

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РАСЧЕТ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА ГАЗООХЛАЖДАЕМОГО БЫСТРОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

Довга Ю.А. Куликов И.С.

Белорусский национальный технический университет, Минск

In this article the algorithm of a finding of distribution of fuel element temperature of gas-cooled nuclear reactor has been under consideration.

Рассмотрим достаточно длинный стержневой твэл с технологическим газовым зазором между топливом и оболочкой, заполненным на начало кампании чистым гелием. В качестве топлива берется керментная композиция. Распределение температуры в сердечнике и оболочке считается осесимметричным, плотность делений – равномерной по сечению твэла. Ввиду малости градиентов плотности деления и температуры по высоте твэла отдельные сечения элемента (рис. 1), находящиеся вдали от торцов, рассматриваются независимо друг от друга в условиях обобщенной плоской деформации ($\varepsilon_{zz} = \text{const}$).

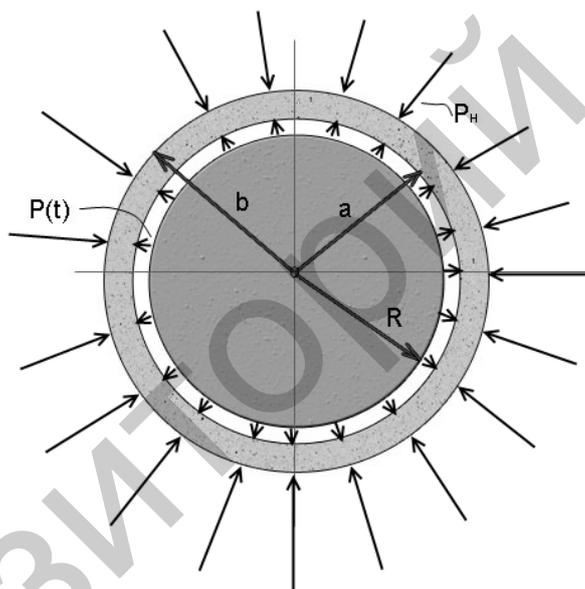


Рис. 1. Поперечное сечение стержневого твэла при наличии газового зазора между топливом и оболочкой

Уравнение теплопроводности в полярных координатах для осесимметрично нагретого цилиндра бесконечной длины с внутренними источниками тепла будет иметь вид

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + q_v, \quad (1)$$

где c – удельная теплоемкость, ρ – плотность материала, q_v – объемное тепловыделение, λ – коэффициент теплопроводности материала.

Предполагается, что реактор вышел на полную мощность и начальное распределение температуры в сердечнике и оболочке к моменту выхода реактора на заданную мощность $T(r,0) = f(r)$ известно.

Будем решать уравнение (1) методом конечных разностей. Его суть заключается в замене дифференциальных коэффициентов уравнения на разностные коэффициенты, что позволяет свести решение дифференциального уравнения к решению его разностного аналога, т.е. построить его конечно-разностную схему. Используя неравномерную сетку, где $h_j = r_{j+1} - r_j$ – шаг по радиусу твэла, $h_n = t_{n+1} - t_n$ – шаг по времени, распишем разностные отношения для производных:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{T_j^n - T_{j-1}^n}{h_j}, \quad \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_j^n - T_j^{n-1}}{h_n},$$

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{\lambda_{j+1}^n r_{j+1} \frac{T_{j+1}^n - T_j^n}{h_{j+1}} - \lambda_j^n r_j \frac{T_j^n - T_{j-1}^n}{h_j}}{0.5(h_{j+1} + h_j)}. \quad (2)$$

Тогда, разностная схема для сердечника запишется следующим образом:

$$c_R \rho_R \frac{T_j^n - T_j^{n-1}}{h_n} = \frac{\lambda_{j+1}^n r_{j+1} \frac{T_{j+1}^n - T_j^n}{h_{j+1}} - \lambda_j^n r_j \frac{T_j^n - T_{j-1}^n}{h_j}}{0.5(h_{j+1} + h_j)} + q_{vj} \quad (3)$$

или, после приведения,

$$\frac{\lambda_{j+1}^n r_{j+1} h_j h_n T_{j+1}^n - (\lambda_{j+1}^n r_{j+1} h_j h_n + \lambda_j^n r_j h_{j+1} h_n + c_R \rho_R) T_j^n + \lambda_j^n r_j h_{j+1} h_n T_{j-1}^n}{r_j h_{j+1} h_j h_n 0.5(h_{j+1} + h_j)} + \left(q_{vj} + c_R \rho_R \frac{T_j^{n-1}}{h_n} \right) = 0. \quad (3')$$

Здесь $j = \overline{1, J_R}$, J_R – число отрезков разбиения для сердечника, c_R – удельная теплоемкость сердечника, ρ_R – плотность материала сердечника.

Оболочка твэла не содержит внутренних источников тепла ($q_{vj} = 0$), поэтому соответствующие уравнения для оболочки будут иметь вид

$$\frac{\lambda_{j+1}^n r_{j+1} h_j h_n T_{j+1}^n - (\lambda_{j+1}^n r_{j+1} h_j h_n + \lambda_j^n r_j h_{j+1} h_n + c_o \rho_o) T_j^n + \lambda_j^n r_j h_{j+1} h_n T_{j-1}^n}{r_j h_{j+1} h_j h_n 0.5(h_{j+1} + h_j)} + c_o \rho_o \frac{T_j^{n-1}}{h_n} = 0. \quad (4)$$

Здесь $j = \overline{J_R + 1, J_O}$, J_O – число отрезков разбиения для оболочки, c_o – удельная теплоемкость оболочки, ρ_o – плотность материала оболочки.

Граничные условия для твэла запишутся следующим образом:

1) Условие в центре сердечника ($r = 0$):

$$\frac{\partial T(0,0)}{\partial r} = 0; \quad (5)$$

- тепловой поток в центре сердечника равен нулю.

Перепишем условие (5) с помощью разностных отношений:

$$\frac{\partial T(0,0)}{\partial r} = 0 \Leftrightarrow \frac{T_1^0 - T_0^0}{h_1} = 0 \Leftrightarrow T_1^0 = T_0^0 \quad (6)$$

2) Условие на границе сердечника и газа ($r = R$):

Будем считать, что теплопередача между сердечником и газом в зазоре осуществляется по закону Ньютона [4], тогда

$$\frac{\partial T(R,0)}{\partial r} = -\frac{\alpha'}{\lambda}(T_R - T_a), \quad (7)$$

где α' – тепловая проводимость зазора. $\frac{Вт}{см^2 \cdot ^\circ C}$

Согласно [2] тепловую проводимость зазора можно вычислить по формулам

$$\alpha' = \frac{0,1167\sqrt{T_g} - 2,36}{100\frac{\delta}{R}} + 0,6391\frac{B}{1+B} + 0,0321, \quad (8)$$

$$T_g = T_{J_{R+1}} + 273 + 0,2723\left(1 + 8\frac{\delta}{R}\right)q,$$

$$B = e^{-7-360\frac{\delta}{R}+0,035q},$$

где q – линейная тепловая мощность твэла $\left(\frac{Вт}{см}\right)$.

В разностных отношениях, условия (7)–(8) примут вид

$$\frac{T_{J_R}^0 - T_{J_{R-1}}^0}{h_{J_R}} = -\frac{\alpha'}{\lambda_{J_R}}(T_{J_R}^0 - T_{J_{R+1}}^0)$$

или

$$\alpha' h_{J_R} T_{J_{R+1}}^0 - (\lambda_{J_R} + \alpha' h_{J_R}) T_{J_R}^0 + \lambda_{J_R} T_{J_{R-1}}^0 = 0, \quad (9)$$

где

$$\alpha' = \frac{0,1167\sqrt{T_g} - 2,36}{100\frac{\delta}{R}} + 0,6391\frac{B}{1+B} + 0,0321,$$

$$T_g = T_{J_{R+1}} + 273 + 0,2723\left(1 + \frac{\delta}{R}\right)q. \quad (10)$$

3) Условие на границе оболочки и среды ($r = b$):

$$\frac{\partial T(b,0)}{\partial r} = -\frac{\alpha}{\lambda_{жс}}(T_b^0 - T_{жс}^0). \quad (11)$$

Представляя условие (11) в разностных отношениях, получим

$$\frac{T_{J_{R+J_{ab}}}^0 - T_{J_{R+J_{ab}-1}}^0}{h_{J_{R+J_{ab}}}} = -\frac{\alpha}{\lambda_{ср}}(T_{J_{R+J_{ab}}}^0 - T_{ср}^0)$$

или

$$(\lambda_{жс} + \alpha h_{J_{R+J_{ab}}})T_{J_{R+J_{ab}}}^0 - \lambda_{ср}T_{J_{R+J_{ab}-1}}^0 + \alpha h_{J_{R+J_{ab}}}T_{ср}^0 = 0. \quad (12)$$

Таким образом, получаем систему уравнений:

$$1) T_1^0 = T_0^0;$$

$$2) \frac{1}{r_1} \frac{\lambda_2^0 r_2 \frac{T_2^0 - T_1^0}{h_2} - \lambda_1^0 r_1 \frac{T_1^0 - T_0^0}{h_1}}{0.5(h_{21} + h_1)} + q_{V1} = 0;$$

$$3) \frac{1}{r_2} \frac{\lambda_3^0 r_3 \frac{T_3^0 - T_2^0}{h_3} - \lambda_2^0 r_2 \frac{T_2^0 - T_1^0}{h_2}}{0.5(h_3 + h_2)} + q_{V2} = 0;$$

...

$$J_R) \frac{1}{r_{J_R-1}} \frac{\lambda_{J_R}^0 r_{J_R} \frac{T_{J_R}^0 - T_{J_R-1}^0}{h_{J_R}} - \lambda_{J_R-1}^0 r_{J_R-1} \frac{T_{J_R-1}^0 - T_{J_R-2}^0}{h_{J_R-1}}}{0.5(h_{J_R} + h_{J_R-1})} + q_{V J_R-1} = 0;$$

$$J_{R+1}) \alpha' h_{J_R} T_{J_R+1}^0 - (\lambda_{J_R} + \alpha' h_{J_R}) T_{J_R}^0 + \lambda_{J_R} T_{J_R-1}^0 = 0,$$

$$\alpha' = \frac{0,1167 \sqrt{T_g} - 2.36}{100 \frac{\delta}{R}} + 0.6391 \frac{B}{1+B} + 0.0321,$$

$$T_g = T_{J_R+1} + 273 + 0.2723 \left(1 + 8 \frac{\delta}{R} \right) q, B = e^{-7-360 \frac{\delta}{R} + 0.035q};$$

$$J_{R+2}) \lambda_{J_R+2}^0 r_{J_R+2} \cdot h_{J_R+1} \cdot T_{J_R+2}^0 - (\lambda_{J_R+2}^0 r_{J_R+2} h_{J_R+1} + \lambda_{J_R+1}^0 r_{J_R+1} h_{J_R+2}) T_{J_R+1}^0 + \lambda_{J_R+1}^0 r_{J_R+1} h_{J_R+2} T_{J_R}^0 = 0;$$

...

$$J_R + J_{ab}) \lambda_{J_R+J_{ab}}^0 r_{J_R+J_{ab}} h_{J_R+J_{ab}-1} T_{J_R+J_{ab}}^0 - (\lambda_{J_R+J_{ab}}^0 r_{J_R+J_{ab}} h_{J_R+J_{ab}-1} + \lambda_{J_R+J_{ab}-1}^0 r_{J_R+J_{ab}-1} h_{J_R+J_{ab}}) T_{J_R+J_{ab}-1}^0 + \lambda_{J_R+J_{ab}-1}^0 r_{J_R+J_{ab}-1} h_{J_R+J_{ab}} T_{J_R+J_{ab}-2}^0 = 0;$$

$$J_R + J_{ab} + 1) (\lambda_{жс} + \alpha h_{J_R+J_{ab}}) T_{J_R+J_{ab}}^0 - \lambda_{жс} T_{J_R+J_{ab}-1}^0 + \alpha h_{J_R+J_{ab}} T_{жс}^0 = 0.$$

Таким образом, мы получили нелинейную систему $J_R + J_{ab} + 1$ уравнений с $J_R + J_{ab} + 1$ неизвестными, решая которую численными методами, можно получить распределение температуры по твэлу в любой момент времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Куликов И.С., Тверковкин Б.Е. Прочность тепловыделяющих элементов быстрых газоохлаждаемых реакторов / под ред. В.Б. Нестеренко. – Мн.: Наука и техника, 1984. – 104 с.
2. Куликов И.С., Нестеренко В.Б., Тверковкин Б.Е. Прочность элементов конструкций при облучении. – Минск: Наука и техника, 1990. – 144 с.: ил.
3. Куликов, И.С. // Вести АН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 1997. – №3. – С. 102-107.
4. Лыков, А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высш. школа, 1967. – 600с.