

### **Заключение**

В статье проведен сравнительный анализ методов настройки регуляторов системы автоматического управления непрерывным динамическим объектом. Настрой коэффициентов методом Циглера-Никольса без дополнительной интуитивной подстройки даёт очень посредственный результат и для ПИ, и для ПИД-регуляторов (колебательный переходный процесс). Методы настройки коэффициентов на основе генетического алгоритма и релейной обратной связи, хоть и являются более сложными и не всегда реализуемыми на реальном объекте, дают результаты, качественно значительно лучшие, чем первый метод.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечёткие системы. — М.: Горячая линия — Телеком, 2006. — 383 с.
2. Åström, K.J. Revisiting the Ziegler-Nichols step response method for PID control [Text] / K.J. Åström, T. Hägglund // Journal of process control. — 2004. — Vol. 14. — N 6. — P. 1163-1175.
3. Денисенко В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации. СТА №1/2008, стр. 87-99.
4. Ziegler JG, Nichols NB. Optimum setting for automatic controllers. Trans ASME 1942; 64:759–768.

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ В КОМПОЗИЦИОННОМ МАТЕРИАЛЕ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ТАБЛЕТКЕ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА**

О. Мендоса

Научный руководитель: Шаманин Игорь Владимирович, д.ф.-м.н. ТПУ  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет

**Введение.** При эксплуатации энергетического ядерного реактора одной из основных характеристик, определяющей его безаварийную работу, является максимальная температура топлива, достигающаяся при использовании композиционного материала. Высокая температура

сокращает срок службы топлива и является одной из причин для изучения композитных материалов топлива реакторов.

Дисперсионным ядерным топливом называется композиционный материал, в котором делящийся материал ( $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$ ) находится в форме включения в матрицу из материала с высоким коэффициентом теплопроводности и низким поглощением нейтронов.

Основным требованием к композиционным материалам ТВЭЛов является совместимость всех материалов при максимально возможных рабочих температурах, возникающих в ТВЭЛах в процессе их изготовления. Под совместимостью подразумевается такая комбинация свойств, которая позволяет материалам ТВЭЛа находиться в контакте друг другом, не вступая в химическое или металлургическое взаимодействие. Совместимость выбранных материалов определяет, по существу, предельную рабочую температуру ТВЭЛа.

**Используемые методы и модели.** Для расчета распределение температура в ТВЭЛЕ первый шаг, нужно найти коэффициент теплопроводности элементарной ячейки композиционного материала с вкраплениями  $\lambda$ , который зависит от размера блоков 1 (матрицы)  $L = 100$  мкм, и 2(включения)  $l = 90$  мкм (рис.1б), от коэффициента теплопроводности  $\lambda_1$  материала блока 1 ( $\text{BeO}$ ), коэффициента теплопроводности  $\lambda_2$  материала блока 2 ( $\text{UO}_2$ ). Расчет коэффициентов теплопроводности произведен в среде Visual Basic, которая позволяет автоматизировать расчеты, [1] .

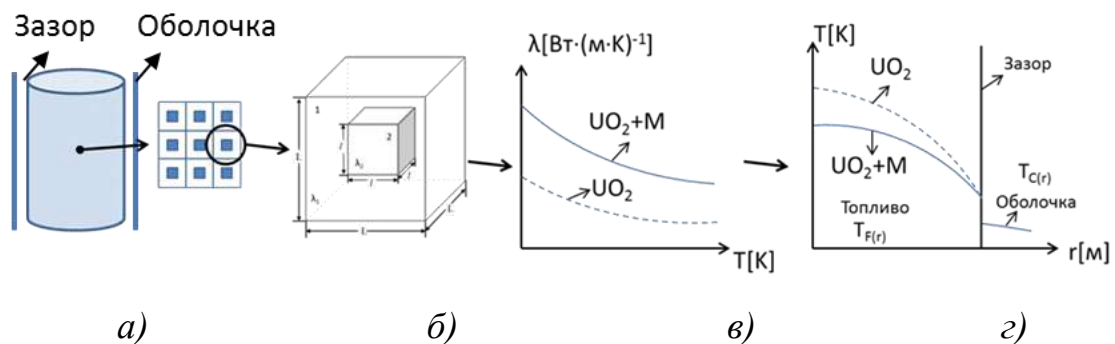


Рис. 1. Модель композитного топлива (а), элементарная ячейка (б), коэффициент теплопроводность (в), распределения температура(г).

Второй шаг: Определение теплового потока, используя уравнение теплопередачи [2] (1)

$$\lambda \cdot \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + q_v = \rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Тепловыделяющий элемент содержит топливные таблетки, зазор между таблеткой и оболочку ТВЭЛа (рис. 1а),

Максимальное значение температуры приходится на центральную линию топлива, её распределение носит убывающий характер от оси до внешнего радиуса топливной таблетки. Геометрические размеры топливной таблетки, теплопроводность материалов (матрицы, делящегося материала, стенки тепловыделяющего элемента) известны т.к. являются справочными величинами, далее мы рассмотрим термический анализ топливного элемента ВВЭР. Выясним это, решением классического уравнения теплопроводности

Беря примером реактор ВВЭР, мы изменяем только состав самой таблетки включенной в ТВЭЛ, добавляя композиционные материалы, и изучая уже на основе имеющихся данных поведение новых материалов в известных нам условиях.

Основные предположения: на этом осевой передачей тепла пренебрегают, поскольку длина стержня намного больше его диаметра. А также потому, что торцы таблеток не соприкасаются, обеспечивая высокую теплопроводность таблетки  $\partial T / \partial Z = 0$ ,  $\partial T / \partial t = 0$ . Уравнение теплопроводности, по направлению оси  $\partial T / \partial \theta$  [3] тепловыделяющий элемент, этими данными мы можем пренебречь.

**Сопоставление результатов.** Анализ результатов коэффициентов теплопроводности для таблеток композиционного материала  $\text{BeO-UO}_2$ , полученных в среде Visual Basic[1] показал, что модель обобщенной проводимости Лихтенеккера для смесей с неравноправными компонентами при перпендикулярной ориентации пластин (ЛихтеПЕР) и модель обобщенной проводимости Лихтенеккера для смесей с равноправными (форма включения – квадрат) компонентами (Лихте2) наиболее точно описывают экспериментальные данные (Рисунок 2а).

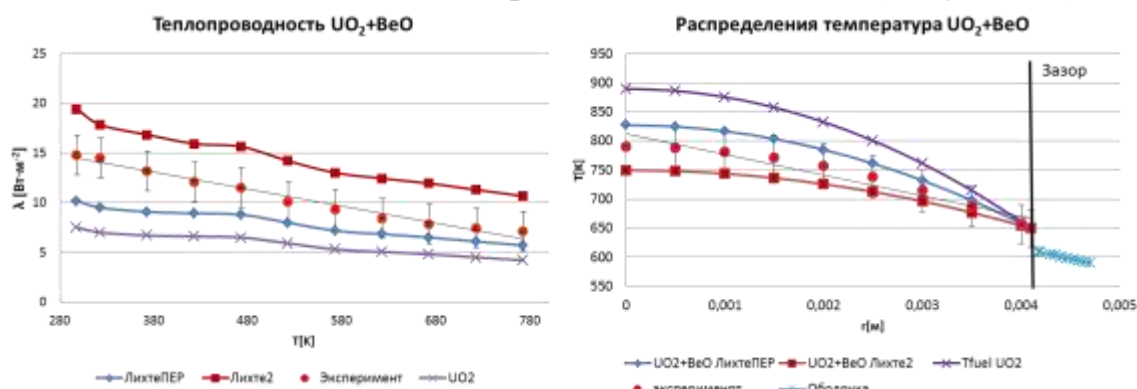


Рис. 2. коэффициент теплопроводность (а), распределения температура(б) матрица –  $\text{BeO}$ , включения –  $\text{UO}_2$

При использовании функций (1) с предположением, определенных из аналитической функции, получены значения, аналогичные экспериментальным данным. Определено, максимальная температура в центре таблетки (на оси) композиционного материала  $\text{BeO-UO}_2$  ниже, чем у однородного  $\text{UO}_2$ .

Хотя две модели (ЛихтеПЕР и Лихте2) близки к экспериментальным значениям композиционного материала  $\text{BeO-UO}_2$ , для расчета распределения тепла выбирается модель теплопроводности ЛихтеПЕР с температурой 523К (Рисунок 2а), которая расположена ниже экспериментальных значений. Причиной этого является то, что при использовании этой модели ЛихтеПЕР, распределение температуры будет больше, чем экспериментальное. Это позволяет включить адекватный коэффициент безопасности, когда рассчитываем и определяем характеристики реактора

На графике рисунка 2б, мы можем видеть модель ЛихтеПЕР, значение, соответствующее распределению тепла в композите, имеет  $\Delta T \sim 40\text{K}$ . При использовании программы [1] полученные результаты аналогичны полученным экспериментальным данным.

**Заключение.** В этой работе был предложен метод решения проблем теплопроводности в составном топливном элементе, была найдена модель, позволяющая точно предсказать теплопроводность композиционных материалов. Решая одномерную радиальную проводимость в цилиндрических координатах для устойчивого состояния, для оценки точности и эффективности, найдено, что теоретические и экспериментальные данные аналогичны, обнаруживаем, что в центре гранулы, где температура выше, разница между теоретической и экспериментальной в  $\Delta T \sim 40\text{K}$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мендоса О., Каренгин А. Г., Новоселов И. Ю., Шаманин И. В., Определение теплофизических свойств композиционного материала с использованием различных моделей // Фундаментальные Проблемы Современного Материаловедения, том 14 №2 (2017) С. 178 -183,
2. Todreas. N., Kazimi M., Nuclear Systems I, Thermal Hydraulic Fundamentals. Taylor & Francis, 1993. – pag 705.
3. Алексеев С. В., Зайцев В.А. Дисперсионное ядерное топливо // Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2015. – 248с.