

# НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 621.039.524

## РАЗРАБОТКА СОГЛАСОВАННОЙ МОДЕЛИ В ПРЕЦИЗИОННЫХ РАСЧЕТАХ НЕЙТРОНИКА—ТЕПЛОГИДРАВЛИКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ CFD-КОДОВ

Колташев Д.А., Митенкова Е.Ф. (ИБРАЭ РАН, г. Москва)

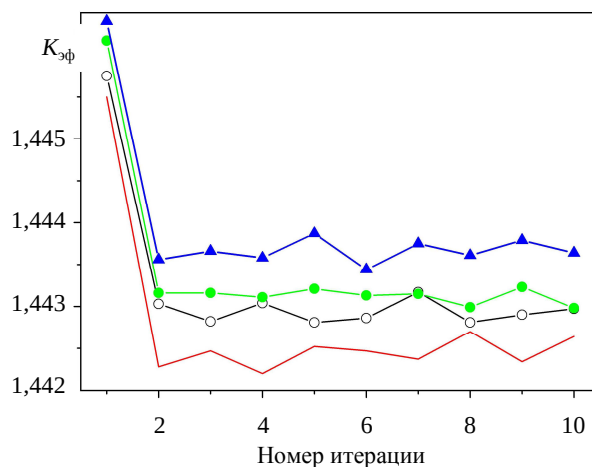
Полномасштабные связные расчеты становятся все более востребованными при решении задач физики реакторов. Такие расчеты особенно актуальны при разработке новых объектов ядерной энергетики и расширенном анализе аварийных режимов в условиях недостатка экспериментальных данных. Повышение точности распределения нейтронов обуславливает при современных вычислительных средствах применение в связных расчетах нейтронно-физических кодов, использующих методы Монте-Карло, и теплогидравлических CFD-кодов [1].

Для проведения связных расчетов нейтроника—теплогидравлика разработана программная оболочка CCS, в которой реализован интерфейс обмена данными теплогидравлических кодов и нейтронно-физических кодов MCU и MCNP [2]. Расчетная модель формируется на основе ячеечных расчетов, которые используются для определения параметров зон регистрации (размеры и др.) и статистических параметров, обеспечивающих достаточность расчетов методами Монте-Карло [3]. Для сильно неоднородных систем в отсутствие универсальных критериев выбора расчетных сеток требуются дополнительные расчеты, позволяющие формировать неравномерные расчетные сетки с пространственным измельчением [4]. Осуществляемый в рамках ячеечных расчетов анализ чувствительности вычисляемых характеристик к изменению геометрических (сеточных и др.) и физических параметров позволяет уточнить параметры расчетной модели.

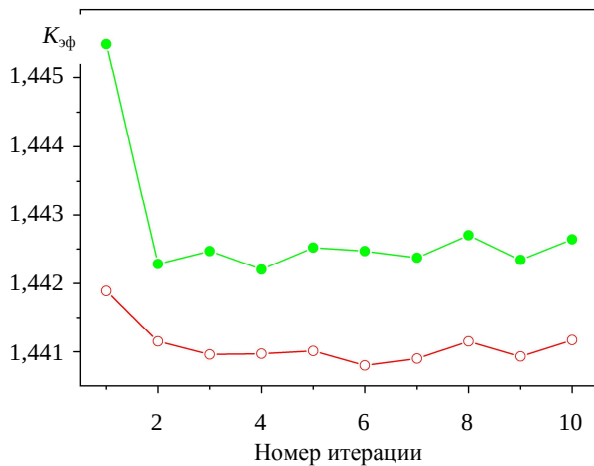
Повышение точности счета функционалов в малых локальных областях, в частности, в системах с потвэльным представлением (без упрощений) обуславливает применение в связных расчетах прецизионных кодов, использующих методы Монте-Карло, и теплогидравлических CFD-кодов. Анализируются расчеты системы PWR 3×3 Pin Cluster с помощью кодов MCU и OpenFOAM [5, 6]. В открытом пакете OpenFOAM для решения задач гидродинамики с помощью CFD-моделирования реализованы гибкие

функциональные средства построения блочно-структурированных и неструктурированных сеток и др. Программно-вычислительные средства оболочки CCS обеспечивают настройку теплогидравлического распределения для сеток, полученных в OpenFOAM, с последующим формированием согласованной расчетной модели [7]. Связность кодов MCU и OpenFOAM осуществляется за счет температурно-плотностных обратных связей, учитывающих зависимость теплогидравлических параметров от энерговыделения, а также ядерно-физических данных от температуры и плотности.

Анализ чувствительности нейтронно-физических характеристик к возмущению теплогидравлических параметров выполняется в рамках ячеечных расчетов с помощью кода MCU и одномерного теплогидравлического кода HYDRA-IBRAE [2, 8]. Для расчетных моделей с разным числом аксиальных ячеек  $N$  получены различающиеся эффективные коэффициенты размножения нейтронов  $K_{эф}$  (рис. 1). Анализ показывает, что даже для расчетных моделей простых систем наблюдаются колебания интегральной характеристики  $K_{эф}$ . Такой характер имеет место в расчетах с разным числом итераций. Схема итерационного про-



Р и с. 1.  $K_{эф}$  в зависимости от номера итерации для моделей с числом ячеек 10 (—), 20 (○), 40 (●), 120 (▲)

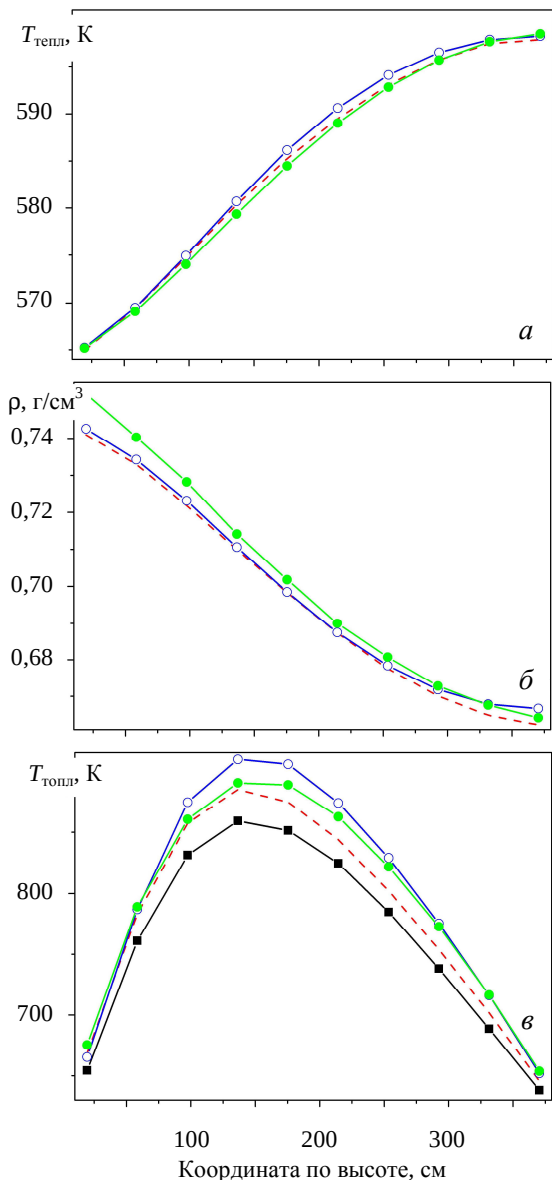


Р и с. 2.  $K_{эф}$  в зависимости от номера итерации с учетом (●) и без учета (○) изменения температуры топлива и оболочки

цесса ранее использовалась при расчете бенчмарк-экспериментов PWR и BWR [2]. Уменьшение размера расчетных ячеек для  $N > 40$  приводит к увеличению колебаний  $K_{эф}$ . При таких неустойчивых  $K_{эф}$  ожидаемо и неустойчивое локальное распределение в отдельных областях. Применение в связанных расчетах кодов, использующих методы Монте-Карло, предполагает повышение точности расчетов во всей системе, включая выделенные области с дополнительными требованиями к точности распределения. Поэтому устойчивость локальных функционалов необходима для корректности вычисляемого распределения. На базе двух вариантов — с учетом изменения температуры топлива и оболочки и при их фиксированных значениях анализируется влияние температурно-плотностных обратных связей на  $K_{эф}$  (рис. 2). Результаты подтверждают необходимость учета обратных связей по температуре топлива и оболочки при построении согласованной расчетной модели.

Аксиальное распределение температуры и плотности теплоносителя, а также температуры топлива, рассчитанное с помощью кодов MCU/OpenFOAM, для PWR 3×3 Pin Cluster показывает согласие с расчетами с использованием кодов MCNP5/SUBCHANFLOW, MCNP6/CTF и MCU/HYDRA-IBRAE (рис. 3) [5, 8, 9]. Отличие плотности теплоносителя и температуры топлива не превышает 1,5 и 6% соответственно. При этом отклонение энерговыделения в потвэльном представлении не превышает 0,1%, что согласуется со статистической погрешностью [9].

Полученные результаты подтверждают работоспособность программной оболочки CCS. Методика связанных расчетов, отработанная для систем с водяным теплоносителем, может быть распространена на моделирование перспективных систем с жидкометаллическим теплоносителем.



Р и с. 3. Распределение температуры (а), плотности теплоносителя (б) и температуры топлива (в) в расчетах с помощью кодов MCU/OpenFOAM (●), [5] (■), [8] (○), [9] (— —)

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tuomminen R., Valtavirta V., Peltola J. e.a. Coupling SERPENT and OpenFOAM for neutronics—CFD multi-physics calculations. — In: Proc. of PHYSOR 2016. USA, 1—5 May 2016, CD-ROM № 700403.
2. Колташев Д.А., Митенкова Е.Ф. Особенности связанных расчетов на базе кодов MCU и HYDRA-IBRAE для систем с сильной пространственной и плотностной гетерогенностью. — Изв. РАН. Энергетика, 2017, вып. 1, с. 149—163.
3. Кизуб П.А., Колташев Д.А., Митенкова Е.Ф. Анализ нейтронно-физических характеристик в ячейчных расчетах реактора ВВЭР с использованием кодов MCNP5 и MCU-FREE: Препринт № IBRAE-2013-04. 23 с.

4. Hanna B., Gill D., Griesheimer D. Spatial homogenization of thermal feedback regions in Monte Carlo reactor calculations. — In: Proc. of PHYSOR 2012. USA, 15—20 April, 2012. CD-ROM № 700371.
5. Ivanov A., Sanchez V., Stieglitz R. e.a. High fidelity simulation of conventional and innovative LWR with the coupled Monte Carlo thermal-hydraulic system MCNP—SUBCHANFLOW. — Nucl. Engng Des., 2013, v. 262, p. 264—275.
6. OpenFOAM® — Official Home of the Open Source Computational Fluid Dynamics (CFD) Toolbox [Электронный ресурс]. URL: <http://www.openfoam.com>.
7. Колташев Д.А. Связные расчеты тестовой задачи PWR 3×3 Pin Cluster по кодам MCU и OpenFOAM. — В сб.: XVIII научная школа молодых ученых ИБРАЭ РАН. М., 16—17 ноября 2017 г., с. 90—94.
8. Колташев Д.А. Проведение связанных расчетов тестовой задачи PWR 3×3 Pin Cluster с помощью кодов MCU-FREE и HYDRA-IBRAE. — В сб.: Проблемы современной физики. 59-я научная конф. МФТИ. М., 2016, с. 98—100.
9. Bennett A., Avramova M., Ivanov K. Coupled MCNP6/CTF code: development, testing, and application. — Ann. Nucl. Energy, 2016, v. 96, p. 1—11.

Поступило в Редакцию 18.12.17

## Р е ф е р а т ы   с т а т е й

*Продолжение. Начало см. на с. 124*

### УДК 621.039.4

А л е е в а Т.Б., К о ж и н А.Ф., Б у ш у е в А.В., З у б а р е в В.Н., Х а л и т о в Р.Р., Т а р а с о в Б.А., Г л у ш е н к о в А.Е., Л и п а т о в А.П., Д а в ы д о в А.В., С о л о м а т и н И.Д. **Контроль массы и равномерности распределения делящихся материалов в твэлах с уран-плутониевым нитридным топливом гамма-спектрометрическим методом.** — Атомная энергия, 2018, т. 125, вып. 2, с. 96—100.

В статье представлен неразрушающий гамма-спектрометрический метод определения характеристик делящихся материалов в твэлах с уран-плутониевым топливом. Измерения проводили с помощью сканирующего устройства с детектором на основе особо чистого германия. Равномерность распределения плутония и массы контролировали по скорости счета импульсов в пике  $^{239}\text{Pu}$  энергией 413,7 кэВ. Изотопный состав плутония в твэле определяли по программе FRAM. Были проведены многократные повторные измерения и оценены повторяемость и воспроизводимость результатов определения характеристик делящихся материалов в твэле. Рис. 4, табл. 2, список лит. 3 назв.

### УДК 621.039.4

Х а л и т о в Р.Р., А л е е в а Т.Б., К о ж и н А.Ф., Б у ш у е в А.В., З у б а р е в В.Н., Т а р а с о в Б.А., Д е н и с о в Д.В. **Математическое моделирование спектров  $\gamma$ -излучения твэлов с уран-плутониевым топливом для разработки методики контроля делящихся материалов.** — Атомная энергия, 2018, т. 125, вып. 2, с. 100—103.

В статье описано применение математического моделирования при разработке методики гамма-спектрометрического контроля твэлов с уран-плутониевым топливом. Для моделирования спектров использовался программный комплекс EffMaker. В результате были выбраны измерительная система, геометрия и время измерения, оценена чувствительность методики к изменению характеристик объекта, что существенно уменьшило необходимое число последующих физических экспериментов. Рис. 3, список лит. 5 назв.

### УДК 621.039.524

К а м е н с к а я Д.Д., Т а р а с о в О.В., Ф и л и п о в А.С., В а л е т о в Д.К. **Теплоперенос излучением и конвекцией в газовой полости устройства локализации расплава ВВЭР-1200.** — Атомная энергия, 2018, т. 125, вып. 2, с. 104—109.

Рассмотрен теплообмен в газовой полости устройства локализации расплава активной зоны ВВЭР-1200. Численно решалась модельная задача в конфигурации границ полости, близкой к получаемой после формирования бассейна расплава. Теплоперенос излучением рассчитывается тремя методами: в приближении прозрачной среды с учетом угловых коэффициентов излучения участков границ полости, методом DTRM, пригодным для расчета переноса излучения в среде любой оптической плотности, и диффузионным методом в приближении Росселанда. Показано, что преобладающим механизмом является тепловое излучение, вклад конвекции газа относительно мал. Оценено влияние выбора метода расчета на теплоперенос в газовой полости при разном поглощении. Рис. 6, табл. 1, список лит. 10 назв.