

## **Проведение связанных расчетов тестовой задачи PWR 3x3 Pin Cluster с помощью кодов MCU-FREE и HYDRA-IBRAE**

*Д.А. Колташев*

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук

### **1. Постановка задачи**

В настоящее время при решении задач ядерной безопасности все большую актуальность приобретает применение связанных кодов “нейтроника–теплогидравлика/термомеханика”. Задачей повышения эффективности связанных расчетов занимаются специалисты во многих ведущих лабораториях мира.

Цель данной работы заключается в отработке технологии связанных расчетов “нейтроника – теплогидравлика” с использованием кодов MCU-FREE и HYDRA-IBRAE на базе тестовой задачи PWR 3x3 Pin Cluster [1]. Нейтронно-физический код MCU-FREE [2], базирующийся на методах Монте-Карло и теплогидравлический код HYDRA-IBRAE [3], разрабатываются в НИЦ «Курчатовский институт» и ИБРАЭ РАН, соответственно.

Использование в расчетах систем с водяным теплоносителем объясняется наработанным мировым опытом использования Монте-Карло кодов при проведении связанных расчетов для реакторных систем типа LWR, PWR и т.д. и накопленной в нашей стране базой расчетных и экспериментальных данных по эксплуатации реакторов типа ВВЭР. Отработанная на базе систем с водяным теплоносителем методика проведения связанных расчетов может применяться в дальнейшем и при расчете перспективных систем с натриевым и свинцовым теплоносителями.

Основная тенденция в проведении связанных расчетов заключается в использовании широко распространенных и хорошо зарекомендовавших себя нейтронно-физических и теплогидравлических кодов, что позволяет исключить из рассмотрения вопросы, связанные с надежностью используемых кодов и сосредоточить внимание на построение согласованной модели.

### **2. Особенности Монте-Карло кодов**

Коды Монте-Карло ориентированы на точное задание 3D геометрии и материальных композиций без гомогенизации и дополнительных упрощений, что позволяет осуществлять моделирование, максимально приближенное к реальным экспериментам, при отсутствии или недостатке экспериментальных данных. Применение Монте-Карло кодов в связанных расчетах обусловлено, в первую очередь, необходимостью расчета нейтронно-физических характеристик в малых локальных областях (по сравнению с традиционно используемыми в детерминистических кодах) систем с сильной гетерогенностью.

Одной из ключевых задач при использовании Монте-Карло кодов является определение расчетных параметров, обеспечивающих устойчивость и корректность результатов расчета [4]. Традиционно проведение расчетов на критичность методом поколений направлено на получение корректного значения Кэф. При этом во многих работах показано влияние различных расчетных параметров (статистические, геометрические, параметры регистрации) на устойчивость и корректность потоков нейтронов и их функционалов.

В связанных расчетах обеспечение корректности и устойчивости потока нейтронов и соответствующих функционалов приобретает особую важность, обуславливая необходимость исследования сходимости нейтронного потока. Из-за отсутствия универсальных методов решение данной проблемы зависит от конкретной решаемой задачи.

### **3. Описание расчетной модели**

Отработка методики связанных расчетов осуществляется на базе ячеечных расчетов. Использование ячеечных расчетов позволяет исследовать особенности кодов, изучить их

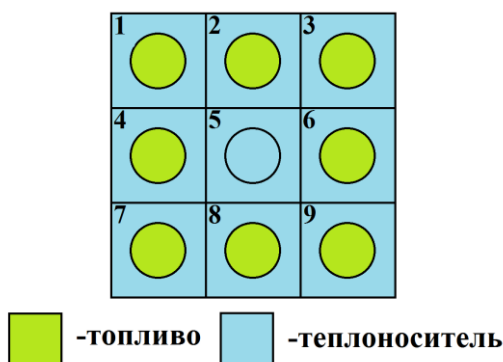
чувствительность на изменение геометрических, статистических и температурных параметров, а также определить расчетные параметры, обеспечивающие корректность результатов.

Рассматриваемая расчетная модель, представленная в ряде работ [1,5,6], использовалась для отработки технологии связанных расчетов с применением кодов MCNP5/SUBCHANFLOW, MCNP5/STAR-CD и MCNP6/CTF. Данная модель состоит из 9 ячеек с твэлами реактора PWR, в центральной ячейке расположена направляющая трубка. При этом используется традиционное диоксидурановое топливо. Основные параметры расчетной модели представлены в табл. 1. По высоте модель разбивается на 10 аксиальных ячеек высотой  $h \sim 39$  см.

**Таблица 1. Основные параметры расчетной модели**

Высота топливной части, м	3,9	Радиус оболочки твэла, см	0,475
Температура теплоносителя на входе, К	565,15	Радиус топливной таблетки, см	0,411
Суммарный расход теплоносителя, кг/с	2,58	Шаг решетки твэлов, см	1,43
Суммарное энерговыделение, МВт	0,532	Обогащение топлива, %	3,95
Давление теплоносителя на выходе, МПа	15,8	Плотность топлива, г/см <sup>3</sup>	10,25

В теплогидравлических расчетах модель разбивается на 9 параллельных каналов (рис 1). Горизонтальные перетечки между каналами отсутствуют, при этом теплообмен между соседними каналами моделируется.



*Рис. 1. Сечение расчетной модели*

Граничные условия в теплогидравлических расчетах задаются по расходу теплоносителя на входе и по давлению на выходе, в нейтронно-физических расчетах задается радиальное граничное условие отражения и аксиальное условие утечки.

Зависимость энерговыделения от температуры и плотности теплоносителя (MCU-FREE), а также обратная зависимость температуры и плотности теплоносителя от энерговыделения (HYDRA-IBRAE) обуславливает связность кодов. Температура топлива и конструкционных материалов принимается постоянной во всех расчетах.

Система PWR 3x3 Pin Cluster представляет особый интерес в контексте исследования слабосвязанных систем в Монте-Карло расчетах [7]. С точки зрения нейтронно-физических расчетов реакторные системы, как правило, характеризуются как не слабосвязанные. Рассматриваемая система может быть отнесена к слабосвязанным, что может способствовать появлению в расчетах колебательного характера распределения потока нейтронов. Наличие направляющей трубки в центральной ячейке дополнительно усиливает слабосвязанность системы.

#### 4. Результаты расчетов

Относительные значения энерговыделения в твэлах по отношению к среднему на канал, полученные по кодам MCU-FREE/HYDRA-IBRAE сравниваются со значениями [1], полученными по кодам MCNP5/SUBCHANFLOW (табл. 2). Направляющая трубка, как и в работе [1], рассматривается как твэл с нулевым энерговыделением, поэтому все полученные значения больше единицы.

Таблица 2. Относительное значение энерговыделения в твэле

Номер твэла	MCU-FREE/ HYDRA-IBRAE	MCNP5/ SUBCHANFLOW	Отклонение, %
1	1,1081	1,1081	0,00
2	1,1428	1,1420	0,07
3	1,1076	1,1079	0,02
4	1,1426	1,1421	0,04
6	1,1424	1,1420	0,04
7	1,1073	1,1081	0,07
8	1,1420	1,1418	0,02
9	1,1072	1,1080	0,07

Характер энергораспределения по твэлам хорошо согласуется при расчете по кодам MCU-FREE/HYDRA-IBRAE и MCNP/SUBCHANFLOW. При этом среднее отклонение значений энерговыделения в симметричных твэлах по кодам MCU-FREE/HYDRA-IBRAE достигает 0,03%.

Распределения температуры (рис. 2) и плотности (рис. 3) теплоносителя в канале 2 по кодам MCU-FREE/HYDRA-IBRAE согласуется с распределениями по кодам MCNP5/SUBCHANFLOW[1], MCNP6/CTF [6].

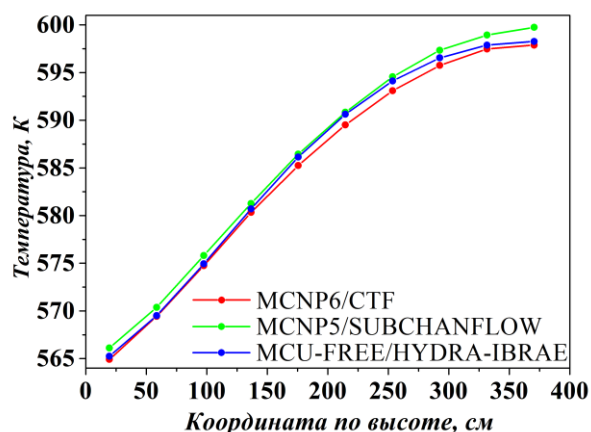


Рис. 2. Распределение температуры теплоносителя в канале 2 по кодам MCNP5/SUBCHANFLOW, MCNP6/CTF и MCU-FREE/HYDRA-IBRAE

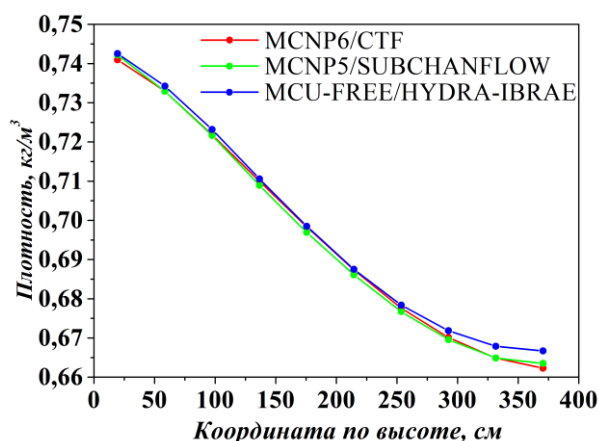


Рис. 3. Распределение плотности теплоносителя в канале 2 по кодам MCNP5/SUBCHANFLOW, MCNP6/CTF и MCU-FREE/HYDRA-IBRAE

#### 5. Заключение

Результаты расчетов тестовой задачи BWR 3x3 Pin Cluster, полученные с использованием кодов MCUFREE и HYDRA-IBRAE, согласуются с результатами работ [1,6]. Полученное согласие подтверждает корректность выбранных расчетных моделей и методики расчета.

На следующем этапе планируется доработка методики расчета по части возможности учета распределения температуры топлива и оболочки, а также проведение исследования различных методик, ускоряющих сходимость.

## Литература

1. *Ivanov A., Sanchez V., Stieglitz R., Ivanov K.* High fidelity simulation of conventional and innovative LWR with the coupled Monte-Carlo thermal-hydraulic system MCNP-SUBCHANFLOW // Nuclear Engineering and Design. 2013. №262. P. 264-275
2. *Алексеев Н.И., Большагин С.Н., Гомин Е.А., Городков С.С., Гуревич М.И., Калугин М.А., Кулаков. А.С., Марин С.В., Новосельцев А.П., Олейник Д.С., Прянишников А.В., Сухино-Хоменко Е.А., Шкаровский Д.А., Юдкевич М.С.* Статус MCU-5. // ВАНТ. Серия: Физика ядерных реакторов. 2011. Вып. 4. С. 5-23.
3. *Алипченков В.М., Беликов В.В., Давыдов А.В., Емельянов Д.А., Мосунова Н.А.* Рекомендации по выбору замыкающих соотношений для расчета потерь давления на трение в контурах АЭС с ВВЭР // Теплоэнергетика. 2013. №5. С.28–34.
4. *Кизуб П.А., Колташев Д.А., Митенкова Е.Ф.* Анализ нейтронно-физических характеристик в ячеечных расчетах реактора ВВЭР с использованием кодов MCNP5 и MCU-FREE: Препринт № ИБРАЕ-2013-04. М.: ИБРАЭ РАН . 2013. 23 с.
5. *Seker V., Thomas J.W., Downar T.J.* Reactor physics simulations with coupled Monte Carlo calculation and computational fluid dynamics // International Conference on Emerging Nuclear Energy Systems (ICENES-2007). 2007.
6. *Bennet A.* Development and testing of a coupled MCNP6/CTF code. Master of Science thesis.
7. *Майоров Л.В.* Оценки смещения результатов при расчете реакторов и хранилищ ядерного топлива методом Монте-Карло // Атомная энергия. 2005. Т. 99. Вып. 4. С. 243–256.