

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА
В АКТИВНОЙ ЗОНЕ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ**

Д. Е. Золотых, М. Н. Аникин, И. И. Лебедев

Научный руководитель: к.ф.-м.н. А. Г. Наймушин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: zolotykh.daniil@gmail.com

COMPUTER SIMULATION OF HEAT TRANSFER PROCESSES IN THE REACTOR CORE

D. E. Zolotykh, M. N. Anikin, I. I. Lebedev

Scientific supervisor: PhD A.G. Naymushin

Tomsk Polytechnic University, 634050, Russia, Tomsk, Lenin ave., 30

E-mail: zolotykh.daniil@gmail.com

***Annotation.** In this article, the algorithm of determination of the temperature field of cylindrical fuel rods in the reactor core were developed. The basic principles of heat transfer, such as the laws of heat transfer, the differential equations of heat transfer, were studied. The solving of problems produced by Matlab and MathCad software systems and presentation of the results are shown.*

Математическое описание тепломассообмена включает систему дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих нестационарные трехмерные поля скорости, температуры, концентрации и краевые условия, задающие взаимодействие объекта с окружающей средой. В общем случае, это сложная для решения задача, если иметь в виду сложную геометрию реальных инженерных объектов, нелинейность уравнений, разнообразие и неустойчивость гидродинамических полей и т.п.

Универсальным средством решения таких задач становится все в большей мере численное моделирование на компьютерах. Во-первых, численное моделирование востребовано в связи с усложнением энергетических технологий. Во-вторых, численное моделирование становится доступным благодаря появлению и усовершенствованию инженерных математических пакетов.

Целью настоящей работы является разработка алгоритма решения процессов теплообмена, протекающих в активной зоне реактора, с помощью методов компьютерного моделирования.

Разработка специализированной системы для исследования температурного поля в твэлепроводилась в специализированной среде Matlab, которая занимает особое место среди вычислительных инструментов инженера. Как и другие современные языки программирования высокого уровня, Matlab позволяет разрабатывать хорошо структурированные программы, снабженные графическим интерфейсом пользователя (GUI) и системой визуализации результатов. Имеются эффективные средства отладки и совершенствования программ.

В дополнение к этим универсальным свойствам, Matlab, как «матричная лаборатория», обеспечивает эффективную работу с векторными и матричными моделями, поскольку использует массив реальных и

комплексных чисел как базовый элемент данных. Численные алгоритмы Matlab имеют репутацию эталонов эффективности.

Математической формулировкой задачи является уравнение эллиптического типа:

$$-\nabla \cdot (c\nabla u) + au = f, \text{ или } -\operatorname{div}(c\operatorname{grad}u) + au = f, \quad (1)$$

Уравнение (1) записано для двумерной области Ω [1]. Коэффициенты c, a, f могут быть функциями координат и зависимой переменной u . В последнем случае уравнение будет нелинейным.

Можно решать также параболическое уравнение:

$$d \frac{\partial u}{\partial t} - \nabla \cdot (c\nabla u) + au = f \quad (2)$$

с коэффициентами, зависящими от времени t (но не от искомой переменной u).

Применительно к задачам теплообмена:

- зависимую переменную u идентифицируют с температурой,
- коэффициент c – с теплопроводностью тела,
- коэффициент f – с объемной мощностью внутренних источников теплоты;
- произведение au может представлять отвод теплоты в окружающую среду с нулевой температурой, или специальный вид внутреннего источника теплоты;
- коэффициент d для нестационарной задачи есть объемная теплоемкость ρc .

В задаче о температурном поле твэла имеет место быть аксиальная симметрия твэла и при отсутствии заметных продольных изменений температурное поле будет одномерным, изменяющимся только по радиальной координате.

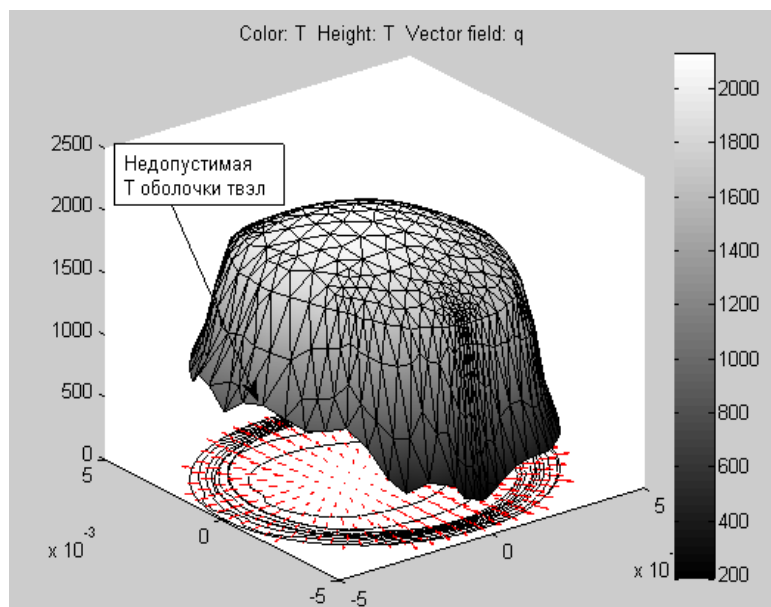


Рис. 1. Результат численного решения задачи о температурном поле твэла

Один из примеров представления численного решения в трехмерном режиме изображен на рис. 1. Отчетливо видны сильные перекосы температурного поля, способные вызвать значительные и неравномерно распределенные температурные напряжения в твэле. Температура циркониевой оболочки в рассматриваемом экстремальном режиме функционирования твэла явно превосходит допустимый

предел (примерно 400 °С). Экспериментирование с различными режимами, в том числе аварийными, составляет основную задачу численного моделирования инженерных объектов.

Выполнение демонстрационного расчета распределения температуры в цилиндрическом твэле производится в пакете Mathcad.

При проектировании твэла необходимо проверить, не превышают ли температуры ядерного топлива и защитной оболочки допустимых значений.

В разработанной модели расчета теплопередачи определяются:

- температура внешней поверхности циркониевой оболочки, контактирующей с водой;
- температура внутренней поверхности оболочки;
- температура поверхности топливного стержня из оксида урана.

Располагая значением температуры поверхности топливного стержня из диоксида урана, можно рассчитать максимальную температуру топлива. Распределение температуры внутри тепловыделяющего стержня строят с помощью функции с учетом сильной температурной зависимости теплопроводности оксида урана. Далее формируется функция для распределения температуры во внешней области, т.е. в газовом зазоре, циркониевой оболочке и охлаждающей жидкости. Результаты расчета твэла представлены на рис. 2 как распределение температуры по радиусу [2].

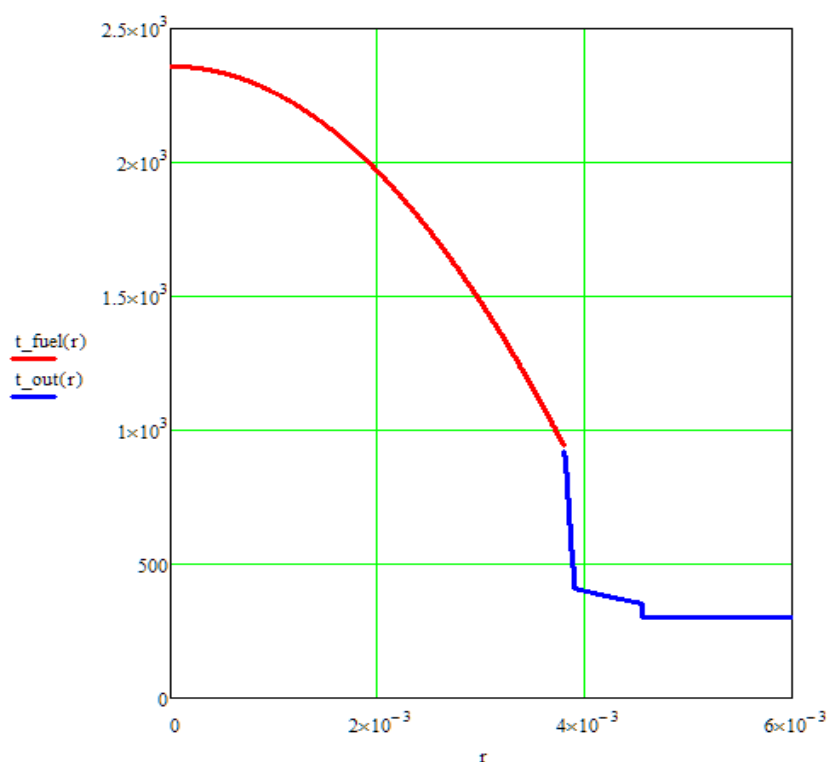


Рис. 2. Температурное поле в твэле ядерного реактора

Основное назначение разработанной системы — экспериментирование с различными режимами, в том числе аварийными для контроля температурных параметров внутри активной зоны. Разработанный алгоритм решения стационарной задачи теплопроводности внутри тепловыделяющего стержня, газовой прослойки и циркониевой оболочки, может быть особенно полезен на ранних этапах конструирования твэл. Широкий спектр возможностей визуализации результатов позволяют

добиться большей наглядности в теплофизических процессах, протекающих в активной зоне реактора. Полученные результаты возможно применять не только для энергетических реакторов, но и для исследовательских установок. Проведенные расчеты для тепловыделяющих сборок ИРТ-Т показали хорошую сходимость с результатами представленными в [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.
2. Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. М.: Наука. 1984. 288 с.
3. Чертков Ю. Б., Наймушин А.Г., Лебедев И.И., Аникин М.Н. Методика и результаты теплового расчета твэлов реактора ИРТ-Т // Изв. вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. – №4/2. – 329.