

**Национальный исследовательский ядерный  
университет «МИФИ»**

# **КУРСОВОЙ ПРОЕКТ**



**Группа: С15-161**

**Студент: Сойтюрк Энес**

**Преподаватель: Маслов Юрий Александрович**

**2020**

# ВВЭР-1500

## I. СХЕМА И СТРУКТУРА

### ВВЭР-1500 (Водо-Водяной Энергетический Реактор)

водо-водяной корпусной энергетический ядерный реактор с водой под давлением, представитель одной из наиболее удачных ветвей развития ядерных энергетических установок, имеющий **1500мВт электрическую мощность**.

В реакторе ВВЭР-1500 сохранены принципиальные решения, ставшие традиционными для ВВЭР:

1. двухрядное расположение патрубков для присоединения главных циркуляционных трубопроводов;
2. опорой реактора является цилиндрический бурт на нижней обечайке зоны патрубков;
3. днище корпуса имеет эллиптическую форму;
4. нижняя часть корпуса (от входных патрубков Ду 850 и ниже) «гладкая», без каких-либо врезок;
5. система внутриреакторного контроля (температурного и энерговыделения) komponуется на съемном верхнем блоке (крышке) реактора;
6. применение днища шахты в виде эллипсоида, перфорированного большим количеством отверстий малого диаметра, обеспечивает, в сочетании с профилированным зазором между днищем шахты и днищем корпуса, равномерное распределение теплоносителя на входе в активную зону, исключение существенных динамических воздействий во входном гидравлическом тракте реактора.

## Корпус:

Корпус представляет собой вертикальный цилиндр с эллиптическим днищем, внутри которого размещаются активная зона и внутри корпусные устройства (ВКУ). Он состоит из фланца, двух обечаек зоны патрубков, опорной обечайки, двух цилиндрических обечаек и днища, соединённых между собой кольцевыми сварными швами.

$$t_{\text{вх}} = 297.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$t_{\text{вых}} = 330 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$N_{\text{ТВС}} = 241 \text{ - количество ТВС}$$

$$N_{\text{ТВЭЛ}} = 317 \text{ - количество ТВЭлов в 1 ТВС}$$

$$P = 15.7 \text{ МПа}$$

$$H = 4.2 \text{ м - Высота топливного столба}$$

$$K_z = 1.5 \quad K_r = 1.3$$

ТВЭЛ представляет собой герметичную трубку из циркония, легированного ниобием для увеличения пластичности. Температура плавления материала около  $1900 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , при температуре выше  $350 \text{ }^{\circ}\text{C}$  прочностные свойства ухудшаются. Толщина оболочки  $0.65 \text{ мм}$ , наружный диаметр трубки  $9.1 \text{ мм}$ . Давление  $15.7 \text{ МПа}$

<https://leg.co.ua/arhiv/generaciya/reaktornye-ustanovki-vver-dlya-aes-59.html>

## Парогенератор:

Парогенератор предназначен для передачи энергии, произведённой в активной зоне реактора, во второй контур.

Давление  $7.34 \text{ МПа}$

Температура на выходе из парогенератора  $289^{\circ}\text{C}$

## **Турбина:**

Количество 3

Мощность турбина = 500 МВт

Тип: K500-60/1500

(<https://leg.co.ua/arhiv/generaciya/atomnye-elektricheskie-stancii-i-ih-oborudovanie-24.html>)

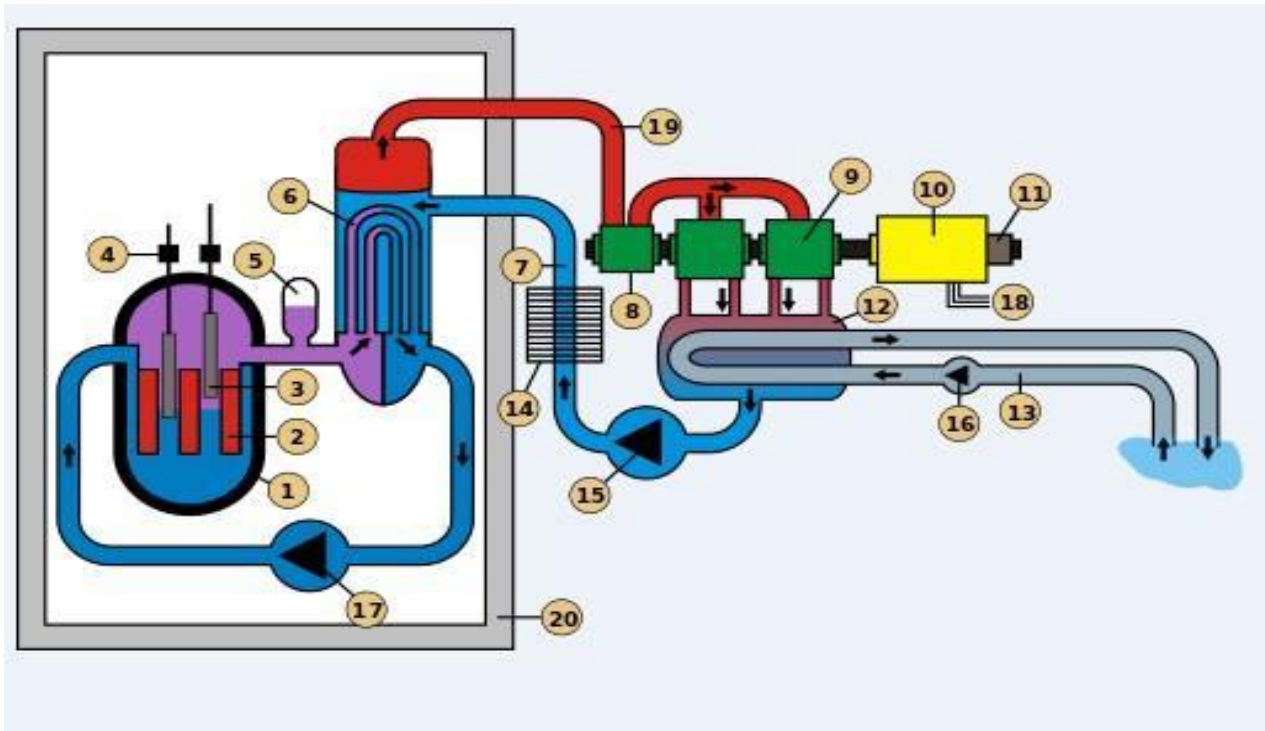
Температура на входе:  $T_c = 274.3^\circ\text{C}$

Давление:  $P_c = 5.9 \text{ Мпа}$

$T_{\text{пар}} = 205^\circ\text{C}$  ,  $p_{\text{пар}} = 1.2 \text{ Мпа}$

**Конденсатор:**  $T_k = 27^\circ\text{C}$

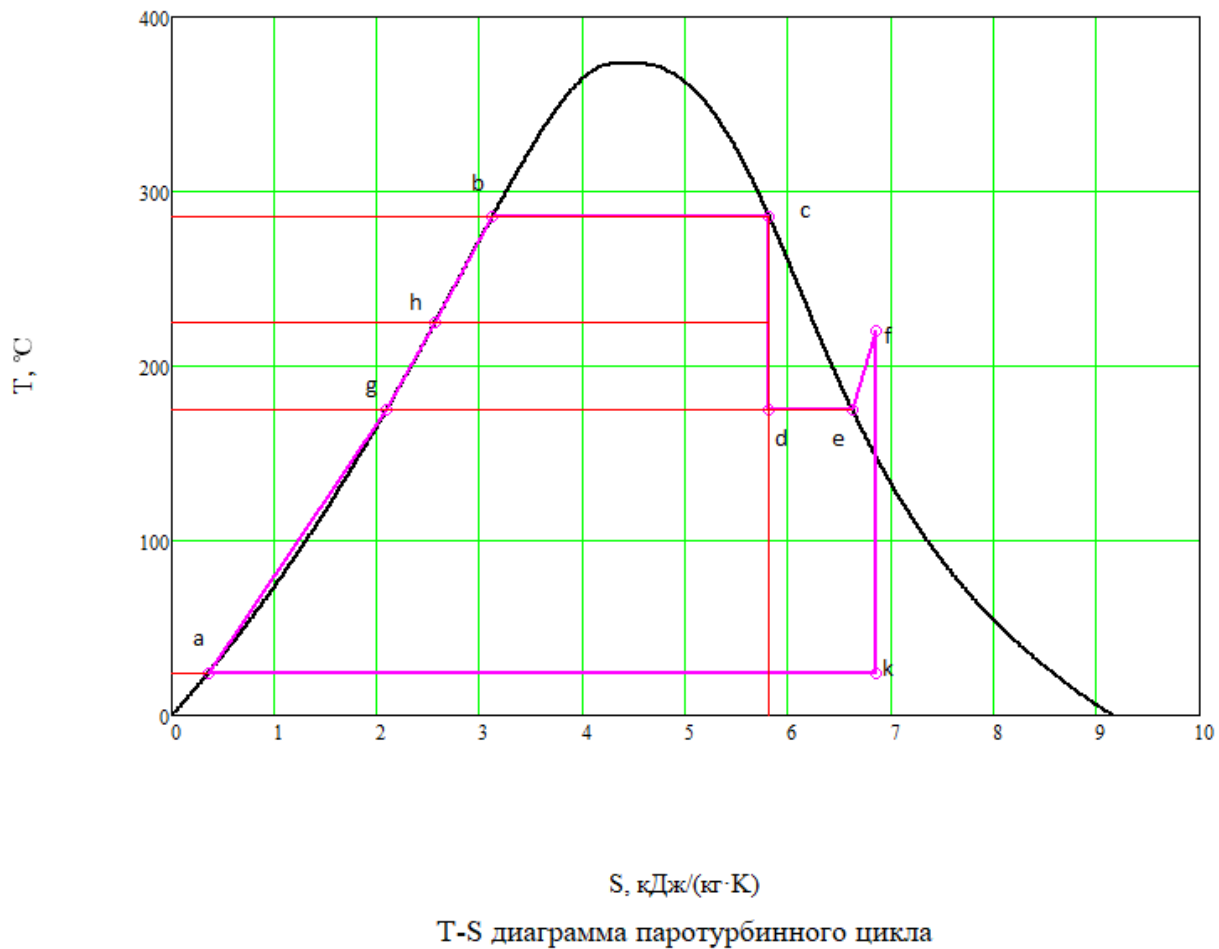
## Схема



1 — реактор,  
 2 — топливо,  
 3 — регулирующие стержни,  
 4 — приводы СУЗ,  
 5 — компенсатор давления,  
 6 — теплообменные  
 трубки парогенератора,  
 7 — подача питательной  
 воды в парогенератор,  
 8 — цилиндр высокого  
 давления турбины,  
 9 — цилиндр низкого  
 давления турбины,  
 10 — генератор,

11 — возбудитель,  
 12 — конденсатор,  
 13 — система  
 охлаждения  
 конденсаторов  
 турбины,  
 14 — подогреватели,  
 15 — турбопитательный насос,  
 16 — циркуляционный насос,  
 17 — главный циркуляционный  
 насос,  
 18 — подключение генератора к  
 сети,  
 19 — подача пара на турбину,  
 20 — гермооболочка

## II. КПД и ТЕПЛОВАЯ МОЩНОСТЬ.



В точки f:  $T_f = T_{\text{пар}} = 205^\circ\text{C}$ ,  $p_f = p_{\text{пар}} = 1.2 \text{ МПа}$

$$i_f = 2828.821 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}, S_f = 6.6177 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

В точки k:  $T_k = 27^\circ\text{C}$ ,  $p'_k = 3567.892 \text{ Па}$

$$i_{k'} = 113.202 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}, S_{k'} = 0.3952 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

В точки c:  $T_c = T_0 = 274.3^\circ\text{C}$

$$i_c = 2785.826 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}, S_c = 5.8994 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

В точки e :  $p_e = p_f = 1.2 \text{ МПа}$  ,  $T_e = 187.965^\circ\text{C}$

$$i_e = 2783.769 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} , S_e = 6.5217 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

В точки g :  $T_g = T_e = 187.965^\circ\text{C}$

$$i_g = 798.499 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} , S_g = 2.2163 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

В точки h :  $T_h = T_{\text{пв}} = 230^\circ\text{C}$

$$i_h = 990.21 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} , S_h = 2.6102 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$1. \quad x_d = \frac{S_c - S_g}{S_e - S_g} = \frac{5.899 - 2.216}{6.522 - 2.216} = 0.855$$

2. Термический КПД без регенеративных отборов:

$$\eta_t^0 = 1 - \frac{T_k(S_f - S_{k'})x_d}{(i_c - i_g) + ((i_g - i_{k'}) + (i_f - i_e)x_d)}$$

$$\eta_{t0} = 1 - \frac{300.1 \cdot (6.618 - 0.395) \cdot 0.855}{2786.0 - 798.5 + [798.5 - 113.2 + (2828.8 - 2783.8)] \cdot 0.855} = 0.3887$$

$$= 0.3887$$

3. Термический КПД при бесконечном числе регенеративных отборов:

$$\eta_t^\infty = 1 - \frac{T_k(S_c - S_h)(S_f - S_g)}{(S_e - S_g)(i_c - i_h) + (S_c - S_h)(i_f - i_e)}$$

$$1 - \frac{300.1 \cdot (5.899 - 2.61) \cdot (6.618 - 2.216)}{(6.522 - 2.216) \cdot (2786.0 - 990.21) + (5.899 - 2.61) \cdot (2828.8 - 2783.8)}$$

$$\eta_t^\infty = 0.4487$$

4. Термический КПД при  $n$  регенеративных отборах( $n=7$ ):

$$\begin{aligned}\eta_t^7 &= \eta_t^0 + (\eta_t^\infty - \eta_t^0) \frac{7}{(7+1)} \\ &= 0.3887 + (0.4487 - 0.3887) \frac{7}{(7+1)} \\ &= 0.441\end{aligned}$$

5. Вычисляем КПД брутто АЭС

$$\begin{aligned}\eta_{\text{ос}} &= 98\%, \eta_{\text{эг}} = 98\%, \eta_{\text{мех}} = 97\%, \eta_{i0} = 85\% \\ \eta_{\text{бр}} &= \eta_t^7 \cdot \eta_{\text{ос}} \cdot \eta_{\text{эг}} \cdot \eta_{\text{мех}} \cdot \eta_{i0} \\ &= 0.441 \cdot 0.85 \cdot 0.98 \cdot 0.97 \cdot 0.98\end{aligned}$$

$$\eta_{\text{бр}} = \mathbf{0.3494}$$

6. Тепловая мощность

$$Q = \frac{W}{\eta_{\text{бр}}} = \frac{1500}{0.3494} = \mathbf{4293 \text{ МВт}}$$

### III. Температура теплоносителя, оболочки и топлива

$$t_{\text{вх}} = 297.6 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow h'_{\text{вх}} = 1324,44 \frac{\text{КДж}}{\text{Кг}}$$

$$t_{\text{вых}} = 330 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow h'_{\text{вых}} = 1516,57 \frac{\text{КДж}}{\text{Кг}}$$

$$N_{\text{ТВС}} = \mathbf{241} - \text{количество ТВС}$$

$$N_{\text{ТВЭЛ}} = \mathbf{317} - \text{количество ТВЭЛОВ в 1 ТВС}$$

$$P = 15,7 \text{ Мпа} \rightarrow T_s = 345.83 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$H = \mathbf{4.2 \text{ м}} - \text{Высота топливного столба}$$



$$K_z = 1,5 \quad K_r = 1,3$$

$$C_p = \frac{\Delta h}{\Delta T} = \frac{(1516,57 - 1324,44) \cdot 10^3}{330 - 297,6} = \mathbf{5929,94} \frac{\text{Дж}}{\text{Кг.К}}$$

$$G = \mathbf{22344,24} \text{ Кг/с} \quad (Q = \mathbf{4293} \text{ МВт} \rightarrow G = \frac{Q}{\Delta T \cdot C_p} = \frac{4293 \cdot 10^6}{5929,94 \cdot 32,4} = 22344,24)$$

$$k_z = \mathbf{1.5}$$

$$k_r = \mathbf{1.33}$$

$$q_0 = k_z k_r \bar{q}_l = k_z k_r \frac{Q}{N_{\text{ТВС}} N_{\text{ТВЭЛ}} H} = 1,5 \cdot 1,33 \cdot \frac{4293 \cdot 10^6}{241 \cdot 317 \cdot 4,2} = 26,69 \cdot 10^3 \left( \frac{\text{Вт}}{\text{м}} \right)$$

$$H_{\text{эфф}} = ?$$

$$k_z \sin \frac{\pi H}{2 H_{\text{эфф}}} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{H}{H_{\text{эфф}}} \quad \varepsilon = \frac{\pi H}{2 H_{\text{эфф}}}$$

$$\rightarrow k_z \sin \varepsilon = \varepsilon$$

$$\rightarrow \varepsilon = 1,496 = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{4,2}{H_{\text{эфф}}}$$

$$\rightarrow \mathbf{H_{эфф} = 4.41 \text{ м}}$$

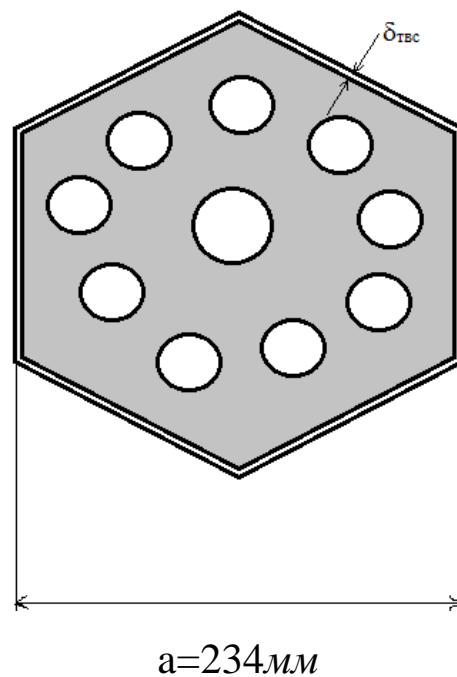
$$T_{\text{тепл}} = T_{\text{вх}} + \frac{T_{\text{ТВС}} N_{\text{ТВЭЛ}}}{G C_p} \int_{-\frac{H}{2}}^z q_{l0} \cos \frac{\pi z}{H_{\text{эфф}}} dz$$

$$= 297.6 + \frac{241.317}{22344.5930} \cdot \int_{-2,1}^z 26,69 \cdot 10^3 \cdot \cos \frac{\pi z}{4,41} dz$$

$$T_{\text{тепл}}(0) = 319.146^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{тепл}}\left(\frac{H}{2}\right) = 340.692^{\circ}\text{C}.$$

$$T_{\text{об}} = ?$$



$$d_{\text{ТВЭЛ}} = 9,1 \text{ мм}$$

$$D_{\text{цтр}} = 10,3 \text{ мм}$$

$$D_{\text{Н,К}} = 12,6 \text{ мм}$$

$$N_{\text{Н,К}} = 12$$

$$\delta_{\text{ТВС}} = 1,5 \text{ мм}$$

$$F_1 = 12 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{a}{2}\delta\right) \cdot \left(\frac{a-2\delta}{2\sqrt{3}}\right) = 46211 \text{ мм}^2 \text{ -площадь ТВС}$$

$$F = F_1 - \frac{\pi}{4} (N_{\text{ТВЭЛ}} d_{\text{ТВЭЛ}}^2 + D_{\text{цтр}}^2 + N D_{\text{НК}}^2) = 24000,6 (\text{мм}^2)$$

$$\begin{aligned} \Pi &= (2(a - 2\delta)\sqrt{3}) + \pi d_{\text{ТВЭЛ}} N_{\text{ТВЭЛ}} + \pi D_{\text{цтр}} + \pi D_{\text{НК}} N_{\text{НК}} \\ &= 10370 (\text{мм}) \end{aligned}$$

$$d_{\Gamma} = \frac{4F}{\Pi} = 9,26 \text{ мм}$$

$$T_{\text{об}}(z) = T(z) + \frac{q_{\text{л0}} \cos \frac{\pi z}{H_{\text{эфф}}}}{\pi d_{\text{ТВЭЛ}} \alpha}$$

$$\rightarrow T_{\text{об}}(z) = T_{\text{вх}} + \frac{N_{\text{ТВС}} T_{\text{ТВЭЛ}}}{G C_p} \int_{-\frac{H}{2}}^z q_{\text{л0}} \cos \frac{\pi z}{H_{\text{эфф}}} dz + \frac{q_{\text{л0}} \cos \frac{\pi z}{H_{\text{эфф}}}}{\pi d_{\text{ТВЭЛ}} \alpha} .$$

$$\boxed{\alpha = ?}$$

$$Nu = \frac{\alpha d_{\Gamma}}{\lambda}; \quad Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4}$$

$$Re = \frac{G}{F} \frac{d_{\Gamma}}{\mu N_{\text{ТВС}}}$$

$$\bar{T} = \frac{297,6 + 340,692}{2} = 319,146(^{\circ}\text{C}), \quad P = 15,7 \text{ МПа}$$

$$\rightarrow \mu = 8,09 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$$

$$\rho = 682,98 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$\nu = 1,1845 \cdot 10^{-7} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$$

$$\lambda = 531 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

$$Pr = 0,9274$$

$$Re = \frac{22344}{24000 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{9,26 \cdot 10^{-3}}{0,809 \cdot 10^{-4} \cdot 241} = 4,4217 \cdot 10^5$$

$$Nu = 0,023 \cdot (4,4217 \cdot 10^5)^{0,8} \cdot 0,9274^{0,4} = 733$$

$$\rightarrow \alpha_{\text{кон}} = \frac{Nu \lambda}{d_r} = \frac{733 \cdot 531 \cdot 10^{-3}}{9,26 \cdot 10^{-3}} = \mathbf{4,2032 \cdot 10^4} \cdot \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

$$z_{06}^{\max} = ?$$

$$\frac{dT_{06}(z)}{dz} = 0$$

$$\begin{aligned} \rightarrow z_{06}^{\max} &= \frac{H_{\text{эфф}}}{\pi} \arctg \left( \frac{N_{\text{ТВС}} N_{\text{ТВЭЛ}}}{G C_p} \cdot \frac{H_{\text{эфф}}}{\pi} \cdot \pi d_{\text{ТВЭЛ}} \alpha \right) \\ &= \frac{4,41}{\pi} \arctg \left( \frac{241 \cdot 317}{22344 \cdot 5930} \cdot \frac{4,41}{\pi} \cdot \pi \cdot 9,1 \cdot 10^{-3} \cdot 4,2032 \cdot 10^4 \right) \end{aligned}$$

$$z_{06}^{\max} = \mathbf{1.083(\text{м})}$$

$$I, T_{06}(z) = T(z) + \frac{q_{l0} \cdot \cos \frac{\pi z}{H_{\text{эфф}}}}{\pi d \cdot \alpha_{\text{кон}}}$$

$$\alpha_{\text{кон}} = 4,2032 \cdot 10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

$$\begin{aligned} II, T_{06}(z) &= T_s(z) + \frac{1}{\sqrt{\alpha_{\text{кип}}^2 + \alpha_{\text{кон}}^2}} \left[ \frac{q_{l0} \cdot \cos \frac{\pi z}{H_{\text{эфф}}}}{\pi d_{\text{ТВЭЛ}}} - \alpha_{\text{кон}} (T_s(z) - \right. \\ &\left. T(z)) \right] \end{aligned}$$

$$\alpha_{\text{кипения}} = 9 * \left( \frac{q_{\text{ло}} \cdot \cos \frac{\pi z}{H_{\text{эфф}}}}{\pi * d_{\text{ТВЭЛ}}} \right)^{0.7} \Big|_{z=1.083} = 10,77 \cdot 10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}}$$

$$\alpha = \sqrt[2]{(10,77 \cdot 10^4)^2 + (4,203 \cdot 10^4)^2} = 11,5 \cdot 10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}}$$

$$T_{\text{об}}(z_{\text{max}}) =$$

$$345,83 + \frac{1}{11,5 \cdot 10^4} \left[ \frac{26,69 \cdot 10^3 \cdot \cos \frac{\pi \cdot 1,083}{4,41}}{\pi \cdot 9,1 \cdot 10^{-3}} - 4,2032 \cdot 10^4 \cdot (345,83 - T(z_{\text{об}}^{\text{max}})) \right]$$

$$T_{\text{тепл}}(z_{\text{об}}^{\text{max}}) = 334,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Rightarrow T_{\text{об}}^{\text{max}} = 347,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{об}}^{\text{вых}} = 340,692 + \frac{26,69 \cdot 10^3 \cdot \cos \frac{\pi \cdot 2,1}{4,41}}{\pi \cdot 9,1 \cdot 10^{-3} \cdot 4,203 \cdot 10^4} = 342,35 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{об}} = T_{\text{вх}} + \frac{N_{\text{ТВС}} N_{\text{ТВЭЛ}}}{G \cdot C_{\text{Р}}} \int_{-\frac{H}{2}}^z q_{\text{ло}} \cdot \cos \frac{\pi z}{H_{\text{эфф}}} dz + \frac{q_{\text{ло}} \cdot \cos \frac{\pi z}{H_{\text{эфф}}}}{\pi d_{\text{ТВЭЛ}} \cdot \alpha} = T(s)$$

$$T_{\text{вх}} + \frac{N_{\text{ТВС}} N_{\text{ТВЭЛ}}}{G \cdot C_{\text{Р}}} q_{\text{ло}} \cdot \frac{H_{\text{эфф}}}{\pi} \left[ \sin \left( \frac{\pi z}{H_{\text{эфф}}} \right) + \sin \left( \frac{\pi H}{2 H_{\text{эфф}}} \right) \right] + \frac{q_{\text{ло}} \cdot \cos \frac{\pi z}{H_{\text{эфф}}}}{\pi d_{\text{ТВЭЛ}} \cdot \alpha} = T(s)$$

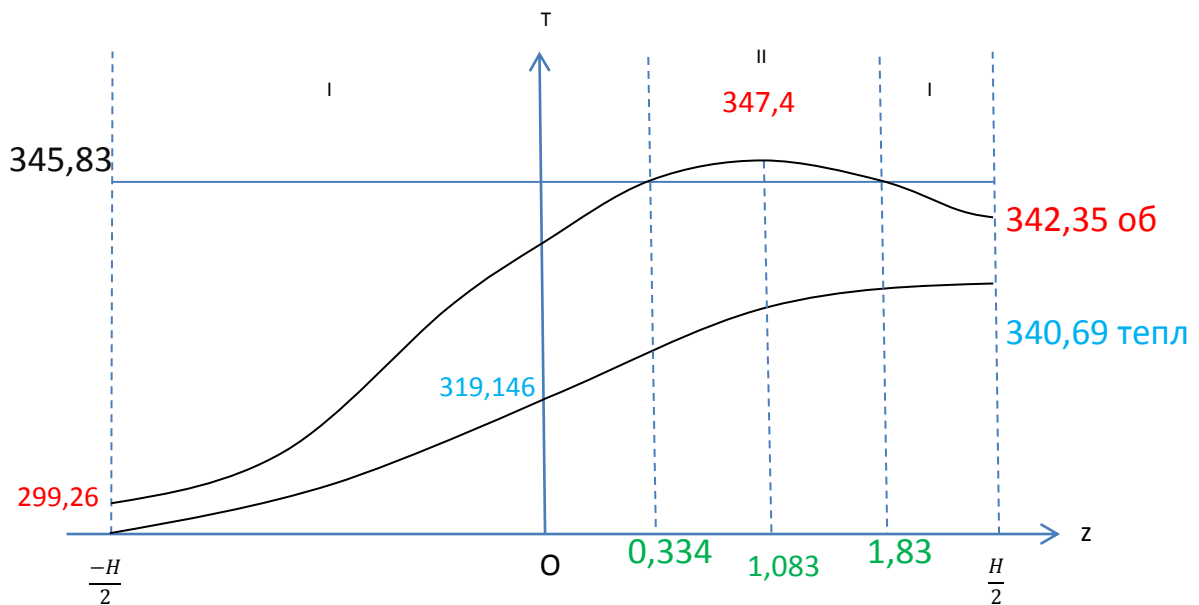
$$T_z(0) + \frac{N_{\text{ТВС}} N_{\text{ТВЭЛ}}}{G \cdot C_{\text{Р}}} q_{\text{ло}} \cdot \frac{H_{\text{эфф}}}{\pi} \cdot \sin x + \frac{q_{\text{ло}} \cdot \cos x}{\pi d_{\text{ТВЭЛ}} \cdot \alpha} = T(s)$$

$$319,146 + \frac{241.317}{G \cdot C_p} 26690 \cdot \frac{4,41}{\Pi} \cdot \sin x + \frac{26690 \cdot \cos x}{\pi \cdot 9,1 \cdot 42,032} = 345,83$$

$$\Rightarrow \begin{cases} x = 1.0346 = \frac{\pi z}{H_{\text{эфф}}} \rightarrow z_2 = 1.831 \text{ м} \\ x = 0.238 \rightarrow z_1 = 0.3341 \text{ м} \end{cases}$$

$$T_{\text{об}}(0) = 341,354^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{об}}(\text{вход}) = 299,26^\circ\text{C}$$



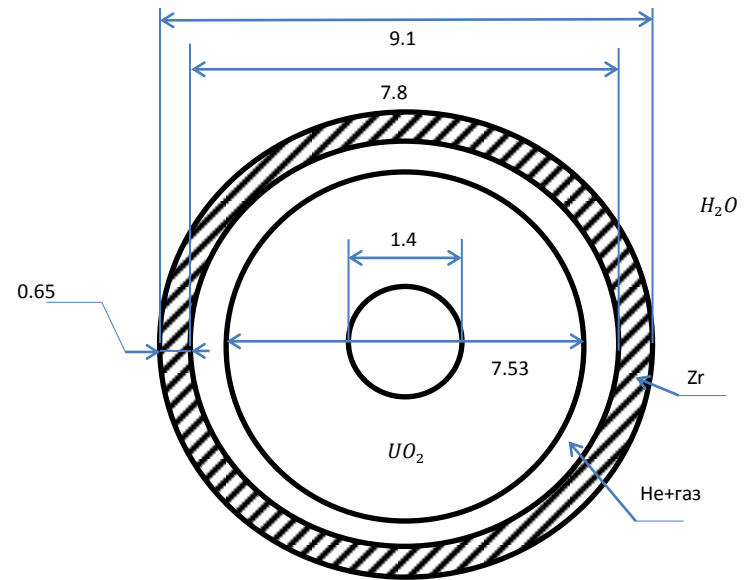
- $T_{\text{ТОПЛ}} = ?$

$$\lambda_{\text{об}} = 23 \frac{\text{Вт}}{\text{м.К}}$$

$$\lambda_{\text{газ}} = 0.35 \frac{\text{Вт}}{\text{м.К}}$$

$$\lambda_{\text{ТОПЛ}} = 3 \frac{\text{Вт}}{\text{м.К}}$$

$$d_{\text{об}} = 0,65 \text{ мм}$$



структура ТВЭЛ

$$\sum_{i=1}^4 R_i = \frac{1}{\pi d_{\text{ТВЭЛ}} \alpha} + \frac{\ln\left(\frac{d_{\text{ТВЭЛ}}}{d_{\text{ТВЭЛ}} - 2\delta_{\text{об}}}\right)}{2\pi\lambda_{\text{об}}} + \frac{\ln\left(\frac{d_{\text{ТВЭЛ}} - 2\delta_{\text{об}}}{d_{\text{ТОПЛ}}}\right)}{2\pi\lambda_{\text{газ}}} + \frac{\frac{1}{2} - \frac{d_{\text{отв}}^2}{d_{\text{ТОПЛ}}^2 - d_{\text{отв}}^2} \ln\left(\frac{d_{\text{ТОПЛ}}}{d_{\text{отв}}}\right)}{2\pi\lambda_{\text{ТОПЛ}}} = \mathbf{0.0412} \frac{\text{м}}{\text{Вт}}$$

$$T_{\text{ТОПЛ}}(z) = T_{\text{вх}} + \frac{N_{\text{ТВС}} N_{\text{ТВЭЛ}}}{G C_p} \int_{-\frac{H}{2}}^z q_{l0} \cos \frac{\pi z}{H_{\text{эфф}}} dz + q_{l0} \cos \frac{\pi z}{H_{\text{эфф}}} \sum_{i=1}^4 R_i$$

$$\begin{aligned} z_{\text{ТОП}}^{\text{max}} &= \frac{H_{\text{эфф}}}{\pi} \arctan \left( \frac{N_{\text{ТВС}} N_{\text{ТВЭЛ}}}{G C_p} \frac{H_{\text{эфф}}}{\pi} \frac{1}{\sum_{i=1}^4 R_i} \right) \\ &= \frac{4.41}{\pi} \arctan \left( \frac{241.317}{22344.5930} \frac{4.41}{\pi} \frac{1}{0.0412} \right) \end{aligned}$$

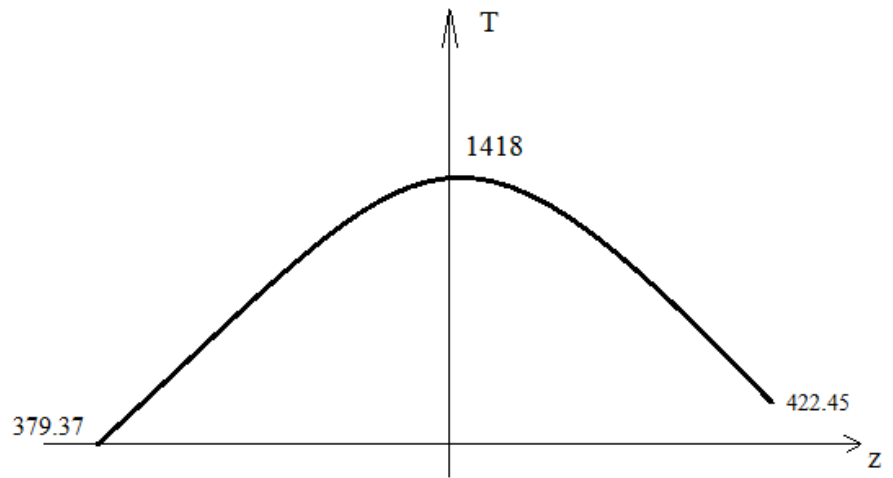
$$z_{\text{ТОП}}^{\text{max}} = 0.0365 \text{ м}$$

$$T_{\text{ТОП}}^{\text{max}}(z_{\text{ТОП}}^{\text{max}}) = 1418 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{ТОПЛ}}(0) = 1417.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{ТОП}}^{\text{ВХ}} = 379.77 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{ТОП}}^{\text{ВЫХ}} = 422.45 \text{ }^{\circ}\text{C}$$



Зависимость Температуры топлива от  $z$



#### IV. Коэффициент запаса

$$1, q_{kp} = 0,795 \cdot (1 - x)^{0,105p-0,5} \cdot (\rho w)^{0,184-0,311x} \cdot (1 - 0,0185p)$$

$$P=15,7 \text{ МПа}$$

$$\rho=682,98 \text{ КГ/М}^3$$

$$G=22344 \text{ КГ/с} = \rho \cdot w \cdot s \cdot N_{\text{ТВС}} \rightarrow \rho \cdot w = \frac{G}{s \cdot N_{\text{ТВС}}} = \frac{22344}{24000 \cdot 10^{-6} \cdot 241} = 3863$$

$$q_{kp}=0,5641 \cdot (1 - x)^{1,1485} \cdot (3863)^{0,184-0,311x}$$

$$2, x = \frac{h(z) - h'}{h'' - h'}, h(z) = h_{\text{ВХ}} + \frac{N_{\text{ТВС}} \cdot N_{\text{ТВЭЛ}}}{G} \cdot \int_{-H}^z q_{l0} \cdot \cos \frac{\pi z}{H_{\text{эфф}}} \cdot dz$$

$$T_s = 345,83 \text{ }^0\text{C}$$

$$h'_{\text{ВХ}} = 1637,76 \frac{\text{КДЖ}}{\text{КГ}}$$

$$h'' = 2590,15 \frac{\text{КДЖ}}{\text{КГ}}$$

$$\begin{cases} T_{\text{ВХ}} = 297,6 \text{ C} \\ P = 15,7 \text{ МПа} \end{cases} \quad h'_{\text{ВХ}} = 1324,44 \frac{\text{КДЖ}}{\text{КГ}}$$

$$x = \frac{1324,44 + \frac{241 \cdot 317}{22344} \cdot \int_{-2,1}^z 26,69 \cdot \cos \frac{\pi z}{4,41} dz - 1637,76}{2590,15 - 1637,76}$$

$$x = \frac{91,256 \cdot \int_{-2,1}^z \cos \frac{\pi z}{4,41} dz - 313,32}{952,39}$$

$$x = 0.1345 \cdot \sin(0.712 z) - 0.1948$$

$$q_{kp} = 0,5641 \cdot (1 - x)^{1,1485} \cdot (3863)^{0,184 - 0,311x}$$

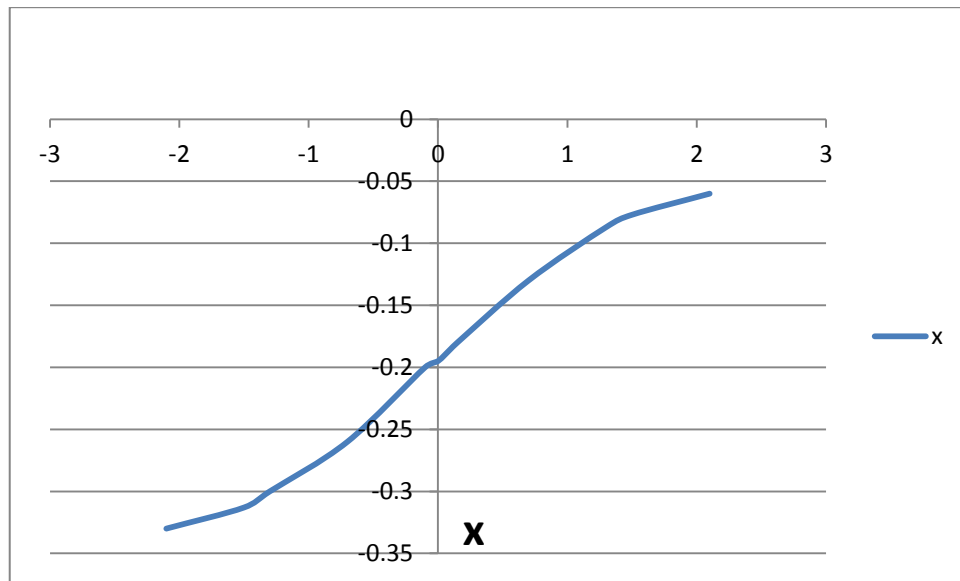
$$3, k_{\text{запас}} = \frac{q_{kp} \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{ТВЭЛ}}}{H_{\text{эфф}}}}{q_{lo} \cos \frac{\pi z}{H_{\text{эфф}}}} = \frac{0,5641 \cdot (1-x)^{1,1485} \cdot (3863)^{0,184-0,311x} \cdot \pi \cdot 9,1 \cdot 10^{-3}}{26,69 \cdot 10^{-3} \cos \frac{\pi z}{H_{\text{эфф}}}}$$

$$k_{\text{запас}} = \frac{0,604 \cdot (1 - x)^{1,1485} \cdot (3863)^{0,184 - 0,311x}}{\cos \frac{\pi z}{H_{\text{эфф}}}}$$

4,

$$q_l = \frac{1}{\pi \cdot d_{\text{ТВЭЛ}}} q_{lo} \cos \frac{\pi z}{H_{\text{эфф}}} = \frac{1}{\pi \cdot 9,1} 26,69 \cos \frac{\pi z}{4,41} \frac{\text{МВт}}{\text{м}^2}$$

<b>z,м</b>	-2,1	-1,5	-1,3	-0.7	-0,1	0	0,1	<b>0.645</b>	1,3	1,5	2,1
<b>x</b>	-0,33	-0,313	-0,30	-0.26	-0,2	-0,195	-0,185	<b>-0,135</b>	-0,087	-0,077	-0,06
<b>k<sub>запас</sub></b>	80.025	11.7	9	5.23	3.7	3.55	3.426	<b>3.111</b>	3.8	4.57	27.308
<b>q<sub>kp</sub></b>	5.585	5.25	5.046	4.272	3.445	3.316	4,97	<b>2.604</b>	2.134	2.043	1.906
<b>q<sub>l</sub></b>	0,07	0,45	0,56	0,82	0,93	0,934	0,931	<b>0,837</b>	0,56	0,45	0,07
<b>q<sub>l</sub> · k<sub>за. min</sub></b>	0.217	1.34	1.742	2.55	2.89	2.9	2.897	<b>2.604</b>	1.745	1.398	0.217



Зависимость X от Z

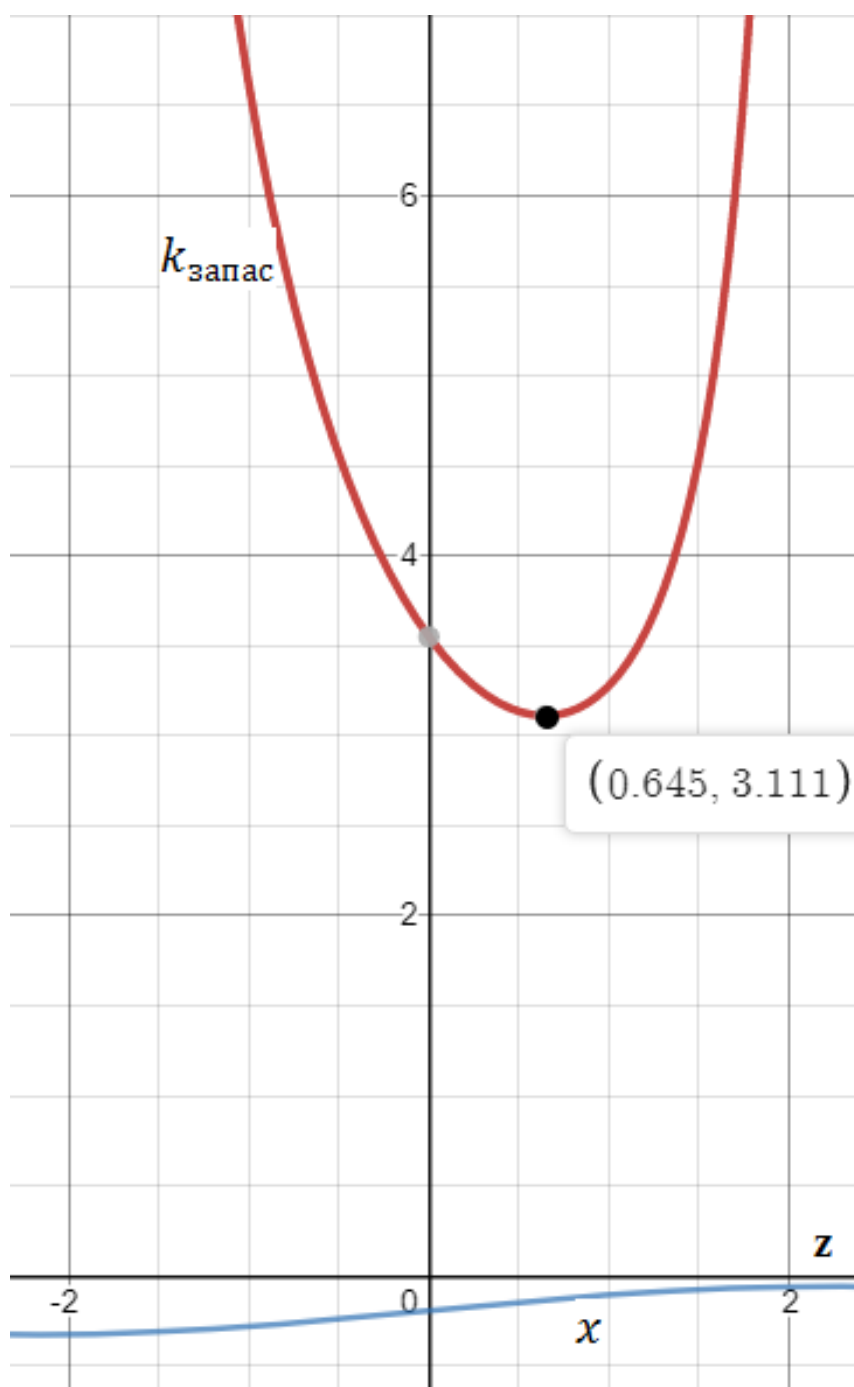
$$k_{\text{запас}} = \frac{0,604 \cdot (1 - x)^{1,1485} \cdot (3863)^{0,184 - 0,311x}}{\cos \frac{\pi z}{H_{\text{эфф}}}}$$

$k_{\text{запас}} \min$  при  $z = 0.645$

$$k_{\text{запас}} \min = 3.111$$

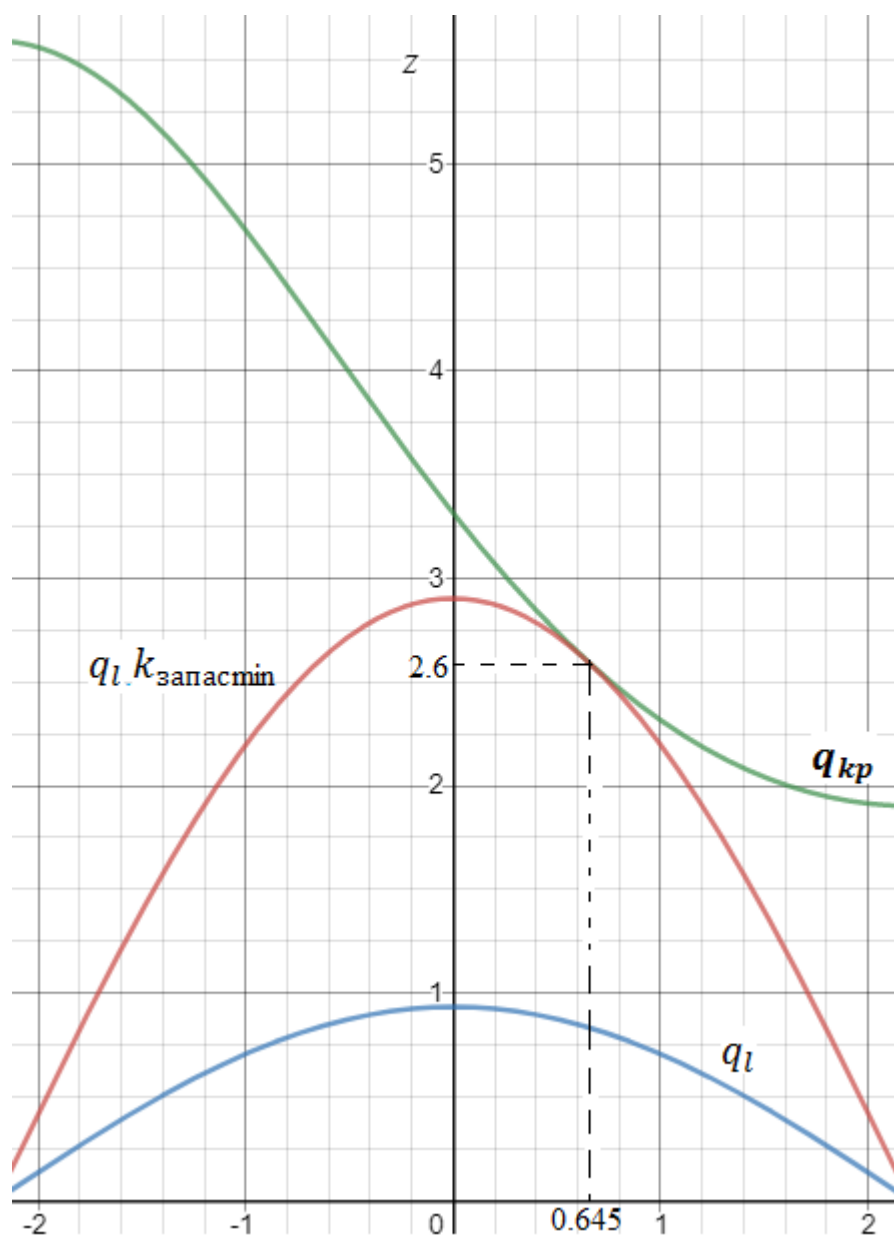
$$q_l \cdot k_{\text{за.} \min} = \frac{3.111}{\pi \cdot 9,1} 26,69 \cos \frac{\pi z}{4,41}$$

$z, \text{м}$	-2,1	-1,5	-1,3	-0,7	-0,1	0	0,1	<b>0.645</b>	1,3	1,5	2,1
$q_l \cdot k_{\text{за.} \min}$	0.217	1.34	1.742	2.55	2.89	2.9	2.897	<b>2.604</b>	1.745	1.398	0.217
$q_{kp}$	5.585	5.25	5.046	4.272	3.445	3.316	4,97	<b>2.604</b>	2.134	2.043	1.906



Зависимость  $k_{\text{запас}}$  от  $z$

$k_{\text{запас}} \min$  при  $z = 0.645$



Зависимость  $q_{kp}$  и  $q_l$  от  $Z$

При  $z=0.645$ ,  $q_{kp}=q_l \cdot K_{\text{запас} \min}$

## V. Перепад давлений через активный зон реактора

$$\Delta P = \Delta P_{\text{тр}} + \Delta P_{\text{мс}} + \Delta P_g + \Delta P_{\rho}$$

1.  $\Delta P_{\text{тр}}=?$

$$\Delta P_{\text{тр}} = \int_0^h \frac{\xi_{\text{тр}}}{\rho d_r} \frac{1}{2} \left( \frac{G'}{S} \right)^2 dz = \frac{\xi_{\text{тр}}}{\rho d_r} \frac{1}{2} \left( \frac{G'}{S} \right)^2 h$$

$$\xi_{\text{тр}} = (1.82 \log Re - 1.64)^{-2} = 0,0134$$

$$Re = 4,422 \cdot 10^5; \rho = 683 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}; d_r = 9,26 \text{мм}$$

$$\rightarrow \Delta P_{\text{тр}} = \frac{0,0134}{683 \cdot 9,26 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{22344}{241 \cdot 24000 \cdot 10^{-6}} \right)^2 \cdot 4,2 = \mathbf{66,4 \text{ КПа}}$$

2.  $\Delta P_{\text{мс}}=?$

$$\Delta P_{\text{мс}} = \frac{1}{2} \left( \frac{G'}{S} \right)^2 \sum_i \frac{\xi^i}{\rho_i} = \frac{1}{2} \left( \frac{G}{N_{\text{ТВС}} S} \right)^2 \left[ \frac{\xi_{\text{ВХ}}}{\rho_{\text{ВХ}}} + \frac{\xi_{\text{аК}}}{\rho_{\text{аК}}} + \frac{\xi_{\text{ВЫХ}}}{\rho_{\text{ВЫХ}}} \right] = \mathbf{95,42 \text{ КПа}}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \xi_{\text{ВХ}} = 2 \\ \xi_{\text{аК}} = 0,4 \cdot 13 = 5,2 \\ \xi_{\text{ВЫХ}} = 1.5 \end{array} \right. \quad \text{количество дистанционирующих решеток: 13}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_{\text{ВХ}} = 732 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3} \\ \rho_{\text{аК}} = 683 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3} \\ \rho_{\text{ВЫХ}} = 614,25 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3} \end{array} \right.$$

3,

$$\Delta p_g = \int_0^h \rho(z) \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot dz = \rho g h = 683 \cdot 9,8 \cdot 4,2 = \mathbf{28 \text{ КПа}}$$

4,

$$\Delta p_{\rho} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{G'}{S} \right)^2 \cdot \left( \frac{1}{\rho_{\text{ВЫХ}}} - \frac{1}{\rho_{\text{ВХ}}} \right) = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{22344}{241.24000 \cdot 10^{-6}} \right)^2 \cdot \left( \frac{1}{614,25} - \frac{1}{732} \right) = \mathbf{1,95 \text{ кПа}}$$

$$T_{\text{ВЫХ}} = 340,692 \quad \rho_{\text{ВЫХ}} = 614,25 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$T_{\text{ВХ}} = 297,6 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \rho_{\text{ВХ}} = 732 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$\Rightarrow \Delta P = 66,4 \cdot 10^3 + 95,42 \cdot 10^3 + 28 \cdot 10^3 + 1,95 \cdot 10^3 = \mathbf{191,77 \text{ кПа}}$$

$$\Delta P = \mathbf{191,77 \text{ кПа}}$$

$$N = \frac{\Delta P \cdot G}{\rho \cdot \eta} = \frac{191,77 \cdot 22344}{0,75 \cdot 732} = \mathbf{7805 \text{ кВт} = 7,8 \text{ мВт}}$$

$$N = \mathbf{7,8 \text{ мВт}}$$

## Заключение

В **I пункте**, были написаны обзор и схема конструкции реактора ВВЭР-1500.

Во **II пункте**, были посчитаны КПД и тепловая мощность:

$$(\text{КПД}) \eta_{\text{бр}} = \mathbf{0.3494}$$

$$Q = \mathbf{4293 \text{ мВт}}$$

Во **III пункте**, были описаны расчеты температуры теплоносителя, оболочки ТВЭЛОВ и топлива по максимальному напряжению, нарисованы графики зависимости температуры теплоносителя, оболочки ТВЭЛОВ и топлива от высоты топливного столба z. При этом:

$$T_{\text{тепл}}(0) = \mathbf{319.146^\circ\text{C}}, \quad T_{\text{тепл}}\left(\frac{H}{2}\right) = \mathbf{340.692^\circ\text{C}}$$

$$T_{\text{об}}^{\text{max}} = \mathbf{347,4^\circ\text{C}} \quad \text{при} \quad z_{\text{об}}^{\text{max}} = \mathbf{1.083(\text{м})}$$

$$T_{\text{топ}}^{\text{max}}(z_{\text{топ}}^{\text{max}}) = \mathbf{1418^\circ\text{C}} \quad \text{при} \quad z_{\text{топ}}^{\text{max}} = \mathbf{0.0365\text{м}}$$

В **IV** пункте, были посчитаны коэффициент запаса. При  **$z = 0.645\text{м}$** , коэффициент запаса достигает минимального значения  **$K_{\text{запас}}^{\text{min}} = 3.111$**  .

При  **$z = 0.645$** ,  **$q_{kp} = q_l \cdot K_{\text{запас}}^{\text{min}} = 2.6 \frac{\text{МВт}}{\text{м}^2}$**

Были нарисованы графики зависимости  **$q_{kp}, q_l, K_{\text{запас}}$**  от  **$z$** .

В **V** пункте, был описан расчет перепада давления через активную зону. При этом суммарный перепад  **$\Delta P = 191.77 \text{ кПа}$**  и электрическая мощность насосов равна  **$N = 7,8 \text{ мВт}$**

Москва 23-04-2020