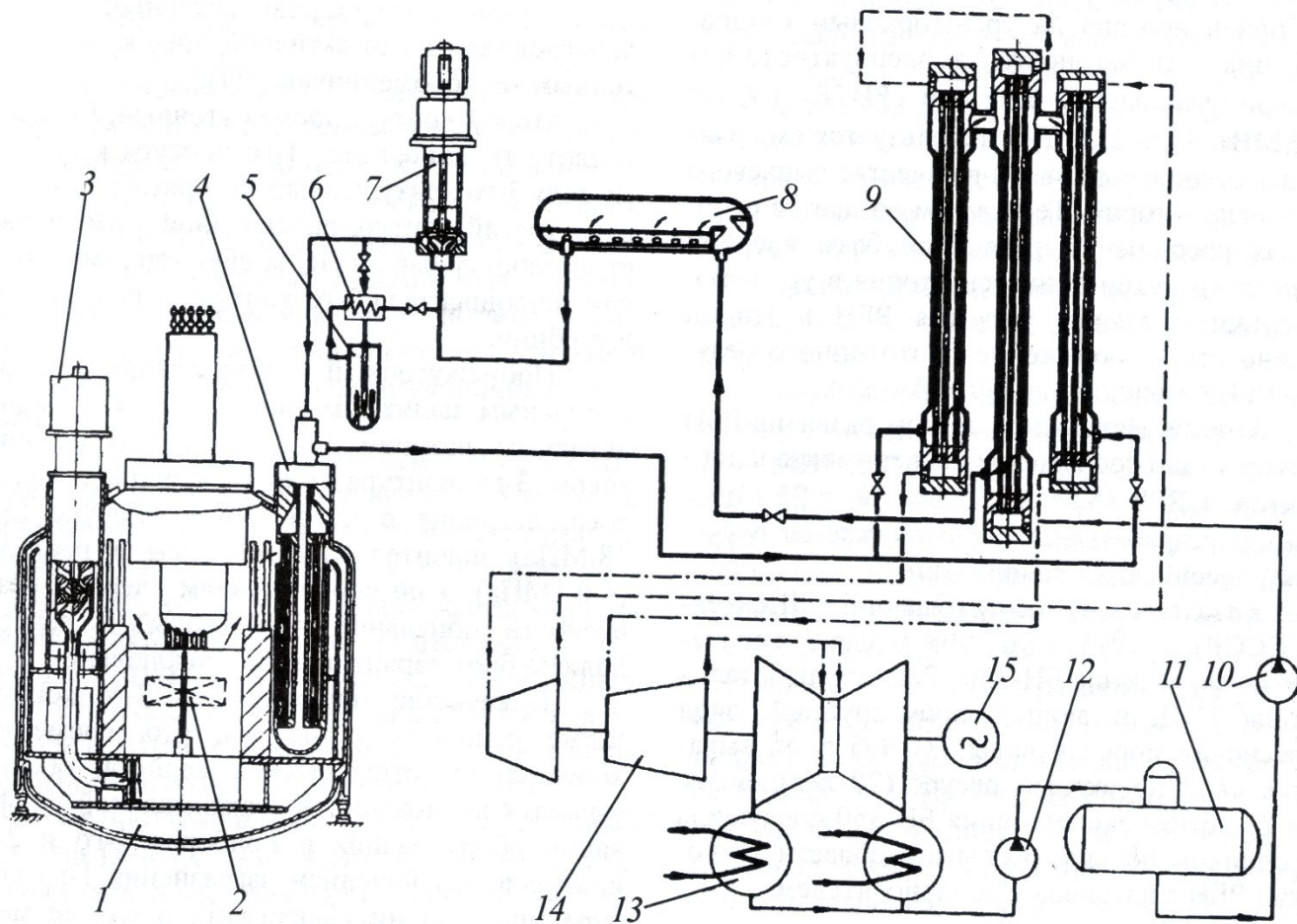


# Теплогидравлический расчет номинального режима работы реактора БН 600



# Интегральные параметры реактора

Тепловая мощность реактора  $Q = 1480$  МВт

По заданным в проекте  $T_{\text{вх}} = 377$  °C,  $T_{\text{вых}} = 550$  °C,

и давлению в активной зоне  $P = 0.14$  МПа расход теплоносителя в первом контуре

$$I_{\text{вх}}(377 \text{ °C}, 0.14 \text{ МПа}) = 0.4952 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$$

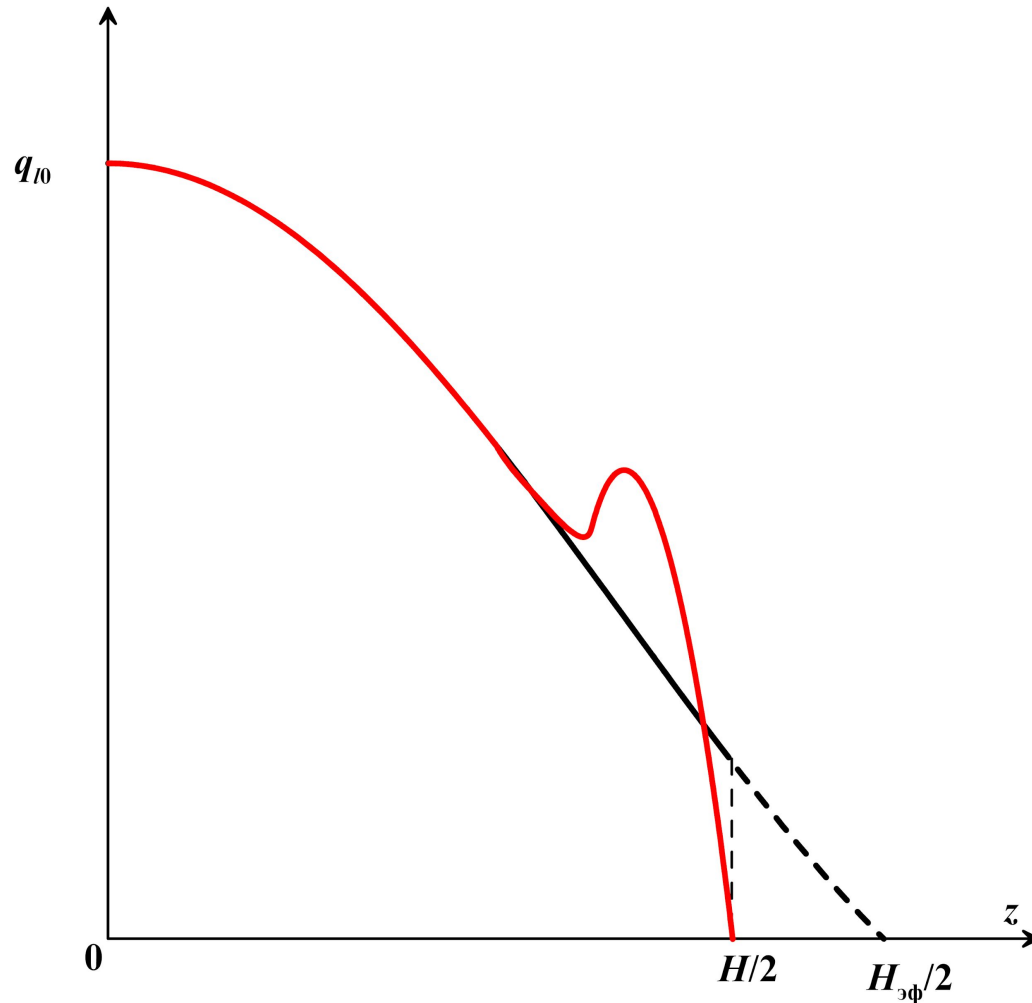
$$I_{\text{вых}}(550 \text{ °C}, 0.14 \text{ МПа}) = 0.7278 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$$

$$G = \frac{Q}{I_{\text{вх}}(377 \text{ °C}, 0.14 \text{ МПа}) - I_{\text{вых}}(550 \text{ °C}, 0.14 \text{ МПа})} = 6363 \text{ кг/с}$$

# Функция тепловыделения

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

$H = 0.75$  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,  $K_z = 1.25$ .

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

после интегрирования

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

$$H_{\text{эф}} = 1.04 \text{ м}$$

## Функция тепловыделения

Величина  $q_{l0}$  определяется на один твэл. По проекту количество тепловыделяющих сборок  $N_{\text{ТВС}} = 370$ , количество твэл в кассете  $N_{\text{ТВ}} = 127$ .

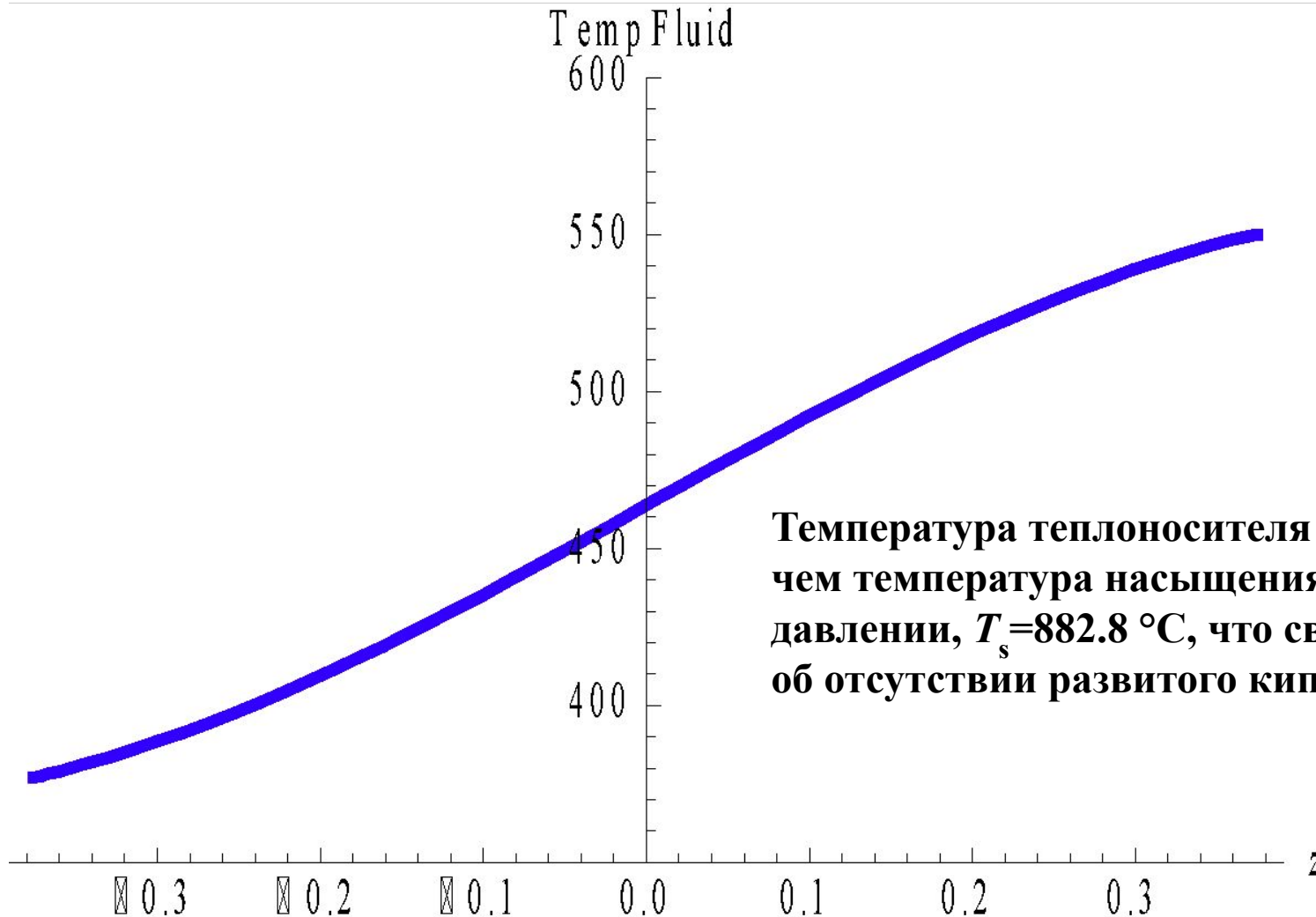
$$\frac{Q}{N_{\text{ТВС}} N_{\text{ТВ}}} = \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} q_{l0} \cos\left(\frac{\pi z}{H_{\text{эф}}}\right) dz$$

$$q_{l0} = 52530,0 \text{ Вт/м}$$

# Температура теплоносителя по высоте активной зоны

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

$$\langle c_p \rangle = \frac{I_{\text{ВЫХ}} - I_{\text{ВХ}}}{T_{\text{ВЫХ}} - T_{\text{ВХ}}} = 1344.51 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$



Температура теплоносителя везде меньше, чем температура насыщения при заданном давлении,  $T_s = 882.8 \text{ }^\circ\text{C}$ , что свидетельствует об отсутствии развитого кипения.

# Гидравлические характеристики кассеты

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

В реакторе используются шестигранные кассеты с размером «под ключ» 96 мм и толщиной стенки 1.0 мм, в кассете находятся 127 тепловыделяющих элементов диаметром 6.9 мм.

$$S_{\text{прох}} = \frac{\sqrt{3}(96 - 2 \cdot 1)^2}{2} - 127 \frac{\pi 6.9^2}{4} = 2903.31 \text{ мм}^2$$

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

$$\Pi_{\text{смач}} = \frac{6 \cdot (96 - 2 \cdot 1)}{\sqrt{3}} + 127 \cdot \pi \cdot 6.9 = 3078.6 \text{ мм}$$

$$d_{\Gamma} = \frac{4 \cdot S_{\text{прох}}}{\Pi_{\text{смач}}} = 3.77 \text{ мм.}$$

# Коэффициент теплоотдачи в режиме турбулентного стационарного течения несжимаемой жидкости

Лайон

$$Re \in [10^4; 5 \cdot 10^6], \quad Pr \ll 1.$$

$$Nu = 7 + 0.025 \cdot Re^{0.8}$$

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

Свойства натрия при средних давлении и температуре в реакторе

$$\rho = 905.7 \text{ кг/м}^3;$$

$$Re = \left( \frac{G}{S_{\text{прох}} \cdot N_{\text{ТВС}}} \right) \cdot \frac{d_{\Gamma}}{\mu} = 4.69 \cdot 10^4$$

$$\mu = 7.763 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$Pe = Re \cdot Pr = 367$$

$$\lambda = 81.74 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)};$$

$$\alpha_{\text{конв}} = 213000 \text{ Вт/(м}^2 \text{ К)}$$

$$Pr = 7.828 \cdot 10^{-3}.$$



# Коэффициент теплоотдачи в режиме турбулентного стационарного течения несжимаемой жидкости

Субботин

$$Re \in [10^4; 5 \cdot 10^6], \quad Pr \ll 1.$$

$$Nu = 5 + 0.025 \cdot Re^{0.8}$$

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

Свойства натрия при средних давлении и температуре в реакторе

$$\rho = 905.7 \text{ кг/м}^3;$$

$$Re = \left( \frac{G}{S_{\text{прох}} \cdot N_{\text{ТВС}}} \right) \cdot \frac{d_{\Gamma}}{\mu} = 4.69 \cdot 10^4$$

$$\mu = 7.763 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$Pe = Re \cdot Pr = 367$$

$$\lambda = 81.74 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)};$$

$$\alpha_{\text{конв}} = 169000 \text{ Вт/(м}^2 \text{ К)}$$

$$Pr = 7.828 \cdot 10^{-3}.$$

# Коэффициент теплоотдачи в режиме турбулентного стационарного течения несжимаемой жидкости

Чистые металлы

$$Re \in [3 \cdot 10^3; 10^6] \quad Pe < 2 \cdot 10^4.$$

$$Nu = 4.82 + 0.0185 \cdot Pe^{0.8} \quad Nu = \frac{\alpha_{\text{конв}} \cdot d_{\Gamma}}{\lambda}$$

Свойства натрия при средних давлении и температуре в реакторе

$$\rho = 905.7 \text{ кг/м}^3;$$

$$Re = \left( \frac{G}{S_{\text{прох}} \cdot N_{\text{ТВС}}} \right) \cdot \frac{d_{\Gamma}}{\mu} = 4.69 \cdot 10^4$$

$$\mu = 7.763 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$Pe = Re \cdot Pr = 367$$

$$\lambda = 81.74 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)};$$

$$\alpha_{\text{конв}} = 157000 \text{ Вт/(м}^2 \text{ К)}$$

$$Pr = 7.828 \cdot 10^{-3}.$$

# Коэффициент теплоотдачи в режиме турбулентного стационарного течения несжимаемой жидкости в продольно омываемых пучках стержней

$$Nu = 24.15 \cdot (-8.12 + 12.76 \cdot s - 3.65 \cdot s^2) +$$

$$0.0174 \cdot (1 - \text{Exp}[-6(s - 1)]) \cdot (Pe - 200)^{0.8}$$

Свойства натрия при средних давлении и температуре в реакторе

$$Pr \ll 1, \quad 1.1 < s = \frac{b}{d_{\text{ТВЭЛ}}} 1.5.$$

$$\rho = 905.7 \text{ кг/м}^3;$$

$$Nu = \frac{\alpha_{\text{КОНВ}} \cdot d_{\Gamma}}{\lambda} \quad Pe = Re \cdot Pr = 367$$

$$\mu = 7.763 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$s = \frac{7.95}{6.9} = 1.15.$$

$$\lambda = 81.74 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)};$$

$$\alpha_{\text{КОНВ}} = 178000 \text{ Вт/(м}^2 \text{ К)}$$

$$Pr = 7.828 \cdot 10^{-3}.$$

# **Коэффициент теплоотдачи в режиме турбулентного стационарного течения несжимаемой жидкости в продольно омываемых пучках стержней**

$$Nu = 6 + 0.006 \cdot Pe$$

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

**Свойства натрия при средних давлении и температуре в реакторе**

$$\rho = 905.7 \text{ кг/м}^3;$$

$$Re = \left( \frac{G}{S_{\text{прох}} \cdot N_{\text{ТВС}}} \right) \cdot \frac{d_{\Gamma}}{\mu} = 4.69 \cdot 10^4$$

$$\mu = 7.763 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$Pe = Re \cdot Pr = 367$$

$$\lambda = 81.74 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)};$$

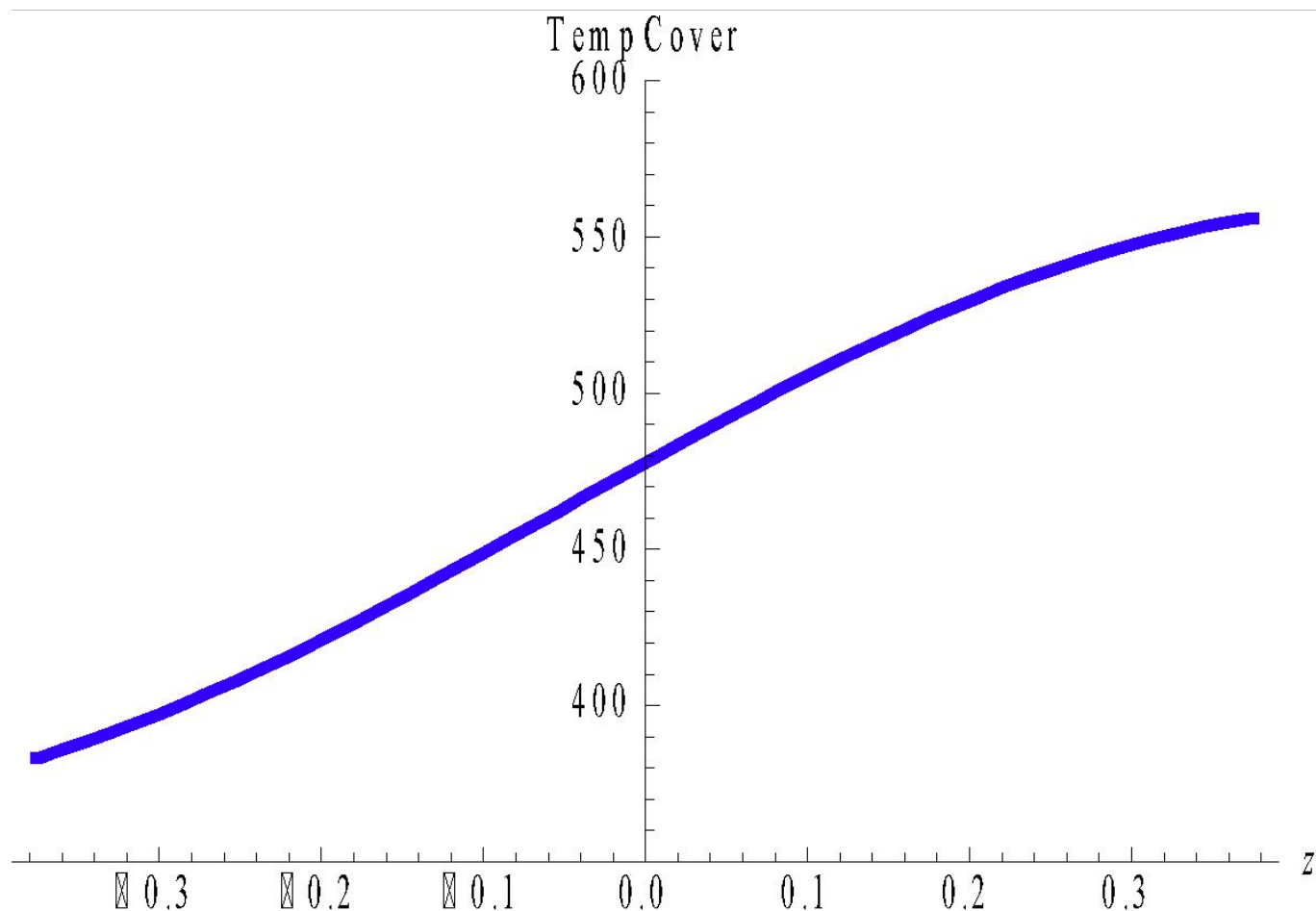
$$\alpha_{\text{КОНВ}} = 148000 \text{ Вт/(м}^2 \text{ К)}$$

$$Pr = 7.828 \cdot 10^{-3}.$$

# Температура поверхности оболочки ТВЭЛ

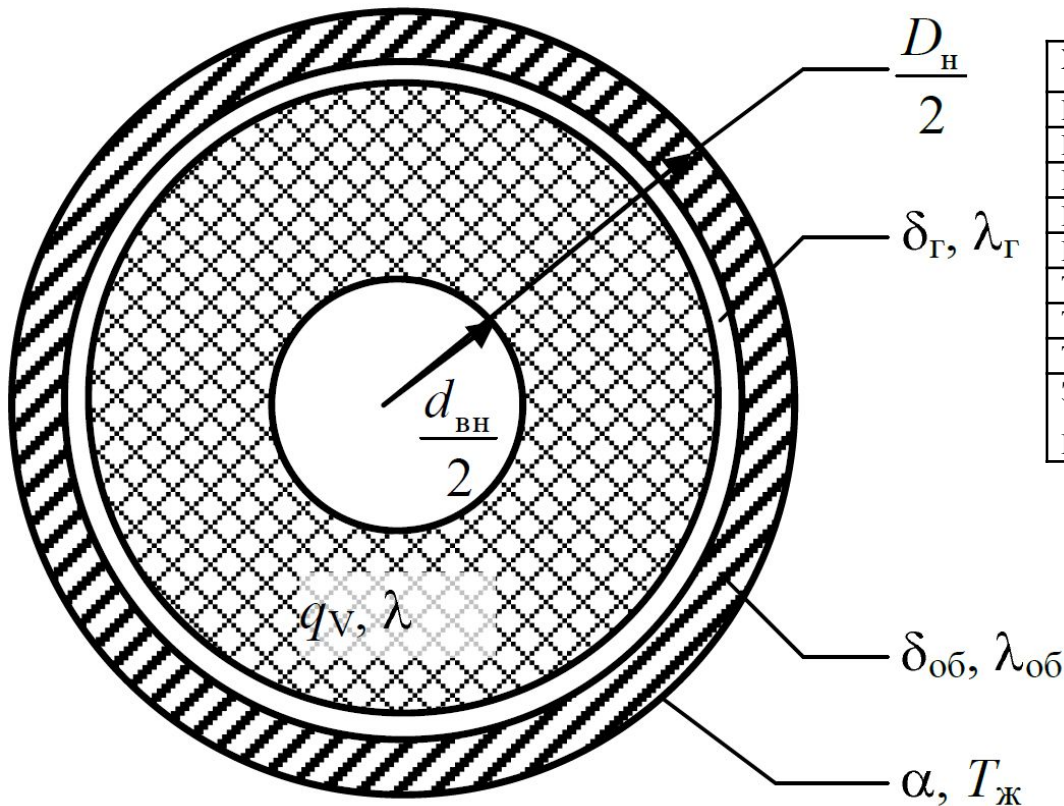
$$T_{об}(z) = T_{ж}(z) + \frac{q_l(z)}{\pi d_{ТВ} \cdot \alpha_{конв}}$$

В среднем коэффициент теплоотдачи  
 $\alpha_{конв} = 173000 \text{ Вт/(м}^2 \text{ К)}$



# Максимальная температура топливной композиции

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



| Характеристики ТВЭЛ                                                 |                 |
|---------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Материал топлива                                                    | UO <sub>2</sub> |
| Материал оболочки                                                   | сталь           |
| Внешний диаметр твэла $d_{\text{ТВ}}$ , мм                          | 6,9             |
| Внешний диаметр топливной таблетки $d_{\text{ТОП}}$ , мм            | 6,0             |
| Внутренний диаметр топливной таблетки $d_{\text{ВН}}$ , мм          | 1,8             |
| Теплопроводность топлива $\lambda_{\text{топ}}$ , Вт/(м·К)          | 3,0             |
| Толщина оболочки $\delta_{\text{об}}$ , мм                          | 0,4             |
| Теплопроводность оболочки $\lambda_{\text{об}}$ , Вт/(м·К)          | 21,7            |
| Эффективная теплопроводность зазора $\lambda_{\text{Г}}$ , Вт/(м·К) | 0,35            |

$$R_{\text{терм}} = 0.0286289 \text{ (м К)/Вт}$$

# Максимальная температура топливной композиции

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

