

Дано

Радиус ТВЭЛа  $r_{\text{ТВЭЛ}} = 4,55 \text{ мм}$

Радиус топливной таблетки  $r_{\text{топл.табл.}} = 3,8 \text{ мм}$

Температура на входе  $T_{\text{вх}} = 571,35 \text{ К}$

Температура на выходе  $T_{\text{вых}} = 602,05 \text{ К}$

Средняя температура теплоносителя  $T_{\text{ср}} = \frac{t_{\text{вых}} + t_{\text{вх}}}{2} = 586,7 \text{ К}$

Изобарная теплоемкость  $C_p = 5810 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$

Средняя плотность теплоносителя  $\rho = 700,49 \text{ кг/м}^3$

Динамическая вязкость теплоносителя  $\mu = 0.0000538 \text{ Па} \cdot \text{с}$

Энтальпии на входе и выходе

$i_{\text{вх}} = 1324380 \text{ Дж/кг}$        $i_{\text{вых}} = 1482950 \text{ Дж/кг}$

Тепловая мощность реактора 3200 МВт

Шаг размещения ТВЭЛов  $a = 12.75 \text{ мм}$

Высота обогреваемой части  $h = 3730 \text{ мм}$

Коэф. неравномерности  $K_z, K_{r\text{max}}$  примем равными 1

$\lambda_{\text{Zr}} = 19.3 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$

$\lambda_{\text{He}} = 0.275 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$

$\lambda_{\text{H}_2\text{O}} = 0.539 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$

$\lambda_{\text{топл.табл.}} = 3.22 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$

Толщина  $\delta_{\text{Zr}} = 0,685 \text{ мм}$        $\delta_{\text{He}} = 0.065 \text{ мм}$

Обозначение

об. - оболочка ТВЭЛа

заз. - газовый зазор

топл.табл. - топливная таблетка

т/н - теплоноситель

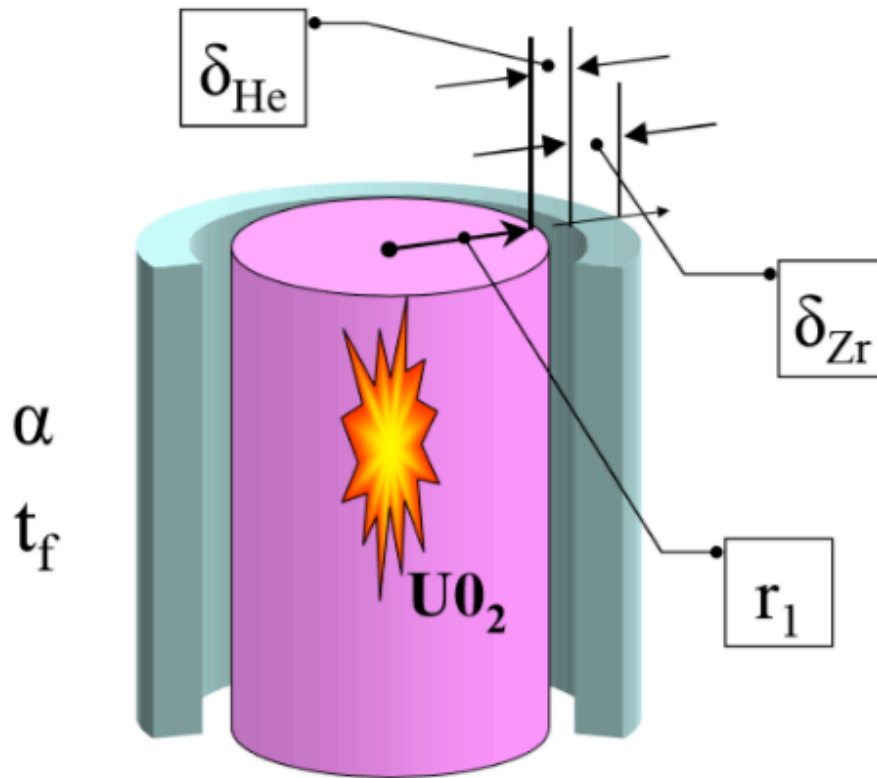


Рис. 1 – Модель ТВЭЛа

Тепловая мощность одного ТВЭЛа:

$$N_t = \frac{3200 \cdot 10^6}{312 \cdot 163} = 62923 \text{ Вт}$$

Массовый расход одного ТВЭЛа:

$$G = \frac{N_t}{i_{\text{ВЫХ}} - i_{\text{ВХ}}} = \frac{62923}{1482950 - 1324380} = 0.397 \text{ кг/с}$$

Удельное энерговыделение:

$$q_v = \frac{N_t}{\pi \cdot r_{\text{ТВЭЛ}}^2 \cdot h} = \frac{62923}{\pi \cdot (4.55 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 3.73} = 259\,382\,535 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}$$

Уравнение баланса для перепада температуры в топливе:

Здесь и далее  $n_{\text{ТВЭЛ}} = 1$   $n_{\text{ТВС}} = 1$

$$q_v \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{топл.табл.}}^2}{4} \cdot n_{\text{ТВЭЛ}} = \frac{N_t}{V} \cdot F_{\text{яч.ТВС}} \cdot K_z \cdot K_{rmax}$$

$$q_v = \frac{N_t}{V \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{топл.табл.}}^2}{4} \cdot n_{\text{ТВЭЛ}}} \cdot F_{\text{яч.ТВС}} \cdot K_z \cdot K_{rmax}$$

$$\Delta T_{\text{топл.табл.}} = \frac{q_v * r_{\text{топл.табл.}}^2 * K_{r \max} * K_z}{4 * \lambda_{\text{топл.табл}}} = \frac{259382535 * 0.0038^2 * 1 * 1}{4 * 3.22} = 291 \text{ К}$$

Уравнение баланса для перепада температуры в газовом зазоре:

$$q_{f \text{зз.}} * (d_{\text{ТВЭЛ}} - 2\delta_{\text{об}} - 2\delta_{\text{зз.}}) * \pi * n_{\text{ТВЭЛ}} = \frac{N_t}{V} * F_{\text{яч.ТВС}} * K_z * K_{r \max}$$

$$\Delta T_{\text{зз.}} = \frac{\delta_{\text{зз.}} * q_{f \text{зз.}}}{\lambda_{\text{He}}}$$

$$\Delta T_{\text{зз.}} = \frac{\delta_{\text{зз.}}}{\lambda_{\text{He}}} * \frac{n_{\text{ТВС}} * N_t}{2(r_{\text{ТВЭЛ}} - \delta_{\text{об}} - \delta_{\text{зз.}}) * \pi * n_{\text{ТВЭЛ}}} * K_z * K_{r \max} =$$

$$= \frac{0,000065}{0,275} * \frac{1 * 62923}{2(0,0038) * \pi * 1} * 1 * 1 = 623 \text{ К}$$

Уравнение баланса для перепада температуры в оболочке ТВЭЛ:

$$q_{f \text{об.}} * (d_{\text{ТВЭЛ}} - 2\delta_{\text{об}}) * \pi * n_{\text{ТВЭЛ}} = \frac{N_t}{V} * F_{\text{яч.ТВС}} * K_z * K_{r \max}$$

$$\Delta T_{\text{об.}} = \frac{\delta_{\text{об.}} * q_{f \text{об.}}}{\lambda_{\text{Zr}}}$$

$$\Delta T_{\text{об.}} = \frac{\delta_{\text{об.}}}{\lambda_{\text{Zr}}} * \frac{n_{\text{ТВС}} * N_t}{(d_{\text{ТВЭЛ}} - 2\delta_{\text{об.}}) * \pi * n_{\text{ТВЭЛ}}} * K_z * K_{r \max} =$$

$$= \frac{0,000685}{19,3} * \frac{1 * 62923}{2(0,0038 + 0,000065) * \pi * 1} * 1 * 1 = 92 \text{ К}$$

Уравнение баланса для теплообмена между стенкой и теплоносителем:

$$\Delta T_{\text{т/н}} = \frac{q_{f \text{об.}}}{\alpha_{\text{т/н}}}$$

Площадь, занимаемая теплоносителем:

$$S = \frac{\sqrt{3}}{2} * a^2 - \pi * r_{\text{ТВЭЛ}}^2 = \frac{\sqrt{3}}{2} * 0,01275^2 - \pi * 0,00455^2 =$$

$$\simeq 0,0000757 \text{ м}^2$$

Смачиваемый периметр:

$$\Pi = 2 * \pi * r_{\text{ТВЭЛ}} = 2 * \pi * 0,00455 \simeq 0,02859 \text{ м}$$

Гидравлического диаметр:

$$d_{\text{гидр.ТВС}} = \frac{4 * S}{\Pi} = \frac{4 * 7,57 * 10^{-5}}{0,028559} = 0,01061 \text{ м}$$

Скорость теплоносителя:  $v = \frac{G}{S \cdot \rho} = \frac{0.397}{7.57 \cdot 10^{-5} \cdot 700.49} = 7.487 \text{ м/с}$

$$Re = \frac{v \cdot d_{\text{гидр.ТВС}}}{\vartheta} = \frac{7.588 \cdot 0.01061}{7.785 \cdot 10^{-8}} = 1034151$$

$$Pe = \frac{\rho \cdot C_p \cdot v \cdot d_{\text{гидр.ТВС}}}{\lambda_{\text{т/н}}} = \frac{700.49 \cdot 5810 \cdot 7.487 \cdot 0.01061}{0.539} = 599808$$

$$Pr = \frac{Pe}{Re} = \frac{599808}{1034151} = 0.58$$

Допущение  $\left(\frac{Pr}{Pr_{\text{ст}}}\right)^{0.25} \approx 1$

Поскольку  $Re > 10^5$  :

$$\overline{Nu}_{\text{т/н}} = 0.037 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.43} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{\text{ст}}}\right)^{0.25} = 1897$$

$$\alpha_{\text{т/н}} = \frac{\lambda_{\text{т/н}} \cdot \overline{Nu}_{\text{т/н}}}{d_{\text{гидр.ТВС}}} = \frac{0.539 \cdot 1897}{0.01061} = 96369 \frac{\text{Вт}}{\text{К} \cdot \text{м}^2}$$

$$q_{f\text{т/н.}} \cdot \Pi \cdot dz = \frac{N_{\text{т}}}{V} \cdot F_{\text{яч.ТВС}} \cdot K_z \cdot K_{r\text{max}} \cdot dz$$

$$\Delta T_{\text{т/н}} = \frac{n_{\text{ТВС}} \cdot N_{\text{т}}}{\Pi \cdot \alpha_{\text{т/н}}} \cdot K_z \cdot K_{r\text{max}} = \frac{1 \cdot 62923}{0.02859 \cdot 96369} \cdot 1 \cdot 1 = 22.8 \text{ К}$$

Зная температурные разности, найдем граничные значения температур:

Температура на границе теплоносителя и стенки оболочки:

$$T_{\text{ср}} + \Delta T_{\text{т/н}} = 609.5 \text{ К}$$

Температура на внутренней стороне оболочки:

$$T_{\text{ср}} + \Delta T_{\text{т/н}} + \Delta T_{\text{об.}} = 701.5 \text{ К}$$

Температура на внешнем диаметре топливной таблетки:

$$T_{\text{ср}} + \Delta T_{\text{т/н}} + \Delta T_{\text{об.}} + \Delta T_{\text{заз.}} = 1324.5 \text{ К}$$

Максимальное значение температуры топливной таблетки:

$$T_{\text{ср}} + \Delta T_{\text{т/н}} + \Delta T_{\text{об.}} + \Delta T_{\text{заз.}} + \Delta T_{\text{топл.табл.}} = 1615.5 \text{ К}$$

temp_between_inner_and_outer_shell	91.9626846
temp_between_max_and_outer_radius_fuel_tablet	290.788757
temp_between_outer_radius_fuel_tablet_and_inn...	622.909546
temp_between_outer_shell_and_coolant	22.8485107
temp_inner_shell_K	701.511169
temp_max_K	1615.20947
temp_outer_radius_fuel_tablet_K	1324.42065
temp_outer_shell_K	609.548462

$$\frac{609.548462 - 609.5}{609.548462} * 100 = 0.008\%$$

$$\frac{701.511169 - 701.5}{701.511169} * 100 = 0.002\%$$

$$\frac{1324.5 - 1324.42065}{1324.42065} * 100 = 0.006\%$$

$$\frac{1615.5 - 1615.20947}{1615.20947} * 100 = 0.018\%$$