

Интегральные параметры реактора

По параметрам второго контура определяется тепловая мощность реактора.

Количество петель	4
Расход пара	1633 кг/с
Расход питательной воды	1648 кг/с
Температура/давление пара	278/6.27 °С/МПа
Температура/давление питательной воды	220/8.9 °С/МПа

Тепловая мощность реактора $Q = D(I''(6.27 \text{ МПа}) - I(8.9 \text{ МПа}, 220 \text{ °С}))$

$$I(8.9 \text{ МПа}, 220 \text{ °С}) = 0.94553 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$$

$$D = 1633 \text{ кг/с}$$

$$I(6.27 \text{ МПа}) = 2.7815 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$$

$$Q = 2998 \text{ МВт, далее } 3000 \text{ МВт}$$

По заданным в проекте $T_{\text{вх}} = 289 \text{ °С}$, $T_{\text{вых}} = 321 \text{ °С}$,

и давлению в активной зоне $P = 15.7 \text{ МПа}$ расход теплоносителя в первом контуре

$$G = \frac{Q}{I_{\text{вых}}(321 \text{ °С}, 15.7 \text{ МПа}) - I_{\text{вх}}(289 \text{ °С}, 15.7 \text{ МПа})} = 16675,9 \text{ кг/с}$$

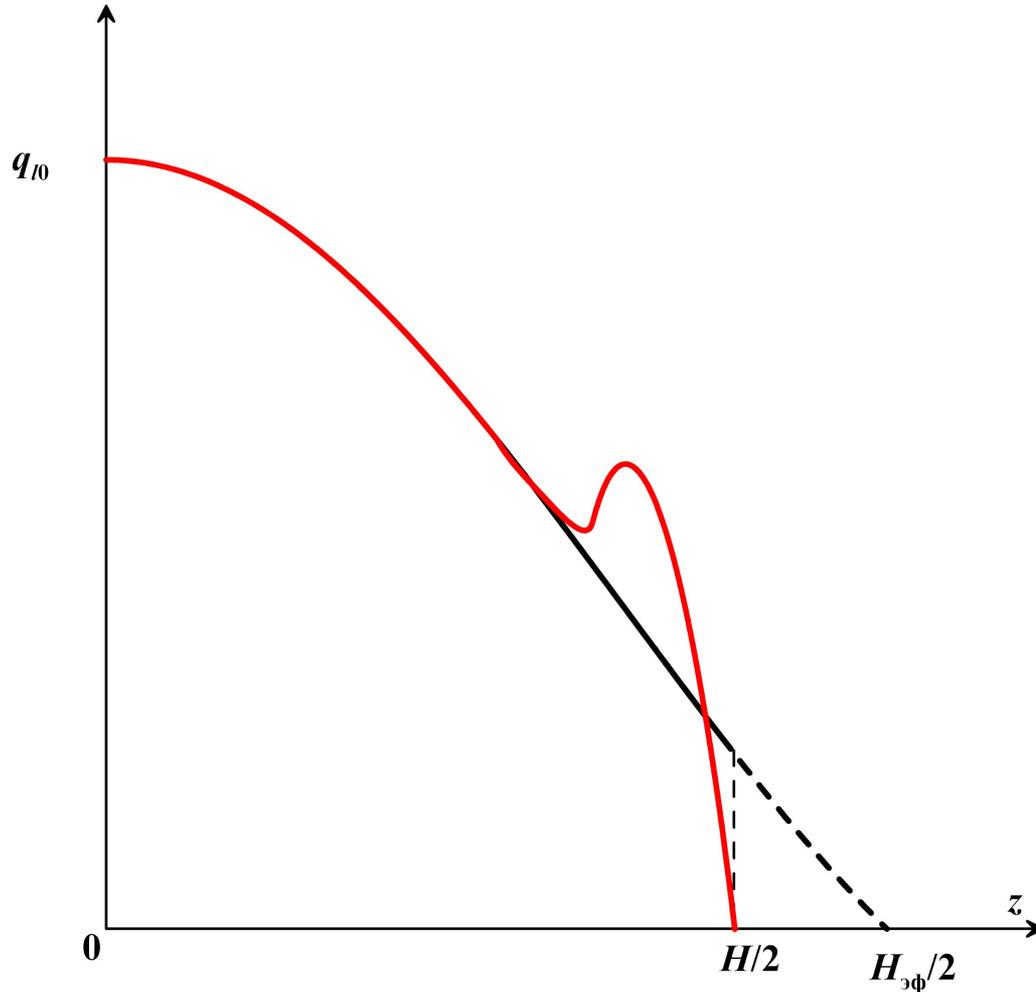
$$I_{\text{вх}}(289 \text{ °С}, 15.7 \text{ МПа}) = 1.2788 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$$

$$I_{\text{вых}}(321 \text{ °С}, 15.7 \text{ МПа}) = 1.4587 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$$

Функция тепловыделения

Для гомогенного реактора с отражателями $q_l(z) = q_{l0} \cos\left(\frac{\pi z}{H_{\text{эф}}}\right)$ $z \in \left[-\frac{H}{2}, \frac{H}{2}\right]$

$H = 3.55$ м – заданная из проекта длина тепловыделяющей части твэл



Функция тепловыделения

Величину $H_{\text{эф}}$ удобно определять по заданному в проекте коэффициенту неравномерности по высоте активной зоны, $K_z = 1.4$.

$$K_z = \frac{q_{l0}}{\langle q_l \rangle} = \frac{H}{\int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \cos\left(\frac{\pi z}{H_{\text{эф}}}\right) dz}$$

после интегрирования

$$K_z \cdot \sin\left(\frac{\pi H}{2H_{\text{эф}}}\right) = \frac{\pi H}{2H_{\text{эф}}}$$

$$H_{\text{эф}} = 4.06 \text{ м}$$

Функция тепловыделения

Величина q_{l0} определяется на один твэл. По проекту количество тепловыделяющих сборок $N_{\text{ТВС}} = 163$, количество твэл в кассете $N_{\text{ТВ}} = 311$.

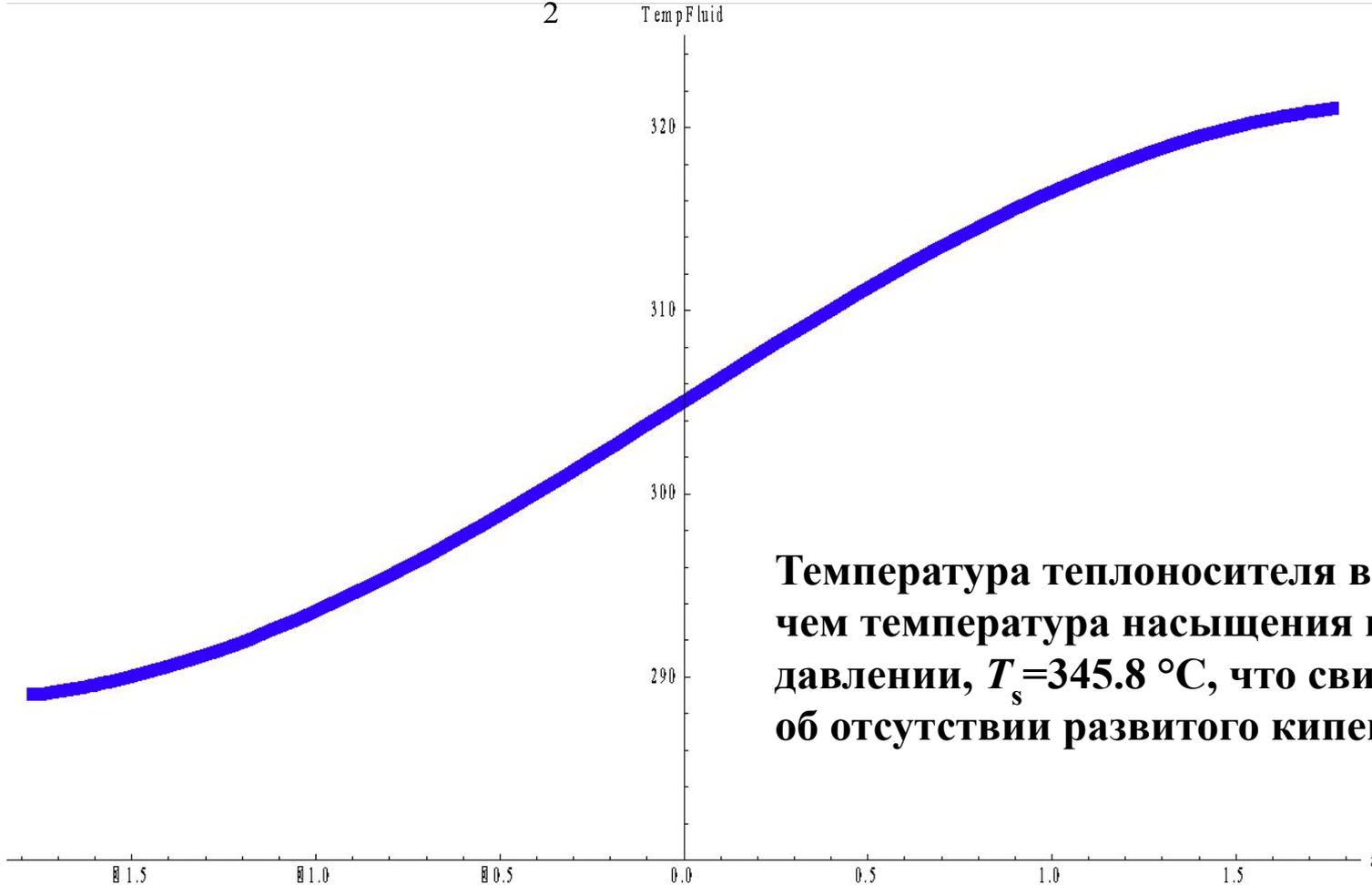
$$\frac{Q}{N_{\text{ТВС}} N_{\text{ТВ}}} = \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} q_{l0} \cos\left(\frac{\pi z}{H_{\text{эф}}}\right) dz$$

$$q_{l0} = 23349,5 \text{ Вт/м}$$

Температура теплоносителя по высоте активной зоны

$$T_{\text{ж}}(z) = T_{\text{вх}} + \frac{N_{\text{ТВ}} \cdot N_{\text{ТВС}}}{G \cdot \langle c_p \rangle} \cdot \int_{-\frac{H}{2}}^z q_l(\zeta) d\zeta$$

$$\langle c_p \rangle = \frac{I_{\text{ВЫХ}} - I_{\text{ВХ}}}{T_{\text{ВЫХ}} - T_{\text{ВХ}}} = 5621.88 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$



Температура теплоносителя везде меньше, чем температура насыщения при заданном давлении, $T_s = 345.8 \text{ }^\circ\text{C}$, что свидетельствует об отсутствии развитого кипения.

Гидравлические характеристики кассеты

Площадь проходного сечения $S_{\text{прох}}$

В реакторе используются шестигранные кассеты с размером «под ключ» 238 мм и толщиной стенки 1.5 мм, в кассете находятся 311 тепловыделяющих элементов диаметром 9.1 мм, 18 направляющих трубок СУЗ диаметром 12.6 мм и одна инструментальная трубка диаметром 10.3 мм.

$$S_{\text{прох}} = \frac{\sqrt{3}(238 - 2 \cdot 1.5)^2}{2} - 311 \frac{\pi 9.1^2}{4} - 12 \frac{\pi 12.6^2}{4} - \frac{\pi 10.3^2}{4} = 26019.6 \text{ мм}^2$$

Гидравлический диаметр $d_{\text{г}} = \frac{4 \cdot S_{\text{прох}}}{\Pi_{\text{смач}}}$

$$\Pi_{\text{см}} = \frac{6(238 - 2 \cdot 1.5)}{\sqrt{3}} + 311 \pi 9.1 + 12 \pi 12.6 + \pi 10.3 = 10212500 \text{ мм}$$

$$d_{\text{г}} = \frac{4 \cdot S_{\text{прох}}}{\Pi_{\text{смач}}} = 10.19 \text{ мм.}$$

Коэффициент теплоотдачи в режиме турбулентного стационарного течения несжимаемой жидкости

Б.С. Петухов, В.В. Кириллов (круглые трубы) $Re \in [10^4; 5 \cdot 10^6]$, $Pr \in [0,5; 200]$.

$$Nu = \frac{\frac{\xi}{8} \cdot Re \cdot Pr}{k + 12,7 \cdot \sqrt{\frac{\xi}{8} \cdot \left(Pr^{2/3} - 1 \right)}}$$

$$Nu = \frac{\alpha_{\text{конв}} \cdot d_{\Gamma}}{\lambda}$$

$$k = 1 + \frac{900}{Re}$$

$$\xi = (1,82 \cdot \text{Lg} Re - 1,64)^{-2}$$

$$Re = \left(\frac{G}{S_{\text{прох}} \cdot N_{\text{ТВС}}} \right) \cdot \frac{d_{\Gamma}}{\mu}$$

$$\alpha_{\text{конв}} = 38000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$$

The screenshot shows the 'WaterSteamPro Calculator' window. The 'Исходные данные' (Initial data) section is active, with the following values:

- Pressure: 15.7 МПа
- Temperature: 305 °C
- Volume: 1.396e-003 м3/кг
- Thermal conductivity: 0.55076 Вт/(м·К)
- Entropy: 3272.6 Дж/(кг)
- Dynamic viscosity: 8.6627e-005 Па·с
- Enthalpy: 1.365e+006 Дж/кг
- Kinematic viscosity: 1.2093e-007 м2/с
- Internal energy: 1.3431e+006 Дж/кг
- Prandtl number: 0.87795
- Isobaric heat capacity: 5581.9 Дж/(кг)
- Isochoric heat capacity: 3033.1 Дж/(кг)
- Speed of sound: 942.49 м/с

Коэффициент теплоотдачи в режиме турбулентного стационарного течения несжимаемой жидкости

Э.К. Калинин, Г.А. Дрейцер (пучки стержней) $Re > 2 \cdot 10^4$, $\frac{b}{d_{ТВ}} \in [1,1; 1,5]$

$$Nu = \left(0,032 \cdot \left(\frac{b}{d_{ТВ}} \right) - 0,0144 \right) \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{1/3}$$

$$Nu = \frac{\alpha_{\text{конв}} \cdot d_{\Gamma}}{\lambda}$$

b – расстояние между соседними твэлами 12,76 мм

$$Re = \left(\frac{G}{S_{\text{прох}} \cdot N_{\text{ТВС}}} \right) \cdot \frac{d_{\Gamma}}{\mu}$$

WaterSteamPro Calculator

Исходные данные

Давление: 15.7 МПа Температура: 305 °C

Объем: 1.396e-003 м3/кг Теплопроводность: 0.55076 Вт/(м·К)

Энтальпия: 3272.6 Дж/кг Динамическая вязкость: 8.6627e-005 Па·с

Энтропия: 1.365e+006 Дж/кг Кинематическая вязкость: 1.2093e-007 м2/с

Внутренняя энергия: 1.3431e+006 Дж/кг Число Прандтля: 0.87795

Изобарная теплоемкость: 5581.9 Дж/(кг·К)

Изохорная теплоемкость: 3033.1 Дж/(кг·К)

Скорость звука: 942.49 м/с

$$\alpha_{\text{конв}} = 54000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$$

Коэффициент теплоотдачи в режиме турбулентного стационарного течения несжимаемой жидкости

В.С. Осмачкин (пучки стержней) $\frac{b}{d_{ТВ}} > 1,2$

$$d_{эф} = \frac{2 \cdot \varepsilon}{(1 - \varepsilon)^2} \left(\frac{\varepsilon}{2} - \frac{3}{2} - \frac{\text{Ln } \varepsilon}{1 - \varepsilon} \right) \cdot d_{\Gamma}$$

ε - плотность решетки, равная отношению площади поперечного сечения, занятого стержнями, к полной площади поперечного сечения

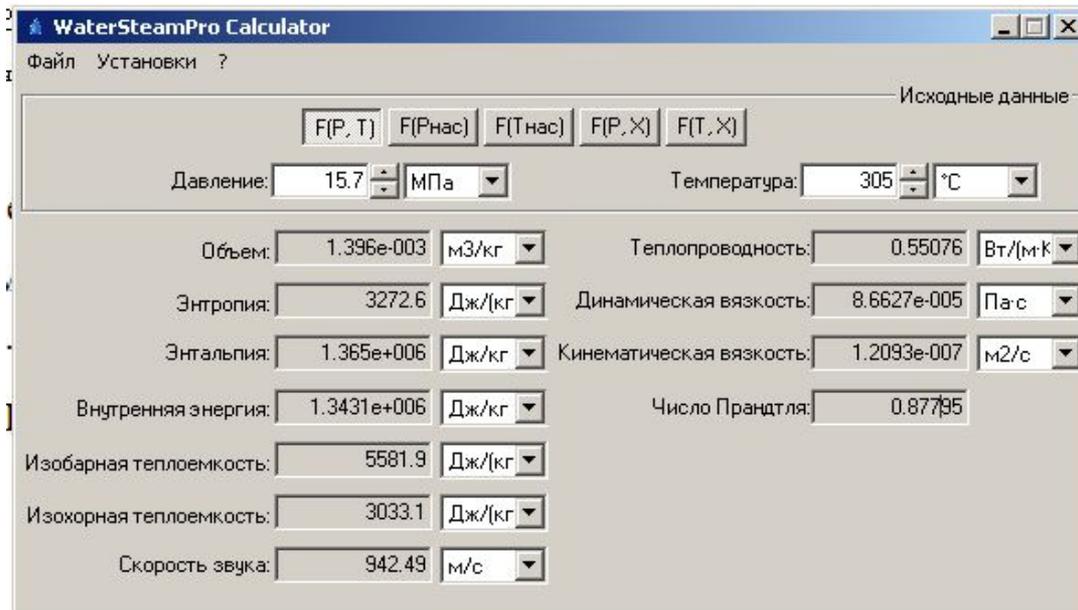
$$\text{Nu} = \frac{\alpha_{\text{конв}} \cdot d_{эф}}{\lambda} \quad \text{Re} = \left(\frac{G}{S_{\text{прох}} \cdot N_{\text{ТВС}}} \right) \cdot \frac{d_{эф}}{\mu}$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{S_{\text{прох}}}{S_{\text{полн}}} = 0.456$$

$$d_{эф} = 5.386 \text{ мм}$$

Далее расчет идет по формулам для круглых труб

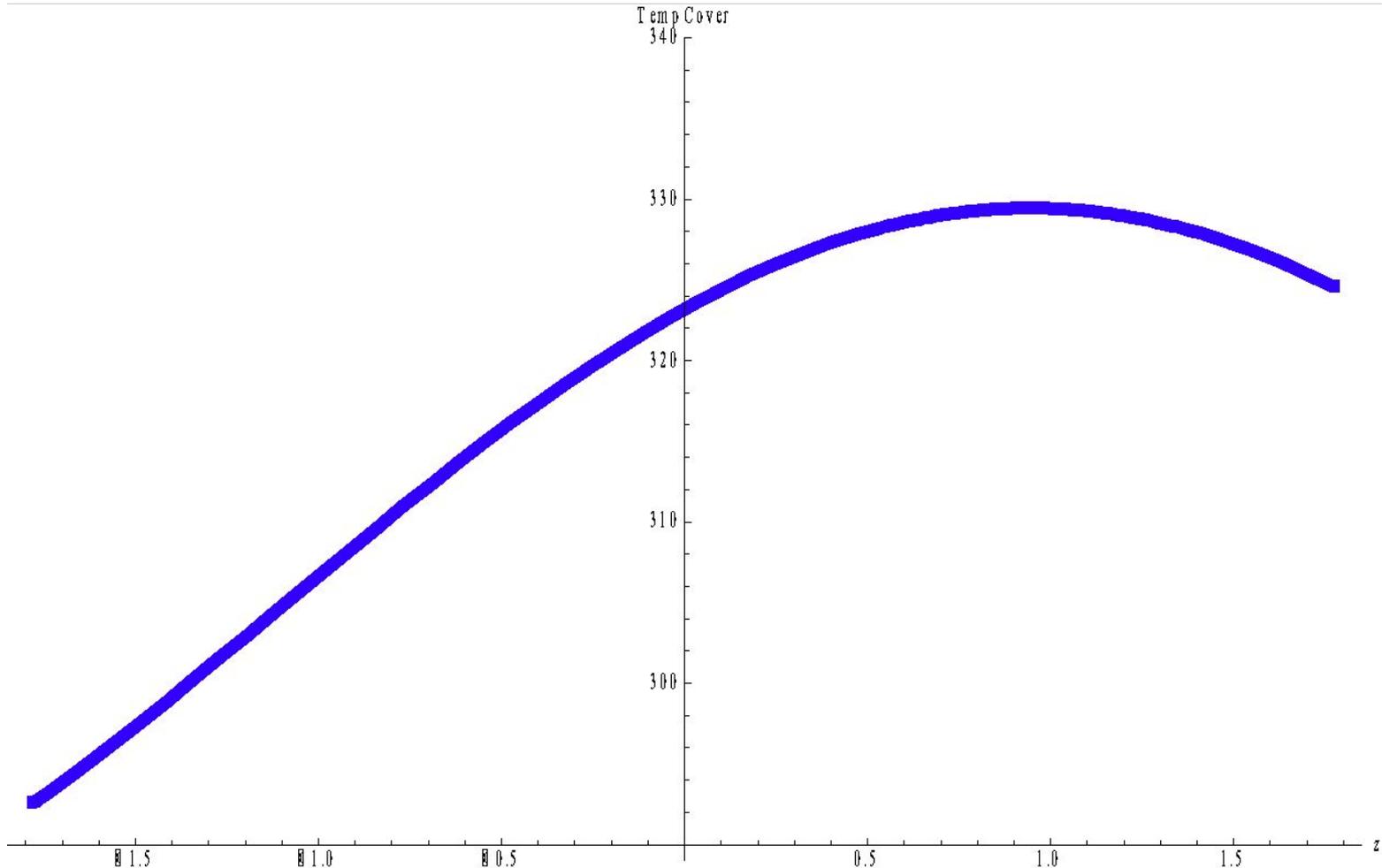
$$\alpha_{\text{конв}} = 43000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$$



Температура поверхности оболочки ТВЭЛ

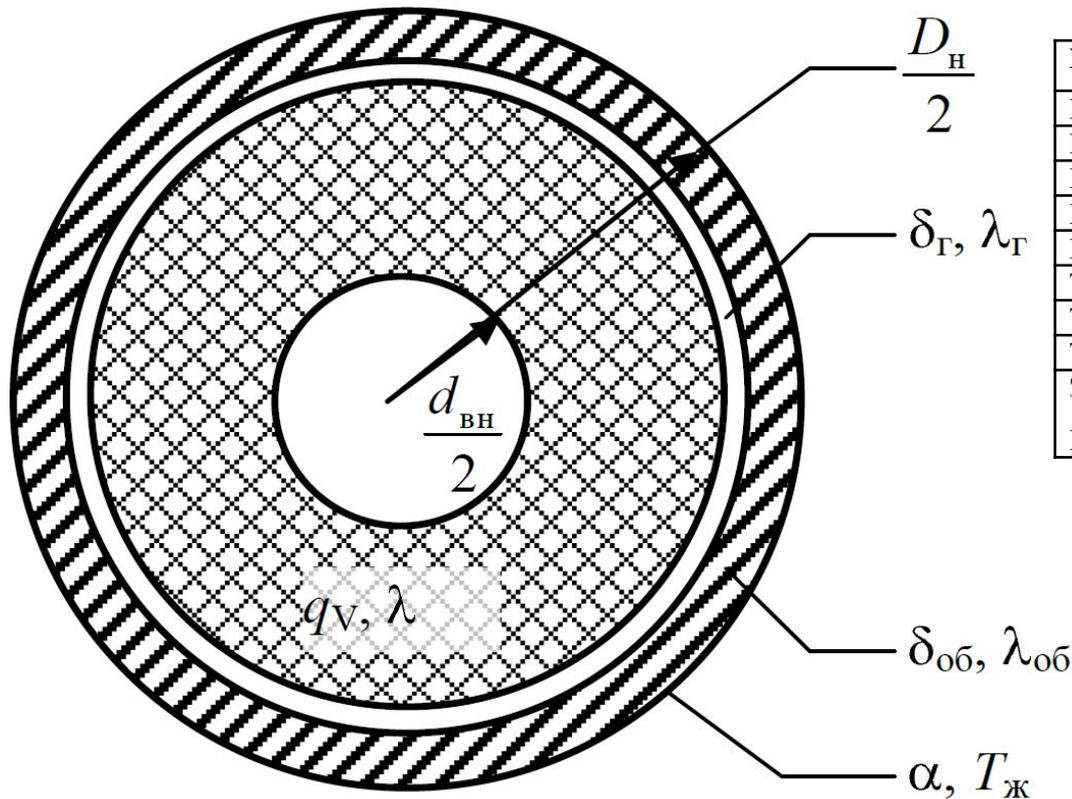
$$T_{об}(z) = T_{ж}(z) + \frac{q_l(z)}{\pi d_{ТВ} \cdot \alpha_{конв}}$$

В среднем коэффициент теплоотдачи
 $\alpha_{конв} = 45000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$



Максимальная температура топливной композиции

$$R_{\text{терм}} = \frac{\ln\left(\frac{d_{\text{ТВ}}}{d_{\text{ТВ}} - 2 \cdot \delta_{\text{об}}}\right)}{2 \pi \lambda_{\text{об}}} + \frac{\ln\left(\frac{d_{\text{ТВ}} - 2 \cdot \delta_{\text{об}}}{d_{\text{ТОП}}}\right)}{2 \pi \lambda_{\Gamma}} + \frac{1}{4 \pi \lambda_{\text{ТОП}}} \left(1 - \frac{2 \left(\frac{d_{\text{ВН}}}{2}\right)^2}{\left(\frac{d_{\text{ТОП}}}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_{\text{ВН}}}{2}\right)^2} \ln\left(\frac{d_{\text{ТОП}}}{d_{\text{ВН}}}\right) \right)$$



Характеристики ТВЭЛ	
Материал топлива	UO ₂
Материал оболочки	Zr 2
Внешний диаметр ТВЭЛ $d_{\text{ТВ}}$, мм	9,1
Внешний диаметр топливной таблетки $d_{\text{ТОП}}$, мм	7,53
Внутренний диаметр топливной таблетки $d_{\text{ВН}}$, мм	1,4
Теплопроводность топлива $\lambda_{\text{топ}}$, Вт/(м·К)	3,5
Толщина оболочки $\delta_{\text{об}}$, мм	0,65
Теплопроводность оболочки $\lambda_{\text{об}}$, Вт/(м·К)	20
Эффективная теплопроводность зазора λ_{Γ} , Вт/(м·К)	0,35

$$R_{\text{терм}} = 0.0372434 \text{ (м К)/Вт}$$

Максимальная температура топливной композиции

$$T_{\text{ц}}(z) = T_{\text{об}}(z) + q_l(z) \cdot R_{\text{терм}}$$

