

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

Тепловая мощность одного ТВЭЛа:

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

Массовый расход одного ТВЭЛа:

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

Удельная энергоемкость:

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

Уравнение баланса для перепада температуры в топливе:

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

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

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

Уравнение баланса для перепада температуры в газовом зазоре:

$$q_{f\text{зз.}} \cdot (d_{\text{ТВЭЛ}} - 2\delta_{\text{об}} - 2\delta_{\text{зз.}}) \cdot \pi \cdot n_{\text{ТВЭЛ}} = \frac{N_T}{V} \cdot F_{\text{яч.ТВС}} \cdot K_z \cdot K_{rmax}$$

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

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

$$= \frac{0.000065}{0.275} \cdot \frac{1 \cdot 62923}{2(0.0038) \cdot \pi \cdot 1} \cdot 1 \cdot 1 = 623 \text{ К}$$

Уравнение баланса для перепада температуры в оболочке ТВЭЛ:

$$q_{f\text{об.}} \cdot (d_{\text{ТВЭЛ}} - 2\delta_{\text{об}}) \cdot \pi \cdot n_{\text{ТВЭЛ}} = \frac{N_T}{V} \cdot F_{\text{яч.ТВС}} \cdot K_z \cdot K_{rmax}$$

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

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

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

Уравнение баланса для теплообмена между стенкой и теплоносителем:

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

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:

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

$$\text{Скорость теплоносителя: } v = \frac{G}{S*\rho} = \frac{0,397}{7,57*10^{-5}*700,49} = 7,487 \text{ м/с}$$

$$Re = \frac{v*d_{\text{гидр.ТВС}}}{\vartheta} = \frac{7,588*0,01061}{7,785*10^{-8}} = 1\,034\,151$$

$$Pe = \frac{\rho*C_p*v*d_{\text{гидр.ТВС}}}{\lambda_{\text{т/н}}} = \frac{700,49*5810*7,487*0,01061}{0,539} = 599\,808$$

$$Pr = \frac{Pe}{Re} = \frac{599808}{1034151} = 0,58$$

$$\text{Допущение } \left(\frac{Pr}{Pr_{\text{ст}}}\right)^{0,25} \approx 1$$

Поскольку $Re > 10^5$:

$$\overline{Nu}_{\text{т/н}} = 0,037 * Re^{0,8} * Pr^{0,43} * \left(\frac{Pr}{Pr_{\text{ст}}}\right)^{0,25} = 1897$$

$$\alpha_{\text{т/н}} = \frac{\lambda_{\text{т/н}} * \overline{Nu}_{\text{т/н}}}{d_{\text{гидр.ТВС}}} = \frac{0,539*1897}{0,01061} = 96\,369 \frac{\text{Вт}}{\text{К*м}^2}$$

$$q_{f_{T/H.}} * \Pi * dz = \frac{N_T}{V} * F_{\text{яч.ТВС}} * K_z * K_{rmax} * dz$$

$$\Delta T_{T/H} = \frac{n_{\text{ТВС}} * N_t}{\Pi * \alpha_{T/H}} * K_z * K_{rmax} = \frac{1 * 62923}{0.02859 * 96369} * 1 * 1 = 22.8 \text{ K}$$

Зная температурные разности, найдем граничные значения температур:

Температура на границе теплоносителя и стенки оболочки:

$$T_{\text{ср}} + \Delta T_{T/H} = 609.5 \text{ K}$$

Температура на внутренней стороне оболочки:

$$T_{\text{ср}} + \Delta T_{T/H} + \Delta T_{\text{об.}} = 701.5 \text{ K}$$

Температура на внешнем диаметре топливной таблетки:

$$T_{\text{ср}} + \Delta T_{T/H} + \Delta T_{\text{об.}} + \Delta T_{\text{зав.}} = 1324.5 \text{ K}$$

Максимальное значение температуры топливной таблетки:

$$T_{\text{ср}} + \Delta T_{T/H} + \Delta T_{\text{об.}} + \Delta T_{\text{зав.}} + \Delta T_{\text{топл.табл.}} = 1615.5 \text{ K}$$