



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

$$I(8.9 \text{ МПа}, 220 \text{ °С}) = 0.94553 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг} \quad D = 1633 \text{ кг/с}$$

$$I(6.27 \text{ МПа}) = 2.7815 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг} \quad Q = 2998 \text{ МВт, далее } 3000 \text{ МВт}$$

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

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

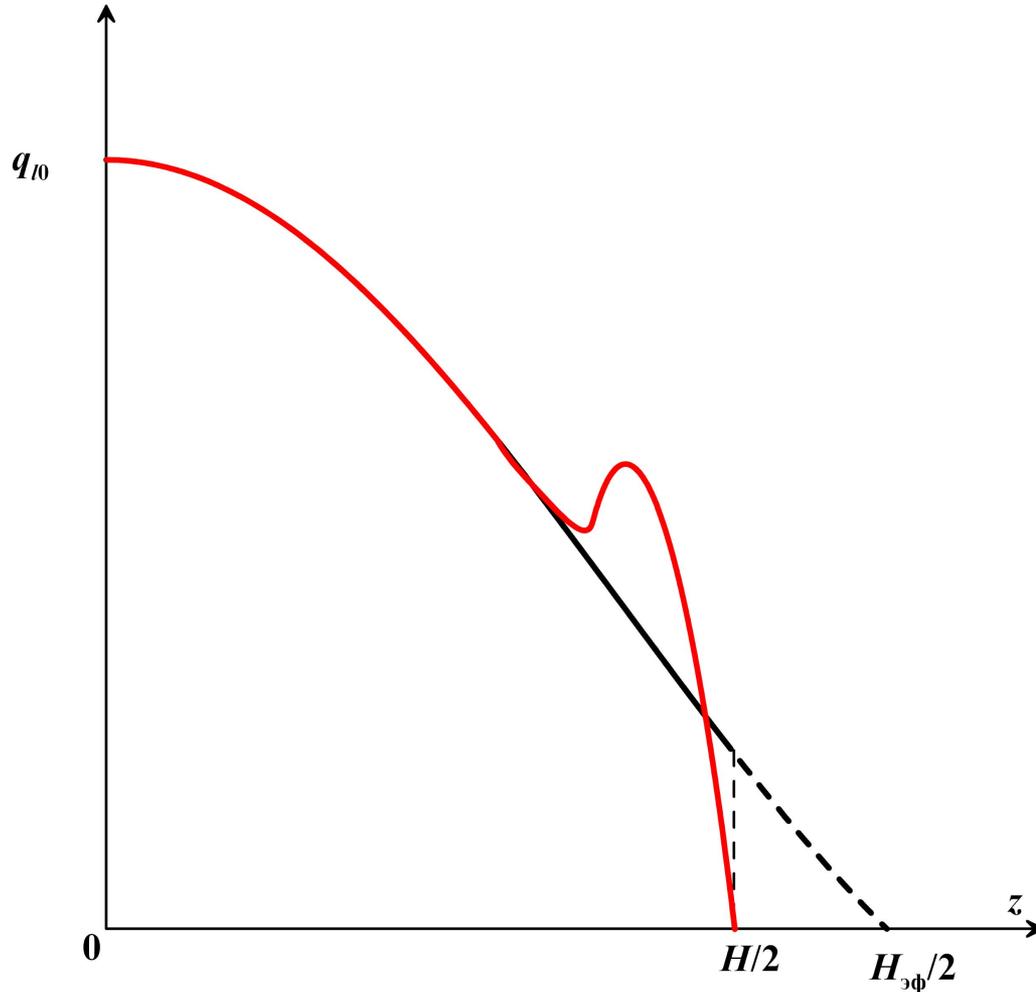
$$I_{\text{вх}}(289 \text{ °С}, 15.7 \text{ МПа}) = 1.2788 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$$

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

# 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  $N_{\text{ТВ}} = 311$ .

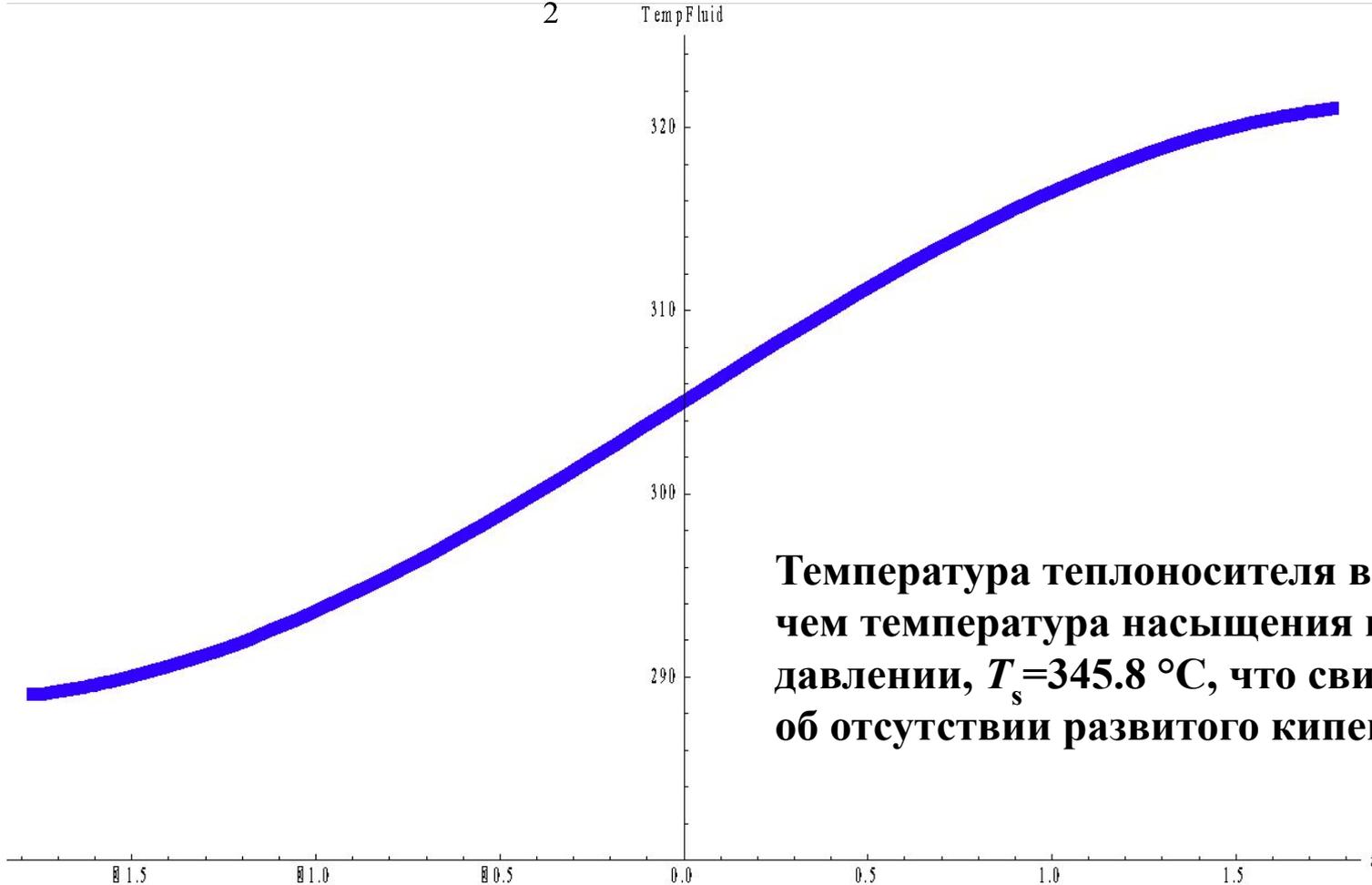
$$\frac{Q}{N_{\text{ТВС}} N_{\text{ТВ}}} = \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} q_{l0} \cos\left(\frac{\pi z}{H_{\text{эф}}}\right) dz$$

$$q_{l0} = 23349,5 \text{ Вт/м}$$

# 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,  $T_s = 345.8 \text{ °C}$ , 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)  $Re \in [10^4; 5 \cdot 10^6]$ ,  $Pr \in [0,5; 200]$ .

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

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

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

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

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

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

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)  $Re > 2 \cdot 10^4$ ,  $\frac{b}{d_{ТВ}} \in [1,1; 1,5]$

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

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

$b$  – 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)

Энтропия: 3272.6 Дж/(кг)      Динамическая вязкость: 8.6627e-005 Па·с

Энтальпия: 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)

Изохорная теплоемкость: 3033.1 Дж/(кг)

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)  $\frac{b}{d_{ТВ}} > 1,2$

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

$\varepsilon$  - плотность решетки, равная отношению площади поперечного сечения, занятого стержнями, к полной площади поперечного сечения

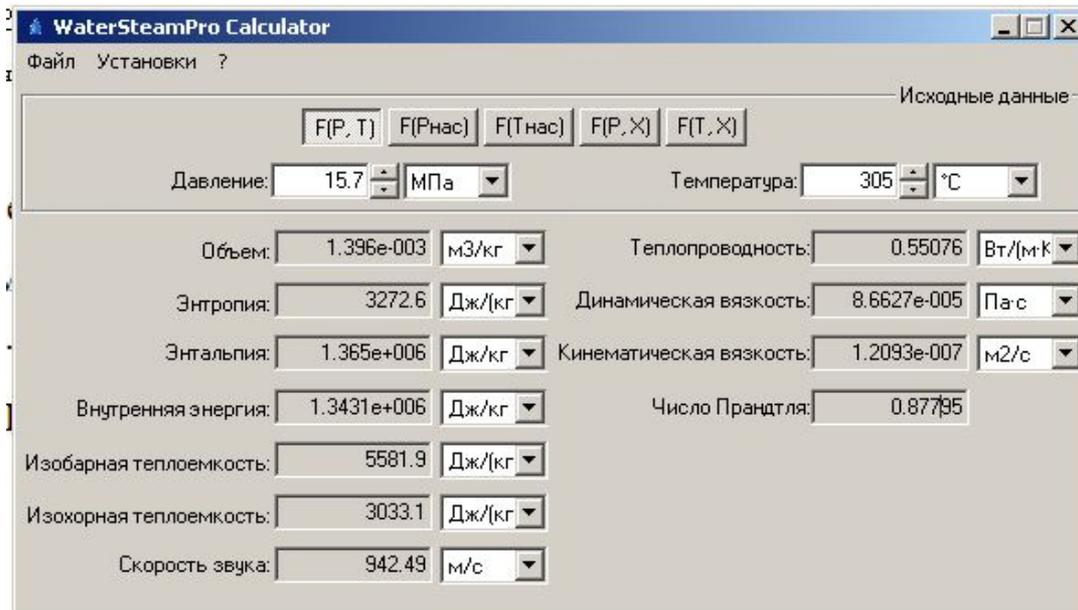
$$\text{Nu} = \frac{\alpha_{\text{конв}} \cdot d_{эф}}{\lambda} \quad \text{Re} = \left( \frac{G}{S_{\text{прох}} \cdot N_{\text{ТВС}}} \right) \cdot \frac{d_{эф}}{\mu}$$

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

$$d_{эф} = 5.386 \text{ мм}$$

Далее расчет идет по формулам для круглых труб

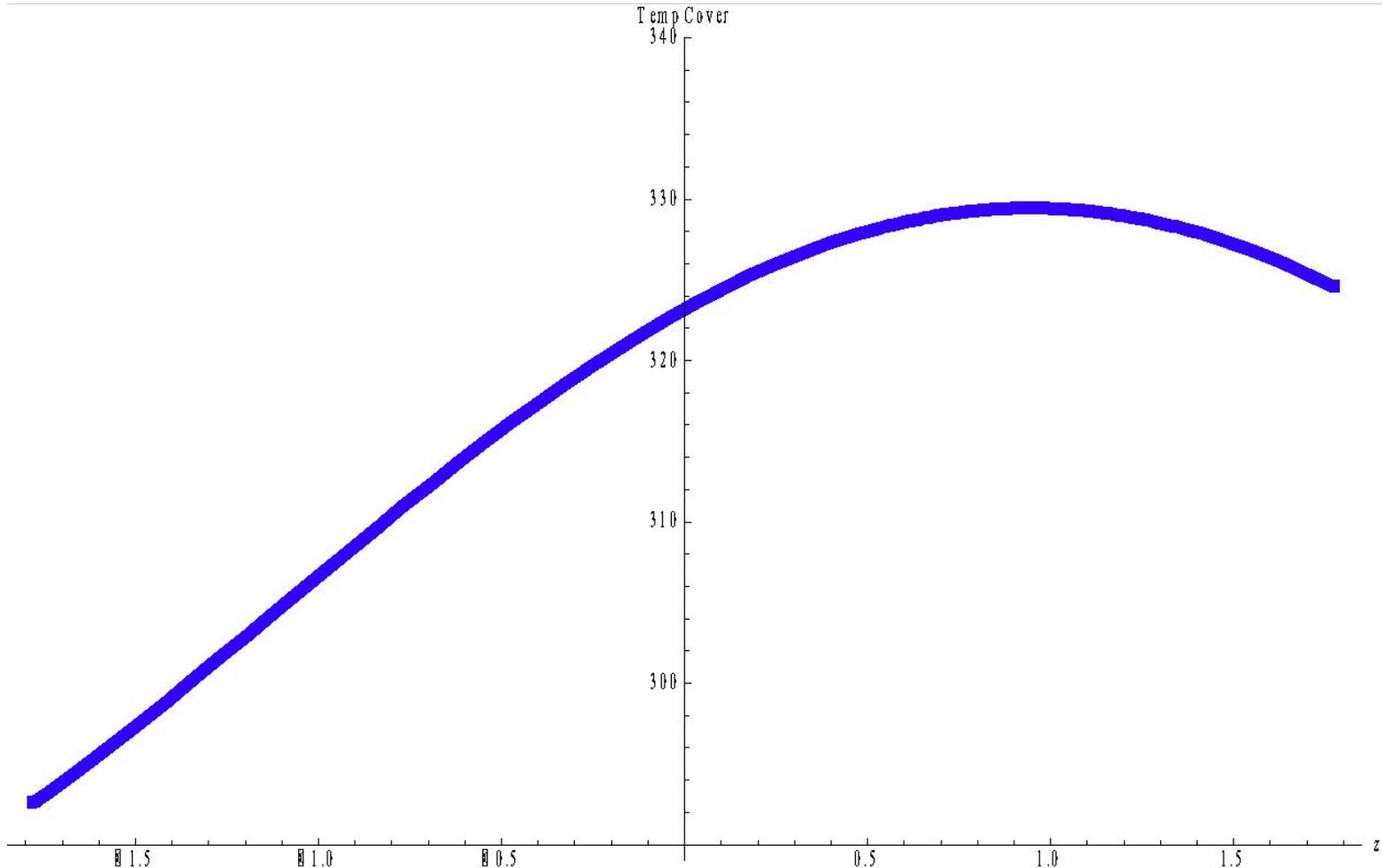
$$\alpha_{\text{конв}} = 43000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$$



# Температура поверхности оболочки ТВЭЛ

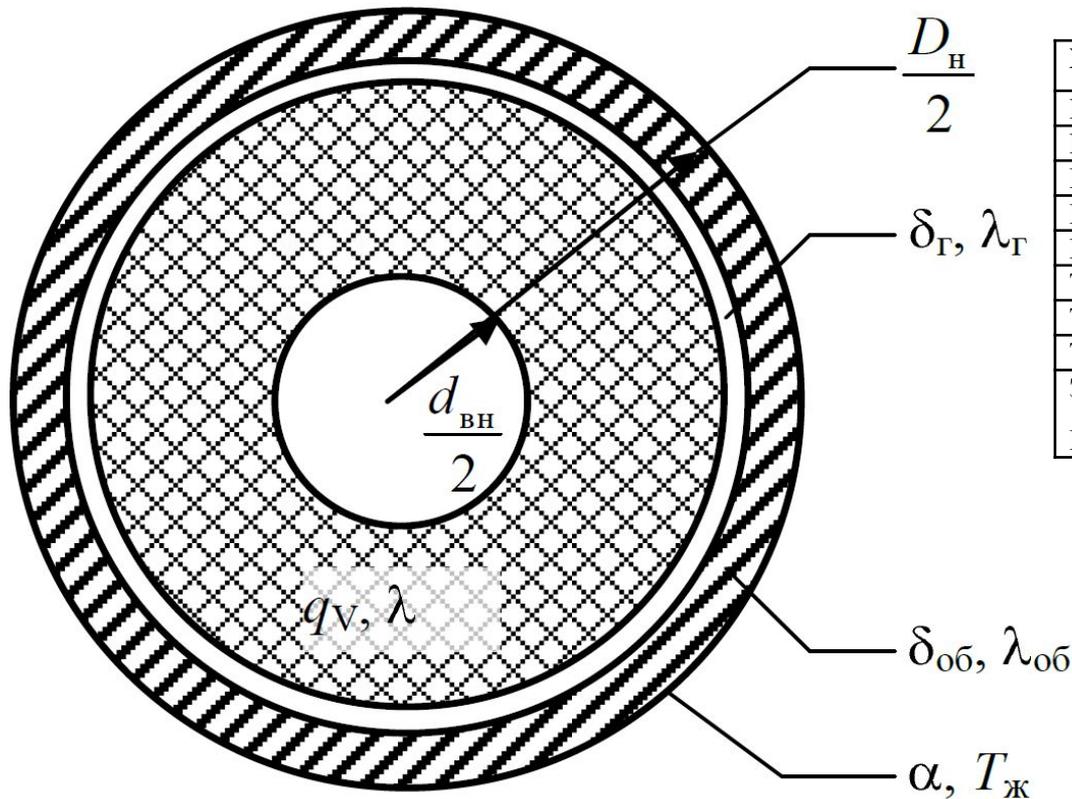
$$T_{об}(z) = T_{ж}(z) + \frac{q_l(z)}{\pi d_{ТВ} \cdot \alpha_{конв}}$$

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 <sub>2</sub> |
| 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 $\lambda_{\Gamma}$ , Вт/(м·К) | 0,35            |

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

# Максимальная температура топливной композиции

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

