированы только в двумерной геометрии. Бенчмарки в двумерной геометрии дают дополнительные возможности верификации методов либо в отдельных задачах, когда 2D-геометрия дает приемлемые результаты, либо когда требуется очень высокая точность reference-решения.

Решения для двумерной и трехмерной геометрии были получены с помощью программ HEXZ и MAG. Решения по программе HEXZ рассматриваются как RAcS, а решения по программе MAG – как reference-решения. Последние были получены с помощью усаживания сетки и представляют собой асимптотические решения, т.е. решения при стремлении шага сетки к нулю. Для потвальных бенчмарков RAcS были получены с использованием программ MAG и PERMAK. Для всех бенчмарков данного раздела два независимых решения находятся в очень хорошем согласии,  $k_{eff}$  отличается менее чем на 0.1%, покассетные энерговыделения менее чем на 1%, потвальные распределения имеют различия порядка 1%.

### **БЕНЧМАРКИ ДЛЯ ГОМОГЕНИЗАЦИИ**

Бенчмарки этого раздела являются задачами на  $k_{eff}$  в двумерной шестигранной кассете с условиями отражения на границе. Исходными данными являются описание геометрии кассеты и ядерные плотности. Раздел состоит из двенадцати бенчмарков, соответствующих трем состояниям по выгоранию (свежему топливу, топливу после одной и двух микрокампаний). В качестве ожидаемых результатов требуются  $k_{eff}$ , гомогенизированные сечения для диффузионного расчета и потвальные мощности. Концентрации для топлива после одной и двух микрокампаний были получены с помощью программы WIMS для 300 и 600 эфф. сут. Решения, полученные с помощью программ MCU (RefS) и WIMS (RAcS) хорошо согласуются между собой.

### **БЕНЧМАРКИ ДЛЯ РАСЧЕТА КАМПАНИИ РЕАКТОРА**

Бенчмарки этой секции были созданы для верификации методов и алгоритмов при расчете выгорания. Они включают задачи для выгорания активной зоны, выгорания в отдельной сборке и оптимизации загрузки.



Четыре бенчмарка для выгорания в активной зоне были созданы по аналогии с задачей BSS-19 из работы [6]. Реактор описывается двухгрупповыми уравнениями диффузии в двумерной гексагональной геометрии. Макроскопические сечения для каждого момента времени получаются из уравнений выгорания, коэффициенты которых вычисляются на основе пространственных распределений ядерных концентраций и микроскопических сечений делящихся материалов, ксенона, бора и выгорающих поглотителей. Микроскопические сечения делящихся изотопов либо не зависят от времени, либо зависят линейно от выгорания. Критическое состояние активной зоны получается подбором критической концентрации раствора борной кислоты, измеренной в ppm. Концентрация ксенона – равновесная. Длина микрокампании определяется требованием равенства нулю концентрации борной кислоты в конце топливного цикла. Два реальных начальных цикла использованы при формулировке задач для уранового топлива. Для MOX-топлива рассмотрена задача нахождения равновесного топливного цикла.

В качестве требуемых результатов рассматриваются:

- концентрации борной кислоты, обеспечивающие критичность;
- распределение покассетных мощностей в начале и конце микрокампаний;
- средние покассетные выгорания в конце микрокампаний;
- средние для типов кассет ядерные концентрации в конце микрокампаний;
- длина микрокампаний в эффективных сутках;
- критические концентрации бора и мощности кассет для реактора без ксенона с введенными СУЗ в начале первого и второго циклов;
- эффекты реактивности для реактора без ксенона с введенными СУЗ в конце микрокампаний.

Два независимых «стандартных» решения, полученные по программам MAG и HEXZ, согласуются с приемлемой точностью.

Для бенчмарка выгорания в кассете ВВЭР-440 есть сравнение с экспериментальными данными. Результаты расчетов ядерных концентраций как функция выгорания сравниваются с результатами радиохимического анализа. Ядерные концентрации рассматриваются как основные ожидаемые результаты. Решения задачи получены по программам WIMS и TRIFON.

Два бенчмарка для ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 с урановым топливом были созданы для оптимизации перестановки ТВС. Каждый включает две оптимизационные задачи. В первой требуется найти 10 лучших загрузок (расстановок ТВС) обеспечивающих минимальные значения коэффициента неравномерности в начале второго топливного цикла при ограничении на запас реактивности (величину  $k_{eff}$ ). Во второй требуется найти 10 лучших загрузок с максимальным  $k_{eff}$  при ограничении, что коэффициент неравномерности в начале топливного цикла не превосходит 1.45. Рассматриваются задачи частичной оптимизации, т.е. позиции некоторых (свежих) ТВС заданы. Благодаря этому общее количество возможных вариантов около 15000, что позволяет применить прямой перебор всех вариантов для получения точного решения. Исходные данные были взяты из вышеописанных бенчмарков для расчета выгорания в активных зонах.

Получены два независимых решения. Для решения двухгрупповой нейтронной задачи использовалась программа MAG. «Точное» решение было получено прямым перебором, альтернативное – с помощью одной из версий генетического алгоритма.

**БЕНЧМАРКИ ДЛЯ КИНЕТИКИ И ДИНАМИКИ**

Двенадцать бенчмарков были созданы для трехмерных задач пространственной кинетики без обратных связей. В них решается двухгрупповое нестационарное уравнение диффузии с заданной зависимостью макросечений от времени и с шестью группами запаздывающих нейтронов. Геометрия задач соответствует использованной в стационарных бенчмарках. Макросечения подготовлены для «холодной» зоны (10% мощности). Нестационарные процессы инициируются движением СУЗ. Рассмотрены два варианта движения СУЗ – мгновенное и движение с конечной скоростью.

Два независимых решения получены по программам REINBOW и MAG. Большая часть полученных решений должна рассматриваться как «стандартные», RAcS. Однако для одной из задач решение, полученной по программе MAG с учащением пространственной и временной сеток может рассматриваться как RefS, reference-решение с точностью порядка 1%.

Еще двенадцать бенчмарков были созданы для верификации алгоритмов и программ решения трехмерной пространственной кинетики с обратными теплогидравлическими связями. Геометрия та же, что и в предыдущих задачах. Задана линейная зависимость макросечений от теплогидравлических параметров, а, именно от квадратного корня из температуры топлива, температуры теплоносителя и плотности теплоносителя.

Система бенчмарков ориентирована на нейтронику и не предполагает использования реальных теплофизических программ и данных. Для температуры топлива  $T_f$  и теплоносителя  $T_c$  в каждой точке активной зоны заданы два дифференциальных уравнения

$$\begin{aligned} C_f \frac{\partial T_f(r,t)}{\partial t} &= \gamma_f Q(r,t) - \alpha(T_f)(T_f(r,t) - T_c(r,t)), \\ C_c \left( \frac{\partial T_c(r,t)}{\partial t} + v \frac{\partial T_c(r,t)}{\partial z} \right) &= \gamma_c Q(r,t) + \alpha(T_f)(T_f(r,t) - T_c(r,t)), \\ \alpha(T_f) &= \frac{1}{\alpha_1 T_f + \alpha_0} \end{aligned}$$

с заданными теплофизическими константами  $\gamma_f, \gamma_c, C_f, C_c, \alpha_0, \alpha_1$  и скорость движения теплоносителя  $v$ , которые могут рассматриваться и решаться чисто формально, хотя константы и подобраны так, что физика процессов сохраняется.

Нестационарные процессы инициируются движением СУЗ. Рассмотрены два варианта движения СУЗ – мгновенное и движение с конечной скоростью. Предполагается критичность активной зоны в начальный момент времени  $t=0$ . Таким образом, для получения начального распределения нейтронов и параметров кинетики необходимо решить связанные уравнения для нейтронов и теплогидравлических связей. В качестве обязательных рассматриваются следующие результаты:

- эффективный коэффициент размножения в момент  $t=0$ ;
- полная нейтронная мощность от времени;
- нормализованное поаксетное распределение мощности в заданные моменты времени;
- пространственное распределение температур топлива и теплоносителя в заданные моменты времени.

Два независимых «стандартных» решения получены по программам REINBOW и MAG.

Наконец, восемнадцать бенчмарков были созданы для переходных процессов,



инициированных событиями вне активной зоны. Этот тип проблем характеризуется численными свойствами, существенно отличающимися от задач с движением СУЗ. Решаемые уравнения подобны описанным ранее для движения СУЗ с обратными связями, но дополнительно к предыдущему, макросечения линейно зависят от концентрации бора в борной кислоте. Плотность борной кислоты на нижней границе активной зоны задается функцией от времени. Два независимых «стандартных» решения получены по программам REINBOW и MAG и согласуются в пределах 20%.

### ОБЗОР ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ПРОГРАММ

В настоящем разделе кратко описываются программы, использованные при создании системы. Большая часть результатов получена с помощью программы **MAG** [8-10]. Программа использовалась для покассетных и потвэльных расчетов активной зоны и для нестационарных задач на шагах BP и RefS. Используется конечно-разностная сетка с узлами в центрах ячеек для (D,z)-геометрии. Для получения RAcS использовалась сетка с шестью узлами на кассету и 12 – 20 слоев по высоте. Для RefS количество узлов в плоскости систематически увеличивалось до 3625 треугольников на кассету в двумерных расчетах и до 294 для трехмерных. Максимальное количество расчетных слоев в Z-направлении – 112. Для потвэльных бенчмарков использовалась конечно-разностная схема с одним узлом на твэл. Для аппроксимации по времени использовалась неявная схема.

Кроме этого, на отдельных этапах использовались следующие программы.

**BIPR-7** [11]. Основная программ для покассетных расчетов реакторов ВВЭР с урановым топливом. Программа использовалась только на уровне исходных ситуаций (BSS).

**PERMAK** [12]. Основная программа для потвэльных расчетов реакторов ВВЭР. Программа использовалась для получения «стандартных» решений.

**WIMS4D** [13]. Широко известная программа для расчета ячеек реакторов разных типов.

**RAINBOW** [14]. Основная программа для моделирования переходных процессов в реакторах ВВЭР.

**HEXZ** [15]. По этой программе были получены RAcS решений на шаге BP. Программа использует аналитический нодальный метод.

**MCU** [16]. Программа, основанная на методе Монте-Карло, была использована для бенчмарков по гомогенизации.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создана согласованная система взаимосвязанных математических бенчмарков для широкого круга нейтронно-физических расчетов ВВЭР. Для каждой задачи получено два независимых решения. Эти решения хорошо согласуются с результатами расчетов по аттестованным программам. Система доступна на CD и представлена в трудах научных конференций [2–4,17].

Вследствие реалистичности, в частности, учета пространственной зависимости макрокоэффициентов, описание бенчмарков даже с минимальной степенью детальности требует нескольких страниц текста и не может быть приведено в настоящей статье, носящей обзорный, аннотационный характер. Общий объем информации в системе бенчмарков [4] – более 3000 стр. Автор планирует в дальнейшем подготовить серию статей с более подробной информацией по каждому из разделов системы.

В качестве направлений дальнейшей работы видится: получение прецизионных решений, создание дополнительных бенчмарков, создание интеллектуального

интерфейса для системы, т.е. системы в программном смысле, а не только в смысле связи по данным. Имеется положительный опыт использования бенчмарков системы не только для уравнения диффузии, но и для уравнения переноса, в частности, такого важного и актуального вопроса, как анализ методических вопросов точности расчета реакторов ВВЭР по методу Монте-Карло [18]

Важным возможным продолжением работы представляется создание системы для обучения нейтронно-физическим расчетам ВВЭР на основе представленной системы бенчмарков. Участие в получении прецизионных решений позволит улучшить понимание методической точности программ,

## ЛИТЕРАТУРА

1. Whalen D.J., Hollowell D.E., Hendricks J.S. MCNP: Photon Benchmark Problems, LA-12196, 1991.
2. www.kfki.hu.
3. www.neutronika.ru.
4. Ougouagh A.M., Suslov I.R., Komlev O.G. VVER Neutronics Benchmarks, INEEL/EXT-99-00818, IPPE, 1999.
5. Suslov I.R., Komlev O.G., Ougouagh A.M. A System of Neutronics Computational Benchmarks for VVER Reactors/Proc. of Int. Conf. Mathematics and Computations, Reactor Physics and Environmental Analysis in Nuclear Applications (M&C-99) (Madrid, September 27-30, 1999).
6. Argonne Code Center: Benchmark Problem Book, ANL-7416, 1968, rev. 1972, 1977, 1985.
7. In-Core Fuel Management Code Package Validation for WWERs, IAEA-TECDOC-847, Nov. 1995.
8. Suslov I.R. et al. MAG – The Code for Fine Mesh VVER Calculations/Proc. of 6<sup>th</sup> Symposium AER, 1996.
9. Suslov I.R. et al. MAG – Code for VVER Neutronics Calculations/Сборник трудов семинара «Нейтроника-1997». – Обнинск, 1998. – С. 104.
10. Комлев О.Г., Суслов И.Р. Сравнительный анализ эффективности нодального метода для задач расчета критического состояния реактора ВВЭР/Сборник трудов семинара «Нейтроника-1997». – Обнинск, 1998. – С. 122.
11. Новиков А.Н. и др. Пакет программ для анализа активной зоны ВВЭР и некоторые аспекты улучшения топливного цикла//ВАНТ. Сер.: «Физика ядерных реакторов». – 1992. – Т. 1. – РИЦКИ, 7.
12. Лизоркин М.П. и др. Программа ПЕРМАК. Описание алгоритма и инструкция по применению. Отчет библиотеки программ ВМК, София, Болгария, 1985.
13. Halsall M.J. A Neutronics Code for Standard Lattice Physics Analysis, AEEW-R 2113, 1986.
14. Программный комплекс RADUGA для моделирования переходных и аварийных режимов в реакторных установках водо-водяного типа. Описание математической модели нейтронно-физического модуля. – М.: АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ, 1996.
15. Komlev O.G. Group Theory Nodal Method for the Diffusion Equation in 3-D Hexagonal Geometry/Proc. of Int. Conf. PHYSOR'96, 1996, A-60.
16. Юдкевич М.С. Программа MCURFFI для расчета методом Монте-Карло нейтронно-физических характеристик ядерных реакторов. Библиотека ядерных данных DLC/MCUDAT/Препринт ИАЭ5991/5. – М., 1996.
17. Кавун О.Ю., Суслов И.Р., Попыкин А.И. Разработка системы кинетических тестов для реакторов ВВЭР-1000 и ВВЭР-440/Сборник трудов семинара «Нейтроника-1998». – Обнинск, 1999. – С. 72.
18. Suslov I.R., Mel'nikov K.G. WWER Benchmarking – Characteristics vs. Monte-Carlo. P.129 Book of Abstracts Int. Conf on Transport Theory (ICTT-20) (July 22-28, 2007, Obninsk).

Поступила в редакцию 03.03.2008

**УДК 621.039.51**

*The Hardware-Software Complex for Measurements of Neutron-Physical Characteristics During First Criticality and Power Start-up of the Kalinin NPP Third Unit* \V. Lititsky, B. Kutin, V. Parshutin; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yademaya energetica» (Communications of Hight Schools. Nuclear power engineering). – Obninsk, 2008. – 6 pages, 4 illustrations.

This article describes the complex of hardware and software instruments for measurements of neutron-physical characteristics during first criticality, power start-up and operation of the Kalinin NPP third unit.

**УДК 621.039.54**

*System of Numerical Benchmarks for VVER Neutronics* \I.R. Suslov; Editorial board of journal «Izvestia vusshikh uchebnikh zavedeniy. Yademaya energetica» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2008. – 10 pages, 1 table. – References – 18 titles.

A system of computational neutronic benchmarks has been developed over the last four years. This system is intended to complement the Atomic Energy Research (AER) benchmarks. This paper presents a summary of the development and a brief description of the benchmarks. The set is primarily comprised of interrelated benchmarks that share situation descriptions and data. The system covers the VVER 440 and VVER 1000 reactors extensively, and in a few cases the newer VVER 640 reactor design. Benchmarks within the system address the static, dynamic (with and without feedback), fuel depletion and fuel loading optimization, and normal as well as accident situations.

**УДК 621.039.5**

*Optimization Tasks of Non-Hermetic Fuel Assemblies Extraction in RBMK Nuclear Reactor* \A.M. Zagrebayev, N.V. Ovsyannikova, A.E. Rechkiman; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yademaya energetica» (Communications of Hight Schools. Nuclear power engineering). – Obninsk, 2008. – 9 pages, 3 illustrations. – References – 5 titles.

The possibility of optimization of non-hermetic fuel assemblies schedule in a nuclear reactor at different criteria and restrictions is considered. The solution of optimization tasks with maximum permissible emission limit and under penalty is given.

**УДК 621.039.51**

*Model of VVER -1000 Reactor for Training Course* \ V.I. Belozarov, V.V. Sergeev, A.A. Kazantsev, A.N. Pozdnyakov, M.Yu. Kanyshv; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yademaya energetica» (Communications of Hight Schools. Nuclear power engineering). – Obninsk, 2008. – 8 pages, 3 illustrations. – References – 3 titles.

Because of absence of professors in the locations of NPP some of functions of training and maintenance of qualification can be performed by means of computer training courses.

The developed didactic model of reactor VVER -1000 enables one to perform the comparative analysis of transient operation mode and for some emergency processes also in dependence both from an initial condition (the period of campaign, position of control rods, power level, previous history of power and so on), and from composition of core itself. Based upon of transient completely non-equilibrium thermal-hydraulic code from 6 conservation equations and neutron-physical model the model of reactor VVER -1000 is developed for a training course.

The scope of simulation was chosen as optimum for the given task. Unlike a program of creating the models for NPP simulator, the model was performed with higher accuracy, but with smaller volume of the main equipment, than in full-scale simulators, that essentially improves understanding of physics.

**УДК 321.039.531: 620.193**

*Inside Cladding Corrosion of Stainless Steel in Reactor Conditions* \ E. Kinev; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yademaya energetica» (Communications of Hight Schools. Nuclear power engineering). – Obninsk, 2008. – 7 pages, 5 illustrations. – References – 2 titles.

Fuel cladding corrosion of annealed 0.08C 16Cr15Ni3MoNb stainless steel, .08C16Cr15Ni3MoNb cold-worked (CW), 0.06C16Cr15Ni3MoNb CWsteel, 0.06C16Cr15Ni2Mo2MnTiVB CWsteel, and