

УДК.536.24

СОРОКИН Г.А.¹, СОРОКИНА Т.В.², ПЕРИМОВ Р.Р.¹¹ Институт ядерных исследований НАН Украины² Ин-ут технической теплофизики НАН Украины

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ТВЭЛА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТАХ ИЗМЕНЕНИЯ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУР

Подано методику розрахунку теплотехнічної надійності ТВЕЛУ при імпульсному, ступеневому та гармонійному впливах.

Приведена методика расчета теплотехнической надежности ТВЭЛа при импульсном, ступенчатом и гармоническом воздействии.

The method of heat engineering reliability calculation of fuel element at pulse stepped and harmonic influences is presented.

A – постоянные коэффициенты;
 C – константы интегрирования;
 c – теплоемкость в сечении ТВЭЛа, Дж/(кг·°С);
 $N_{1,2}$ – корни характеристического уравнения;
 $q(t)$ – удельный тепловой поток в сечении ТВЭЛа;
 T – температура, °С;

t – время, с;
 Φ – функция Лапласа;
 λ – коэффициент теплопроводности в сечении ТВЭЛа;
 o – оболочка ТВЭЛа;
 пред – максимальное значение;
 y – ядерное топливо.

Введение

Наиболее распространенным элементом активных зон ядерных реакторов являются цилиндрические тепловыделяющиеся элементы (ТВЭЛы), которые в процессе эксплуатации испытывают воздействие тепловых нагрузок, изменяющихся со временем. Это может быть, например, гармонически изменяющаяся температура теплоносителя или тепловыделение в топливе в виде кратковременных импульсов, повторяющихся с определенным периодом и т. д. Теплотехническая надежность – свойство ТВЭЛа сохранять в течение заданного времени нормальный теплоотвод не только в стационарном режиме работы реактора, но и при переходных процессах и в условиях случайных отклонений параметров от проектных, обусловленных теплотехническими погрешностями изготовления и эксплуатации реакторной установки в целом.

Цель исследования

Данная работа посвящена теоретическому исследованию теплотехнической надежности ТВЭЛа при различных типах воздействий. Объектом исследования выбраны тепловые процессы, происходящие в ТВЭЛе при ступенчатом изменении температуры в ТВЭЛе и импульсном изменении температуры теплоносителя.

Методы исследования

Оценка тепловой устойчивости и прочности ТВЭЛа в заданных условиях имеет свою специфику и может проводится следующим образом.

Представим ТВЭЛ как систему, состоящую из двух элементов – сердечника (ядерное топливо из UO_2) и оболочки (Zr), между которыми происходит процесс обмена теплотой (рис. 1).

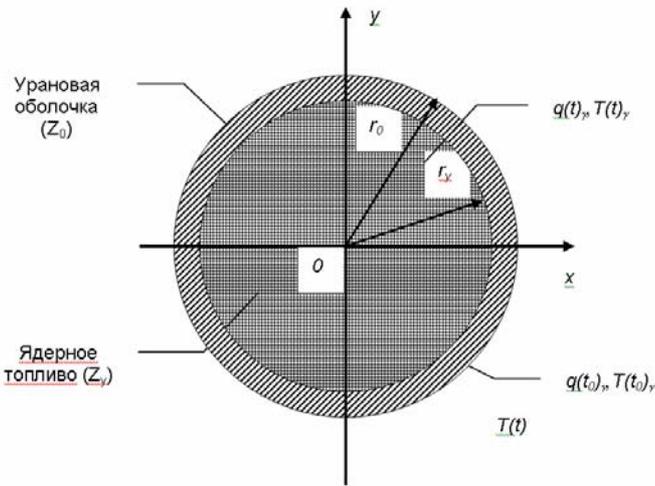


Рис. 1. Поперечный разрез ТВЭЛа.

На основе теплового баланса запишем систему уравнений:

$$\begin{cases} q(t)_y = \frac{c_y \cdot dT(t)_y}{dt - \lambda_y \cdot \left[\frac{dT(t)_y}{dr_y} \right]_{sy}}, \\ q(t)_0 = \frac{c_0 \cdot dT(t)_0}{dt - \lambda_0 \cdot \left[\frac{dT(t)_0}{dr_0} \right]_{so}}. \end{cases} \quad (1)$$

В качестве граничных условий задаемся:

- равенством плотности теплового потока нулю в центре сердечника;
- условиями сшивки на границах слоев;
- условиями третьего рода на внешней границе ТВЭЛа.

Тогда с учетом этого, система (1) будет иметь вид:

$$\begin{cases} \frac{d^2 T(t)_y}{dt^2} + A_1 \cdot \left(\frac{dT(t)_y}{dt} \right) + A_2 \cdot T(t)_y = \\ = A_3 \cdot q(t)_y + A_4 \cdot T(t); \\ T(t)_0 = A_5 \cdot \frac{T(t)_y}{dt} + A_6 \cdot T(t)_y - A_7 \cdot q(t). \end{cases} \quad (2)$$

Решение уравнения (2) найдем при помощи квадратур из решения однородного уравнения при следующих значениях z_y и z_0 :

$$\begin{aligned} z_y > z_0 \\ T(t)_0 &= C_1 \cdot \exp(-N_{1,2} \cdot t) + C_2 \cdot \exp(-N_{1,2} \cdot t); \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} z_y = z_0 \\ T(t)_0 &= (C_3 + C_4 \cdot t) \cdot \exp(-N_{1,2} \cdot t); \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} z_y < z_0 \\ T(t)_0 &= \exp\left(-\frac{A_1}{2t}\right) \cdot (C_5 \cdot \cos \beta t + C_6 \cdot \sin \beta t), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{где } N_{1,2} = \frac{A_1}{2} \pm \left[\left(\frac{A_1}{2} \right)^2 - A_2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (6)$$

Из уравнений (3) и (5) следует, что в зависимости от правильности выбора соотношения между z_y и z_0 , т.е. правильности конструирования ТВЭЛа, возможны различные тепловые переходные процессы в ТВЭЛе.

Основным параметром, определяющим работоспособность ТВЭЛа, будет являться максимально допустимая температура оболочки $T_0^{\text{пред}}$, причем теплотехническая надежность ТВЭЛа обеспечивается при выполнении условия:

$$f(t) = [T_0^{\text{пред}} - T(t)_0^{\text{max}}] > 0, \quad (7)$$

Поскольку температура $T(t)_0$ является случайной величиной, разброс которой около $T_0^{\text{пред}}$ характеризуется дисперсией $\sigma^2 T(t)_i$, а закон изменения зависимости $f(t)$ является нормальным вследствие нормальности величины $T(t)_0^{\text{пред}}$, то вероятность события $f(t) > 0$ найдем из выражения

$$f(t) = 0.5 + \Phi \left[\frac{T_0^{\text{пред}} - T(t)_0}{\sigma^2 T(t)_i} \right] > 0, \quad (8)$$

$$\text{где } \Phi(U) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_0^U \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt. \quad (9)$$

Обсуждение результатов

В результате моделирования были получены следующие результаты. На рис. 2 и 3 представле-

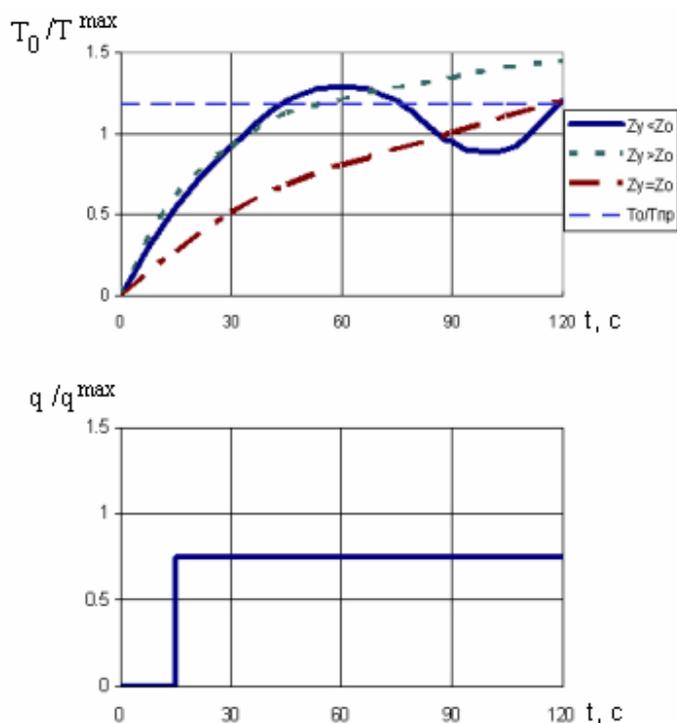


Рис. 2. Теплотехническая надежность ТВЭЛа при ступенчатом воздействии.

ны рассчитанные тепловые процессы, происходящие в ТВЭЛе при ступенчатом изменении во времени температуры в ТВЭЛе и импульсном изменении температуры теплоносителя при различных значениях z_y и z_0 . Видно, что в переходных режимах температура оболочки ТВЭЛа может превышать при определенных условиях максимально предельную температуру $T_0^{\text{пред}}$.

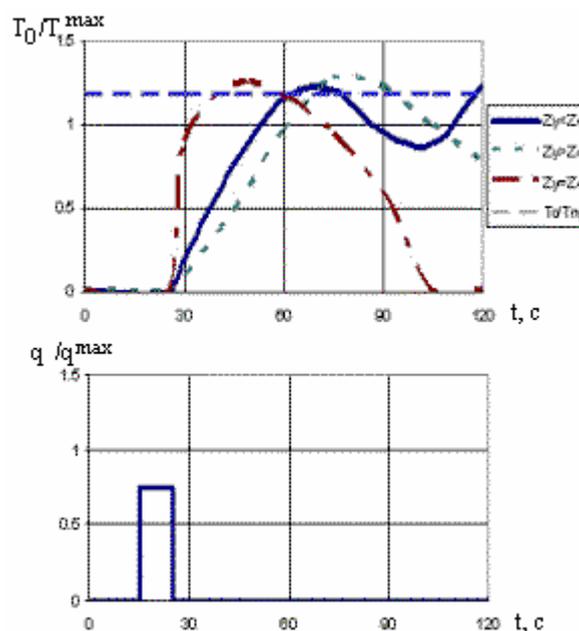


Рис. 3. Теплотехническая надежность ТВЭЛа при импульсном воздействии.

Выводы

Проведенное теоретическое исследование дает возможность, зная величину $T(t)_0$, полученную по формулам (3) и (5), рассчитать теплотехническую надежность ТВЭЛа при импульсном, ступенчатом и гармоническом воздействии, например, при изменении температуры теплоносителя или объемном энерговыделении в топливе.

Получено 04.11.2004 г.