

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ»

Институт ядерной физики и технологий
Кафедра №13 «Кафедра теплофизики»

Курсовая работа

Энергооборудование ядерных энергетических установок
Реактор БРЕСТ-ОД 300

Работу выполнил: Сладков С. А.

Студент группы: Б17-101

Проверила: Позднеева И. Г.

Оглавление

1. Определение термического КПД и КПД «брутто» АЭС	2
2. Т-Q диаграмма.....	4
3. Определение скоростей движения теплоносителя и рабочего и их проходных сечений.	6
4. Расчёт площади теплопередающей поверхности.	8
4.1 Определение значений коэффициентов теплоотдачи экономайзера ..	8
4.2 Расчёт площади теплопередающей поверхности экономайзера	10
4.3 Определение значений коэффициентов теплоотдачи испарителя.....	10
4.4 Расчёт площади теплопередающей поверхности испарителя	13
5. Расчет гидравлических сопротивлений и мощностей на прокачку.....	15
Прочностной расчет элементов парогенератора	19
Заключение.....	21

1. Определение термического КПД и КПД «брутто» АЭС

Термодинамические параметры воды в каждой точке TS – диаграммы

Таблица 1

Точка	T, C	P, Мпа	H, МДж/кг	S, кДж/(кг*К)	X, %
a	23.3	17	0.11	0.33	0
b	352.29	17	1.69	3.80	0
c	352.29	17	2.55	5.17	100
d	505	17	0.33	6.28	100
e	180.28	1.009	2.64	6.28	93.25
f	505	1.009	3.49	7.77	100
k	23	$2.81 \cdot 10^{-3}$	2.30	7.77	90
k'	23	$2.81 \cdot 10^{-3}$	0.10	0.33	0
g	180.28	1.009	0.76	2.14	0
h	340	17	1.59	3.65	0

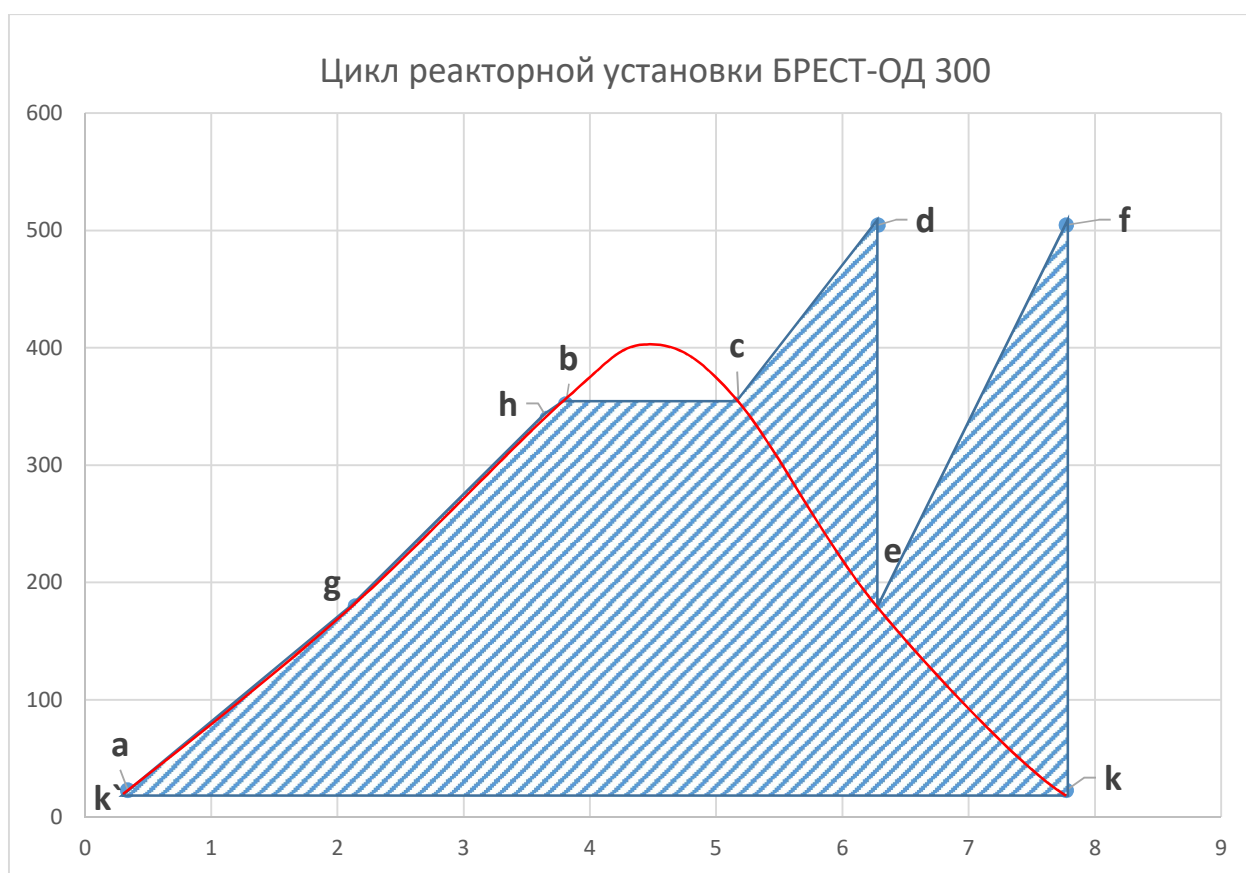


Рисунок 1

Термический КПД без регенерации:

$$\eta_{t0} = 1 - \frac{T_k(S_f - S_k)}{(h_d - h_a) + (h_f - h_e)}$$

Термический КПД с идеальной регенерацией:

$$\eta_{t\infty} = 1 - \frac{T_k(S_f - S_g)}{\frac{(S_d - S_g)}{(S_d - S_h)}(h_d - h_h) + (h_f - h_e)}$$

Термический КПД с n регенеративными отборами:

n=7

$$\eta_{tn} = \eta_{t0} + (\eta_{t\infty} - \eta_{t0}) \frac{n}{n+1}$$

Формула для расчёта КПД брутто:

$$\eta_{\text{брутто}} = \eta_{\text{эг}} \eta_{\text{механ}} \eta_{oi} \eta_t \eta_{\text{ит}}$$

$\eta_{\text{ит}} = 0.98$ – КПД использования тепла

η_t – термический КПД

$\eta_{oi} = 0.85$ – внутренний относительный КПД турбины

$\eta_{\text{м}} = 0.97$ – механический КПД

$\eta_{\text{эг}} = 0.98$ – КПД электрогенератора

Расчет термических КПД

Таблица 2

η_{t0}	$\eta_{t\infty}$	η_{tn}	$\eta_{\text{брутто}}$
0,45	0,53	0,52	0,41

Тепловая мощность реактора определяется по следующей формуле:

$$Q_P = \frac{W_{\text{эл}}}{\eta_{\text{брутто}}}$$

$$Q_P = 732 \text{ МВт}$$

2. T-Q диаграмма

Известные данные:

Удельная теплоемкость свинца: $143.0 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$;

Количество ПГ: 2 шт;

Электрическая мощность: 300 МВт;

$T_{\text{вх}}$ теплоносителя: 420°C ;

$T_{\text{вых}}$ теплоносителя: 535°C ;

$\overline{C_{\text{воды}}^{II}}$ (при $\bar{T} \approx 350^\circ\text{C}$): $2,24 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$;

r ($P=17$ МПа): $859,2 \text{ кДж/кг}$

$\overline{C_{\text{п}}^{II}}$ (при $\bar{T} \approx 420^\circ\text{C}$, $P=17$ МПа): $4,12 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$;

$\overline{C_{\text{п}}^{II}}$ (при $\bar{T} \approx 340^\circ\text{C}$, $P=1.009$ МПа): $2,12 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$;

Расчет :

$$G^I = \frac{Q_{\text{пг}}}{C_{\text{свинец}}^I \cdot (T_{\text{вх}} - T_{\text{вых}})} = 22,25 \cdot 10^3; G^{II} = 160,9$$

$$Q_I = G^I \cdot (T_{\text{вх}} - T_{\text{вых}}) G_p^I = 22,25 \cdot 10^3 \cdot (535 - 420) \cdot 143.0 = 365,8 \text{ МВт}$$

$$Q_{II} = Q_{\text{эк}} + Q_{\text{исп}} + Q_{\text{опп}} + Q_{\text{ппп}}$$

$$Q_{\text{эк}} = (T_{\text{нас}} - T_{\text{пит.воды}}) \cdot \overline{C_{\text{воды}}^{II}} \cdot G^{II} = (352,29 - 340) \cdot 7787 \cdot 160,9 \\ = 15,3 \text{ МВт}$$

$$Q_{\text{исп}} = G^{II} \cdot r = 160,9 \cdot 859,2 = 138,2 \text{ МВт}$$

$$Q_{\text{опп}} = G^{II} (T_0 - T_{\text{нас}}) \cdot \overline{C_{\text{п}}^{II}} = 160,9 \cdot (505 - 352,29) \cdot 4,12 \cdot 10^3 = 101,3 \text{ МВт}$$

$$Q_{\text{ппп}} = G^{II} (T_f - T_e) \cdot \overline{C_{\text{п}}^{II}} = 160,9 \cdot (505 - 180,28) \cdot 2,12 \cdot 10^3 = 110,9 \text{ МВт}$$

$$Q_{II} = 365,8 \text{ МВт}$$

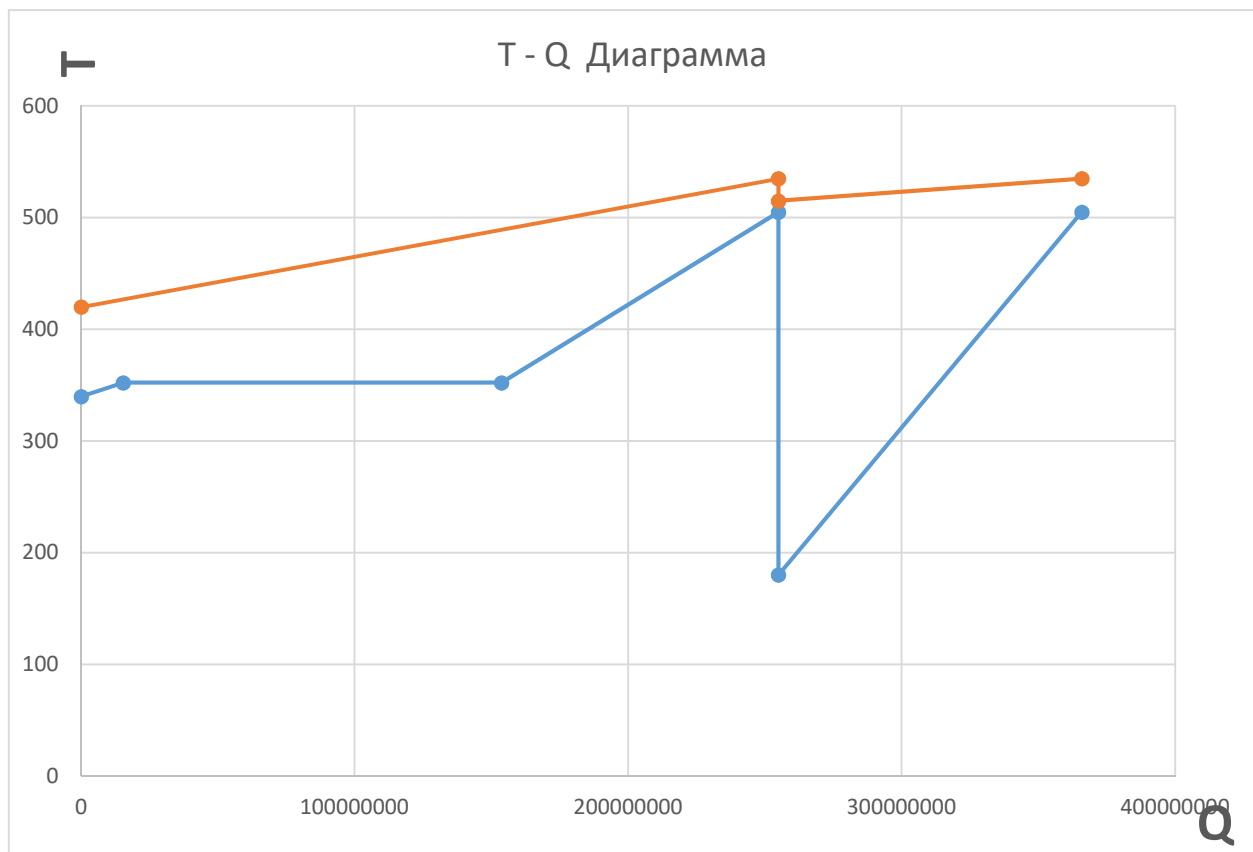


Рисунок 2

3. Определение скоростей движения теплоносителя и рабочего и их проходных сечений.

$$d_H = 20 \text{ мм.}$$

Марка стали – 12Х18Н10Т

$$[\sigma_H] = 400 \text{ Мпа}$$

$$p^B = 17 \text{ Мпа; } p^H = 0,55 \text{ МПа}$$

$$p^{\text{расч}} = 1,25 (p^B - p^H) = 1,25 * (17 - 0,55) = 20,56 \text{ Мпа}$$

$$\begin{aligned} \delta_{\text{расч}} &= \frac{p^{\text{расч}} \cdot d}{2 \cdot \varphi [\sigma_H] + p^{\text{расч}}} + c_1 + c_2 + c_3 + c_4 = \\ &= \frac{20,56 \cdot 10^6 \cdot 0,02}{2 \cdot 1 \cdot 4 \cdot 10^8 + 20,56 \cdot 10^6} + 0,1 \cdot \frac{20,56 \cdot 10^6 \cdot 0,02}{2 \cdot 1 \cdot 4 \cdot 10^8 + 20,56 \cdot 10^6} + 0,002 \\ &\quad * 30 + 0 + 0,12 \cdot \frac{20,56 \cdot 10^6 \cdot 0,02}{2 \cdot 1 \cdot 4 \cdot 10^8 + 20,56 \cdot 10^6} = 0,67 \end{aligned}$$

Из ГОСТ 8734-75 ближайшая большая рассчитанной толщина стенки при наружном диаметре труб d_H : $\delta = 0,8 \text{ мм}$

Внутренний диаметр труб:

$$d_B = d_H - 2\delta = 20 - 2 \cdot 0,8 = 18,4$$

Площадь проходного сечения одной трубы:

$$f = \frac{\pi \cdot d_B^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 18,4^2}{4} = 254 \text{ мм}^2$$

$$\langle \rho_B \rangle = (T \approx 346) = 631,5 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

$$n' = \frac{G_B}{\langle \rho_B \rangle w_B \cdot f} = \frac{160,9}{631,5 \cdot 1,2 \cdot 254 \cdot 10^{-6}} = 836$$

Далее определяем число труб, расположенных на диаметре кожуха n_D :

$$n_D' = \sqrt[4]{3(n' - 1) + 1} = 33,3 \Rightarrow n_D = 33$$

Определяем внутренний диаметр кожуха:

$$D_B = n_D \cdot t = 1,5 * 0,02 * 33 = 1,5 * 0,02 * 33 = 0,99 \text{ м}$$

где t - шаг решетки: $t = (1,3 \div 1,5) \cdot d_n$

Количество труб для полного заполнения рядов:

$$n = \left(\frac{3}{4}(n_D^2 - 1) + 1\right)\theta = \left(\frac{3}{4} * (33^2 - 1) + 1\right) * 1 = 817$$

Уточняем скорость рабочего тела:

$$w_{\text{воды}} = \frac{G_{\text{ПВ}}}{\langle \rho \rangle \cdot f \cdot n} = \frac{160,9}{631,5 * 254 * 10^{-6} * 817} = 1,2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Определяем проходное сечение для жидкого металла:

$$\begin{aligned} f_{\text{ЖМ}} &= \frac{G_{\text{ЖМ}}}{\langle \rho_{\text{ЖМ}} \rangle W_{\text{ЖМ}}} = \frac{\pi \cdot D_B^2}{4} - n \frac{\pi \cdot d_n^2}{4} = \\ &= \frac{3,14 * 0,99^2}{4} - 817 * \frac{3,14 * (20 * 10^{-3})^2}{4} = 0,51 \text{ м}^2 \end{aligned}$$

и скорость жидкого металла в межтрубном пространстве:

$$W_{\text{ЖМ}} = \frac{G_{\text{ЖМ}}}{\langle \rho_{\text{ЖМ}} \rangle \cdot f_{\text{ЖМ}}} = \frac{22,25 * 10^3}{10,43 * 10^3 * 0,512} = 4,16 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

4. Расчёт площади теплопередающей поверхности.

4.1 Определение значений коэффициентов теплоотдачи экономайзера

Физические параметры свинца при

$$\langle T_3^{Pb} \rangle = \frac{T_{BX} + T_{ВЫХ}}{2} = \frac{535 + 420}{2} = 477,5 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad t = (1,3 \div 1,5) \cdot d_n$$

Температуропроводность свинца $a_1 = 12,7 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$;

$$\lambda_1 = 17,02 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}};$$

Так как решетка треугольная

$$d_{\text{ЭКВ}} = \frac{4 \cdot F_{\text{пр}}}{\Pi} = d \cdot \left[\frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cdot \left(\frac{t}{d} \right)^2 - 1 \right] = 20 * \left[\frac{2 * \sqrt{3}}{\pi} * 1,5^2 - 1 \right]$$

= 29 мм – эквивалентный диаметр;

$$Pe = \frac{W_{\text{ЖМ}} \cdot d_{\text{ЭКВ}}}{a_1} = \frac{4,16 \cdot 29 \cdot 10^{-3}}{12,7 \cdot 10^{-6}} = 9,5 * 10^3 \text{ – число Пекле};$$

Течение турбулентное

$$Nu = 24,15 \cdot \lg \left(-8,12 + 12,76 \cdot \frac{t}{d_{\text{ЭКВ}}} - 3,5 \cdot \left(\frac{t}{d_{\text{ЭКВ}}} \right)^2 \right) + 0,0174$$
$$\cdot \left(1 - e^{-6 \cdot \left(\frac{t}{d_{\text{ЭКВ}}} - 1 \right)} \right) \cdot (Pe - 200)^{0,9} =$$
$$= 24,15 \cdot \lg \left(-8,12 + 12,76 \cdot \frac{1,5 * 20}{29} - 3,65 \cdot \left(\frac{1,5 * 20}{29} \right)^2 \right) + 0,0174$$
$$\cdot \left(1 - e^{-6 \cdot \left(\frac{1,5 * 20}{29} - 1 \right)} \right) \cdot (9,5 * 10^3 - 200)^{0,9} = 13,8$$

Коэффициент теплоотдачи от Pb к стенке трубы:

$$\alpha_1 = \frac{Nu \cdot \lambda_1}{d_{\text{ЭКВ}}} = \frac{13,8 \cdot 17,02}{0,029} = 8,09 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Термическое сопротивление:

$$R_3^{Pb} = \frac{1}{\alpha_1} = \frac{1}{8,09 \cdot 10^3} = 12,3 \cdot 10^{-5} \frac{(\text{м}^2 \cdot \text{К})}{\text{кВт}}$$

Физические параметры воды при

$$P = 17 \text{ Мпа и } < T_B > = \frac{T_b + T_h}{2} = \frac{352,29 + 340}{2} = 346,14^\circ\text{C}:$$

$$\text{Теплопроводность: } \lambda_3 = 0,45 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}};$$

$$\text{Динамическая вязкость: } \mu_3^{\text{ж}} = 69,01 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$\text{Кинематическая вязкость: } \nu_3^{\text{к}} = 0,12 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}};$$

$$\text{Число Прандтля: } Pr_3 = 1,29$$

Число Рейнольдса:

$$Re = \frac{w_B \cdot d_B}{\nu_3^{\text{к}}} = \frac{1,2 \cdot 0,018}{0,12 \cdot 10^{-6}} = 187,54 \cdot 10^3$$

$$T_{\text{ст}} = \frac{< T_B > + < T_3^{Pb} >}{2} = \frac{346,1 + 477,5}{2} = 411,8^\circ\text{C}$$

Далее при $P = 17 \text{ Мпа}$ и $T_{\text{ст}} = 411,8^\circ\text{C}$ найдем $\mu_3^{\text{ст}}$:

$$\mu_3^{\text{ст}} = 25,70 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с};$$

Тогда:

$$Nu_3 = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t = 0,023 \cdot (187,54 \cdot 10^3)^{0,8} \cdot 1,29^{0,4} \cdot \left(\frac{\mu_3^{\text{ж}}}{\mu_3^{\text{ст}}} \right)^{0,11}$$
$$=$$

$$= 0,023 \cdot (187,54 \cdot 10^3)^{0,8} \cdot 1,29^{0,4} \cdot \left(\frac{69,01 \cdot 10^{-6}}{25,70 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,11} = 470,1$$

Найдем коэффициент теплоотдачи воды:

$$\alpha_3 = \frac{Nu_3 \cdot \lambda_3}{d_B} = \frac{470,1 \cdot 0,45}{0,018} = 11,83 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Термическое сопротивление:

$$R_3^{\text{в}} = \frac{1}{\alpha_3} = \frac{1}{11,83 \cdot 10^3} = 8,45 \cdot 10^{-5} \frac{(\text{м}^2 \cdot \text{К})}{\text{Вт}}$$

Коэффициент теплопроводности стали 12Х18Н10Т при температуре

$$T_{\text{ст}} = 411,8 \text{ }^{\circ}\text{C}:$$

$$\lambda_{\text{ст}} = 21 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

Термическое сопротивление стенки:

$$R_{\text{ст}} = \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} = \frac{0,8 \cdot 10^{-3}}{21} = 3,8 \cdot 10^{-5} \frac{(\text{м}^2 \cdot \text{К})}{\text{Вт}}$$

Коэффициент теплопередачи:

$$k_{\text{э}} = \frac{1}{R_{\text{э}}^{\text{Pb}} + R_{\text{э}}^{\text{В}} + R_{\text{ст}}} = \frac{1}{2,56 \cdot 10^{-5} + 8,45 \cdot 10^{-5} + 3,8 \cdot 10^{-5}} = 6,75 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

$$\Delta t_{\text{э}}^{\text{б}} = T_{\text{ВЫХ}}^{\text{э}} - T_{\text{h}} = 420 - 340 = 80^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t_{\text{э}}^{\text{М}} = T_{\text{ВХ}} - T_{\text{б}} = 535 - 352,29 = 182,71^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t_{\text{э}} = \frac{\Delta t_{\text{э}}^{\text{б}} + \Delta t_{\text{э}}^{\text{М}}}{2} = \frac{80 + 182,71}{2} = 131,35^{\circ}\text{C}$$

4.2 Расчёт площади теплопередающей поверхности экономайзера

$$F_{\text{э}} = \frac{Q_{\text{эк}}}{k_{\text{э}} \cdot \Delta t_{\text{э}}} = \frac{15,39 \cdot 10^6}{6,75 \cdot 10^3 \cdot 131,35} = 17,35 \text{ м}^2$$

$$l_{\text{э}} = \frac{F_{\text{э}}}{\pi \cdot d_{\text{n}} \cdot n} = \frac{17,35}{3,14 \cdot 0,02 \cdot 817} = 0,338 \text{ м}$$

4.3 Определение значений коэффициентов теплоотдачи испарителя

Физические параметры свинца при

$$< T_{\text{и}}^{\text{Pb}} > = \frac{T_{\text{ВЫХ}}^{\text{э}} + T_{\text{ВЫХ}}}{2} = \frac{477,5 + 420}{2} = 450^{\circ}\text{C}:$$

$$\text{Температуропроводность: } a_2 = 10,8 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}};$$

$$\text{Теплопроводность: } \lambda_2 = 16,8 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}};$$

Число Пекле:

$$Pe = \frac{W_{ЖМ} \cdot d_{ЭКВ}}{a_2} = \frac{4,16 \cdot 29 \cdot 10^{-3}}{10,8 \cdot 10^{-6}} = 11,17 \cdot 10^3$$

Течение турбулентное, поэтому число Нуссельта рассчитываем по формуле для турбулентного течения:

$$\begin{aligned} Nu &= 24,15 \cdot \lg \left(-8,12 + 12,76 \cdot \frac{t}{d_{ЭКВ}} - 3,65 \cdot \left(\frac{t}{d_{ЭКВ}} \right)^2 \right) + 0,0174 \\ &\quad \cdot \left(1 - e^{-6 \cdot \left(\frac{t}{d_{ЭКВ}} - 1 \right)} \right) \cdot (Pe - 200)^{0,9} = \\ &= 24,15 \cdot \lg \left(-8,12 + 12,76 \cdot \frac{1,5 \cdot 20}{29} - 3,65 \cdot \left(\frac{1,5 \cdot 20}{29} \right)^2 \right) + 0,0174 \\ &\quad \cdot \left(1 - e^{-6 \cdot \left(\frac{1,5 \cdot 20}{29} - 1 \right)} \right) \cdot (11,17 \cdot 10^3 - 200)^{0,9} = 86,1 \end{aligned}$$

Коэффициент теплоотдачи от Рв к стенке трубы:

$$\alpha_2 = \frac{Nu \cdot \lambda_2}{d_{ЭКВ}} = \frac{86,1 \cdot 16,8}{0,029} = 49,88 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Термическое сопротивление:

$$R_{и}^{Pb} = \frac{1}{\alpha_2} = \frac{1}{49,88 \cdot 10^3} = 2 \cdot 10^{-5} \frac{(\text{м}^2 \cdot \text{К})}{\text{Вт}}$$

Физические параметры воды-пара при

$$T_H = 352,29 \text{ } ^\circ\text{C} \quad P = 17 \text{ МПа:}$$

$$\text{Теплопроводность } \lambda_{и}^B = 430 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

$$\text{Динамическая вязкость: } \mu_{и}^B = 64,72 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$$

$$\text{Кинематическая вязкость: } \nu_{и}^B = 0,11 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$$

$$Pr_{и}^Ж = 1,63$$

$$Re = \frac{w_B \cdot d_B}{\nu_{и}^B} = \frac{1,2 \cdot 0,018}{0,11 \cdot 10^{-6}} = 188,65 \cdot 10^3$$

$$T_{\text{ст}} = \frac{T_{\text{н}} + \langle T_{\text{и}}^{Pb} \rangle}{2} = \frac{352.29 + 420}{2} = 386,14^{\circ}\text{C}$$

Тогда при

$$P = 17 \text{ МПа и } T_{\text{ст}} = 386,14^{\circ}\text{C}$$

$$\mu_{\text{и}}^{\text{ст}} = 24.72 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$$

$$Nu_{\text{и}} = 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr_{\text{и}}^{\text{ж}0.4} \cdot c_t$$

$$= 0,023 \cdot (49,88 \cdot 10^3)^{0.8} \cdot 1,63^{0.4} \cdot \left(\frac{\mu_{\text{и}}^{\text{в}}}{\mu_{\text{и}}^{\text{ст}}} \right)^{0.11}$$

$$= 0.023 \cdot (49,88 \cdot 10^3)^{0.8 \cdot 0.8} \cdot 1,63^{0.4} \cdot \left(\frac{64,72 \cdot 10^{-6}}{24.72 \cdot 10^{-6}} \right)^{0.11}$$

$$= 1,22 \cdot 10^3$$

Коэффициент теплоотдачи при течении однофазного теплоносителя в канале:

$$\alpha_{\text{оф}} = \frac{Nu_{\text{и}} \cdot \lambda_{\text{и}}^{\text{в}}}{d_{\text{в}}} = \frac{1,22 \cdot 10^3 \cdot 430 \cdot 10^{-3}}{0.018} = 29,03 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Коэффициент теплопроводности стали 10Х18Н9 при температуре

$$T_{\text{ст}} = 386,14^{\circ}\text{C}:$$

$$\lambda_{\text{ст}} = 21 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

Термическое сопротивление стенки:

$$R_{\text{ст}}^{\text{и}} = \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} = \frac{0,8 \cdot 10^{-3}}{21} = 3,8 \cdot 10^{-5} \frac{(\text{м}^2 \cdot \text{К})}{\text{Вт}}$$

$$\Delta T = \frac{T_{\text{вых}}^{\text{в}} + T_{\text{вых}} - 2 \cdot T_{\text{и}}}{2} = \frac{420 + 420 - 2 \cdot 352.29}{2} = 67,71^{\circ}\text{C}$$

$$q_F = 0.01 \cdot 10^6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= 10.45 \cdot q_F^{0.7} \cdot (3.3 - 0.0113 \cdot (T_{\text{нас}} - 100)) \\ &= 10.45 \cdot (0.01 \cdot 10^6)^{0.7} \cdot (3.3 - 0.0113 \cdot (352,29 - 100)) \\ &= 18,70 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) \end{aligned}$$

$$k' = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_0} + R_{и}^{Pb} + R_{ст}^{и}} = \frac{1}{\frac{1}{18697.7} + 2 \cdot 10^{-5} + 3,8 \cdot 10^{-5}} = 8970 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

$$q' = k' \cdot \Delta T = 8970 \cdot 67,71 = 0,6 \frac{\text{МВт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

$$\frac{\alpha_0}{\alpha_{оф}} = \frac{18,70 \cdot 10^3}{29,03 \cdot 10^3} = 0.64$$

Тогда:

$$\alpha_{и} = \alpha_{оф} \sqrt{1 + (0.9 * \left(0.9 * \frac{\alpha_0}{\alpha_{оф}}\right)^2} = 29,03 * 10^3 * \sqrt{1 + (0.9 * (0.9 * 0.64))^2} =$$

$$= 33,08 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

$$R_{и} = \frac{1}{\alpha_{и}} = 3,0 * 10^{-5} \frac{(\text{м}^2 \cdot \text{К})}{\text{Вт}}$$

$$k_{и} = \frac{1}{R_{и} + R_{и}^{Pb} + R_{ст}^{и}} = \frac{1}{3,0 * 10^{-5} + 2 \cdot 10^{-5} + 3,8 * 10^{-5}} = 11,36 \left(\frac{\text{кВт}}{\text{м}^2} \cdot \text{К} \right)$$

4.4 Расчёт площади теплопередающей поверхности испарителя

$$Q_{исп} = 138,23 \text{ МВт}$$

$$\Delta t_{\text{э}}^{\text{б}} = T_{\text{вых}}^{\text{э}} - T_{\text{н}} = 420 - 352.29 = 67,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t_{\text{э}}^{\text{м}} = T_{\text{вых}} - T_{\text{н}} = 420 - 352.29 = 67,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t_{и} = \frac{\Delta t_{\text{э}}^{\text{б}} + \Delta t_{\text{э}}^{\text{м}}}{2} = \frac{67,71 + 67,71}{2} = 67,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$F_{и} = \frac{Q_{исп}}{k_{и} * \Delta t_{и}} = \frac{138,23 * 10^6}{11,36 * 10^3 * 67,7} = 180 \text{ м}^2$$

$$l_{и} = \frac{F_{и}}{\pi \cdot d_{н} \cdot n} = \frac{180}{3,14 * 0.02 * 817} = 3,5 \text{ м}$$

$$F_{\text{сумм}} = F_{и} + F_{\text{э}} = 180 + 17,35 = 197,3$$

$$l_{\text{сумм}} = l_{\text{э}} + l_{и} = 0,338 + 3,5 = 3,8 \text{ м}$$

5. Расчет гидравлических сопротивлений и мощностей на прокачку

$$N_{\text{пр}} = \frac{\Delta P \cdot G}{<\rho> \eta_H},$$

$$\Delta P = \Delta P_{\text{тр}} + \Delta P_{\text{м}} \pm \Delta P_{\text{гидр}} \pm \Delta P_{\text{уск}}$$

Первый контур

Потери на трение в трубах:

$$\Delta P_{\text{тр}} = \xi_{\text{тр}} \frac{l}{d_{\Gamma}} \frac{\rho W^2}{2}, \text{ - формула Дарси}$$

$$d_{\Gamma} = \frac{4 * F}{\Pi} = \frac{D_{\text{вн}}^2 - n * d_{\text{внеш}}^2}{D_{\text{вн}} + n * d_{\text{внеш}}} = \frac{0,99^2 - 817 * 20^2}{0,99 + 817 * 20} = 37,6 \text{ мм}$$

$$\nu_{pb}^k = 17.5 * 10^{-8} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$$

$$Re = \frac{w_{\text{жм}} \cdot d_{\Gamma}}{\nu_{pb}^k} = \frac{1.2 * 37,6 * 10^{-3}}{17.5 * 10^{-8}} = 2,58 * 10^5$$

$$Re > 10^5$$

Исходя из значения числа Re, получаем:

$$\xi_{\text{тр}} = \frac{1}{(1.82 * \lg(Re) - 1.64)^2} = \frac{1}{(1.82 * \lg(2,58 * 10^5) - 1.64)^2} = 14,8 * 10^{-3}$$

$$\Delta P_{\text{тр}} = \xi_{\text{тр}} \frac{l}{d_{\Gamma}} \frac{\rho W^2}{2} = \frac{14,8 * 10^{-3}}{37,6 * 10^{-3}} * \frac{19,64 * 10,47 * 10^3 * 4,16^2}{2} = 700,3 \text{ кПа}$$

Потери давления на ускорение:

$$\begin{aligned}\Delta P_{\text{уск}} &= (\rho \cdot w)^2 \cdot \left(\frac{1}{\rho_{\text{к}}} - \frac{1}{\rho_{\text{н}}} \right) = \\ &= (10,42 \cdot 10^3 \cdot 4,16)^2 \cdot \left(\frac{1}{10,42 \cdot 10^3} - \frac{1}{10,56 \cdot 10^3} \right) = 2,34 \text{ кПа}\end{aligned}$$

Потери давления за счет гидростатического напора:

$$\Delta P_{\text{гидр}} = (\rho_{\text{н}} - \rho_{\text{к}}) \cdot h \cdot g = (10,56 - 10,42) \cdot 10^3 \cdot 0,2 \cdot 9,8 = 274,4 \text{ Па}$$

Потери давления на местных сопротивлениях:

Вход в межтрубное пространство и выход из него происходит с сопротивлением

$$\xi_{\text{МВХ}} = 1,2 \quad \xi_{\text{МВЫХ}} = 1,2$$

$$\begin{aligned}\Delta P_{\text{М}} &= \xi_{\text{МВХ}} \cdot \frac{\rho_{\text{н}} \cdot w^2}{2} + \xi_{\text{МВЫХ}} \cdot \frac{\rho_{\text{к}} \cdot w^2}{2} = \\ &= 1,2 \cdot \frac{10,56 \cdot 4,16^2}{2} + 1,2 \cdot \frac{10,42 \cdot 4,16^2}{2} = 217,8 \text{ кПа}\end{aligned}$$

Общая потеря давления в первом контуре:

$$\Delta P_1 = 700,3 \cdot 10^3 + 217,8 \cdot 10^3 + 274,4 + 2,4 \cdot 10^3 = 920,8 \text{ кПа}$$

Второй контур

Потери на трение в трубах:

$$\xi_{\text{ТР}}^{\text{ДФ}} = x \cdot \xi_{\text{ТР}}'' + (1 - x) \cdot \xi_{\text{ТР}}'$$

$$v' = 1,16 \cdot 10^{-7} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$$

$$v'' = 5,40 \cdot 10^{-7} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$$

$$Re' = \frac{w_0 d_B}{v'} = 1,2 * \frac{0.018}{1,16 * 10^{-7}} = 186,4 * 10^3$$

$$w'' = \frac{G}{\rho'' \cdot f \cdot n} = \frac{160,9}{645 * 254 * 10^{-6} * 817} = 1,2 \frac{м}{с}$$

$$Re'' = \frac{w'' * d_B}{v''} = 1,2 * \frac{0.018}{5,40 * 10^{-7}} = 39,96 * 10^3 ;$$

Найдем коэффициенты трения однофазных потоков:

Т.к. $Re' > 10^5$, то:

$$\begin{aligned} \xi'_{тр} &= \frac{1}{(1,82 * \lg(Re') - 1,64)^2} = \frac{1}{(1,82 * \lg(39,96 * 10^3) - 1,64)^2} \\ &= 15,8 * 10^{-3} \end{aligned}$$

Аналогично для $Re'' > 10^5$:

$$\begin{aligned} \xi''_{тр} &= \frac{1}{(1,82 * \lg(Re'') - 1,64)^2} = \frac{1}{(1,82 * \lg(39,96 * 10^3) - 1,64)^2} \\ &= 22 * 10^{-3} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \xi_{тр}^{ДФ} &= (1 - x) \cdot \xi'_{тр} + x \cdot \xi''_{тр} = (1 - 0,95) * 15,8 * 10^{-3} + 0,95 * 22 * 10^{-3} \\ &= 21,7 * 10^{-3} \end{aligned}$$

$$\frac{1}{\rho_{см}} = \frac{x}{\rho_к} + \frac{1 - x}{\rho_н} = \frac{0,95}{299,9} + \frac{1 - 0,95}{645} = 3,24 * 10^{-3} \frac{м^3}{кг}$$

$$\rho_{см} = 308,6 \frac{кг}{м^3}$$

$$P_{тр}^{ДФ} = \xi_{тр}^{ДФ} \cdot \frac{l}{d_B} \frac{(\rho w)^2}{2\rho_{см}} = 21,7 * 10^{-3} * \frac{3,8}{0,018} * \frac{(455,8 * 1,2)^2}{2 * 308,6} = 2,2 \text{ кПа}$$

Потери давления на ускорение:

$$\Delta P_{уск} = (\rho \cdot w)^2 \cdot \left(\frac{1}{\rho_к} - \frac{1}{\rho_н} \right) = (308,6 * 1,2)^2 * \left(\frac{1}{299,9} - \frac{1}{645} \right) = 244,6 \text{ Па}$$

Потери давления за счет гидростатического напора:

$$\Delta P_{\text{гидр}} = (\rho_{\text{н}} - \rho_{\text{к}}) * h * g = (645 - 299,9) * 0,2 * 9,8 = 676,4 \text{ Па}$$

При изменении направления потока воды:

$$\xi_{\text{м}} = 0,55$$

$$\Delta P_{\text{м1}} = \xi_{\text{м}} * \frac{\rho \cdot w^2}{2} = 0,55 * \frac{308,6 * 1,2^2}{2} = 122,2 \text{ Па}$$

Потери давления при расширении потока:

$$\Delta P_{\text{м2}} = \xi_{\text{м}} * \frac{\rho \cdot w^2}{2} = 0,65 * \frac{308,6 * 1,2^2}{2} = 144,4 \text{ Па}$$

$$\begin{aligned} \Delta P_2 &= \Delta P_{\text{тр}}^{\text{дф}} + \Delta P_{\text{гидр}} + \Delta P_{\text{уск}} + \Delta P_{\text{м1}} + \Delta P_{\text{м2}} \\ &= 2207 + 676,4 + 244,6 + 122,2 + 144,4 = 3407 \text{ Па} \end{aligned}$$

КПД нетто

$$N_{\text{пр1}} = \frac{\Delta P_1 \cdot G}{< \rho > \cdot \eta_{\text{н}}} = \frac{920,8 * 22,25 * 10^3}{10,4 * 10^3 \cdot 0,85} = 2,3 \text{ МПа}$$

$$N_{\text{пр2}} = \frac{\Delta P_2 \cdot G}{< \rho > \cdot \eta_{\text{н}}} = \frac{3407 * 160,9}{10,4 * 10^3 \cdot 0,85} = 61,8 \text{ Па}$$

$$W_{\text{сн}} = (N_{\text{пр1}} + N_{\text{пр2}}) * i * j = (2,3 * 10^6 + 61,8) * 3 * 2 = 13,87 \text{ МВт}$$

$$\eta_{\text{нетто}} = \frac{W_{\text{ЭГ}} - W_{\text{сн}}}{Q_{\text{р}}} = \frac{300 - 13,87}{732} = 0,39$$

$$\eta_{\text{нетто}} = 39,2 \%$$

Прочностной расчет элементов парогенератора

Плоское днище

$P_{\text{расч}} = 20,5 \text{ Мпа}$, $[\sigma_H] = 380 \text{ Мпа}$

Марка стали – 12Х18Н10Т (при 500 °С)

$$\delta_{\text{расч}} = \frac{k}{k_0} * D * \sqrt{\frac{P}{[\sigma_d]}}$$

Днище без отверстий ($k_0 = 1$)

$$k = 0.46$$

$$\delta_{\text{расч}} = \frac{0.46}{1} * 990 * \sqrt{\frac{20,5}{380}} = 106 \text{ мм}$$

Трубные доски

$$\delta_{\text{расч}} = 0.393 * D * \sqrt{\frac{P}{\varphi * [\sigma_d]}}$$

$$\varphi = 0.975 - 0.68 * \frac{d_B}{t} = 0.975 - \frac{0.68 * 18}{1,5 * 20} = 0,57$$

$$\delta_{\text{расч}} = 0.393 * 990 * \sqrt{\frac{20,5}{0,57 * 380}} = 120 \text{ мм}$$

Толщину трубной доски можно принимать несколько меньшей (до 20-25%), чем полученная величина

Получим:

$$\delta_{\text{расч}} = 100 \text{ мм}$$

Кожух

$$\delta_{\text{расч}} = \frac{p^{\text{расч}} \cdot D}{2 * (1 - 0,1)[\sigma_d] + p^{\text{расч}}} + c$$

$$p^{\text{расч}} = 1,25 * (0,55 - 0,1) \text{ МПа} = 0,56 \text{ МПа}$$

$$c = 0,1 * \frac{p^{\text{расч}} \cdot D}{2 * (1 - 0,1)[\sigma_d] + p^{\text{расч}}} + 0,002 * 60 + 0 + 0,074 =$$

$$= 0,1 * \frac{0,56 * 990}{2 * (1 - 0,1) * 380 + 0,56} + 0,002 * 60 + 0 + 0,074 = 0,27 \text{ мм}$$

Тогда:

$$\delta_{\text{расч}} = \frac{0,56 * 990}{2 * (1 - 0,1) * 380 + 0,56} + 0,27 = 1,08 \text{ мм}$$

Заключение

В данном курсовом проекте для БРЕСТ-ОД-300 - реакторная установка на быстрых нейтронах с нитридным уран-плутониевым топливом равновесного состава, свинцовым теплоносителем и двухконтурной схемой преобразования тепла, были посчитаны следующие величины:

Была построена TS – диаграмма по посчитанным термодинамическим параметрам воды в каждой точке.

Найдены значения:

$$\eta_{\text{брутто}} = 0.42$$

$$Q_P = 732 \text{ МВт}$$

$$Q_I = 365,8 \text{ МВт}$$

$$Q_{\text{эк}} = 15,3 \text{ МВт}$$

$$Q_{\text{исп}} = 138,2 \text{ МВт}$$

$$Q_{\text{опп}} = 101,3 \text{ МВт}$$

$$Q_{\text{ппп}} = 110,9 \text{ МВт}$$

$$Q_{II} = 365,8 \text{ МВт}$$

Количество труб $n=817$

Проходное сечение для жидкого металла $f_{\text{ЖМ}} = 0,51 \text{ м}^2$

Скорость теплоносителя: $W_{Pb} = 4,16 \frac{\text{м}}{\text{с}}$

Скорость рабочего тела: $W_{\text{воды}} = 1,2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$

Площадь теплопередающей поверхности

$$F_{\text{сумм}} = 197,35 \text{ м}^2$$

$$l_{\text{сумм}} = 3,8 \text{ м}$$

$$\eta_{\text{НЕТТО}} = 39,2\%$$

Толщина плоского днища $\delta = 106 \text{ мм}$

Толщина трубной доски $\delta = 100 \text{ мм}$

Толщина стенок кожуха $\delta = 1,08 \text{ мм}$