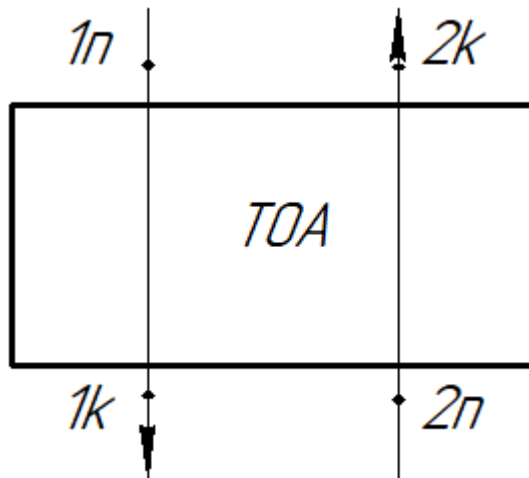




ПРИЛОЖЕНИЕ Г.

Методика расчета ТОА



Принятые обозначения:

- 1 - прямой поток (высокого давления)
- 2 - обратный поток (низкого давления)
- п - параметры потока на входе
- к - параметры потока на выходе
- т - среднее значение параметров

Рис.1 Условная схема ТОА

Исходные данные:

1. Из расчета цикла:

	Прямой (теплый)	Обратный (холодный)
Теплоноситель	Не	Не
Расход	$G_1 = 460 \frac{\text{кг}}{\text{ч}} = 0.128 \cdot \frac{\text{кг}}{\text{с}}$	$G_2 = 494.5 \frac{\text{кг}}{\text{ч}} = 0.1374 \cdot \frac{\text{кг}}{\text{с}}$
Температура на входе	$T_{1n} = 318.1\text{K}$	$T_{2n} = 75.98\text{K}$
Температура на выходе	$T_{1k} = 80\text{K}$	$T_{2k} = 297.7\text{K}$
Давление на входе	$p_{1n} = 2.3\text{МПа}$	$p_{2n} = 0.1141\text{МПа}$
Давление на выходе	$p_{1k} = 2.264\text{МПа}$	$p_{2k} = 0.105\text{МПа}$

2. Недорекуперации:

Недорекуперация на теплом конце: $\Delta T_h = T_{1n} - T_{2k} = 20.4\text{K}$

Недорекуперация на холодном конце: $\Delta T_c = T_{1k} - T_{2n} = 4.02\text{K}$

3. Допустимые падения давлений:

Падение давления в прямом потоке: $\Delta p_{\text{пр}} = p_{1n} - p_{1k} = 36 \cdot \text{кПа}$

Падение давления в обратном потоке: $\Delta p_{\text{обр}} = p_{2n} - p_{2k} = 9.1 \cdot \text{кПа}$

4. Средняя температура потоков:

$$T_{1m} = \frac{T_{1n} + T_{1k}}{2} = \frac{318.1 \cdot \text{K} + 80 \cdot \text{K}}{2} = 199.1\text{K}$$

$$T_{2m} = \frac{T_{2k} + T_{2n}}{2} = \frac{297.7 \cdot \text{K} + 75.98 \cdot \text{K}}{2} = 186.8\text{K}$$

5. Среднее давление потоков:

$$p_{1m} = \frac{p_{1n} + p_{1k}}{2} = \frac{2.3 \cdot \text{МПа} + 2.264 \cdot \text{МПа}}{2} = 2.282 \cdot \text{МПа}$$

$$p_{2m} = \frac{p_{2n} + p_{2k}}{2} = \frac{0.1141 \cdot \text{МПа} + 0.105 \cdot \text{МПа}}{2} = 0.1095 \cdot \text{МПа}$$

6. Значение энтальпий потоков на входе и выходе из теплообменного аппарата:

$$\begin{aligned} h_{1n} &= h_{\text{Tpz}}(T_{1n}, p_{1n}, x_{\text{np}}), \quad h_{1k} = h_{\text{Tpz}}(T_{1k}, p_{1k}, x_{\text{np}}) \\ h_{2n} &= h_{\text{Tpz}}(T_{2n}, p_{2n}, x_{\text{обp}}), \quad h_{2k} = h_{\text{Tpz}}(T_{2k}, p_{2k}, x_{\text{обp}}) \\ h_{1n} &= 1664.4 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}, \quad h_{1k} = 425.3 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \\ h_{2n} &= 400 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}, \quad h_{2k} = 1551.6 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \end{aligned}$$

7. Значение теплоемкостей потоков на входе и выходе из теплообменного аппарата:

$$\begin{aligned} c_{p1n} &= c_{p_Tpz}(T_{1n}, p_{1n}, x_{\text{np}}), \quad c_{p1k} = c_{p_Tpz}(T_{1k}, p_{1k}, x_{\text{np}}) \\ c_{p2n} &= c_{p_Tpz}(T_{2n}, p_{2n}, x_{\text{обp}}), \quad c_{p2k} = c_{p_Tpz}(T_{2k}, p_{2k}, x_{\text{обp}}) \\ c_{p1n} &= 5.194 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \quad c_{p1k} = 5.247 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \\ c_{p2n} &= 5.197 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \quad c_{p2k} = 5.193 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \end{aligned}$$

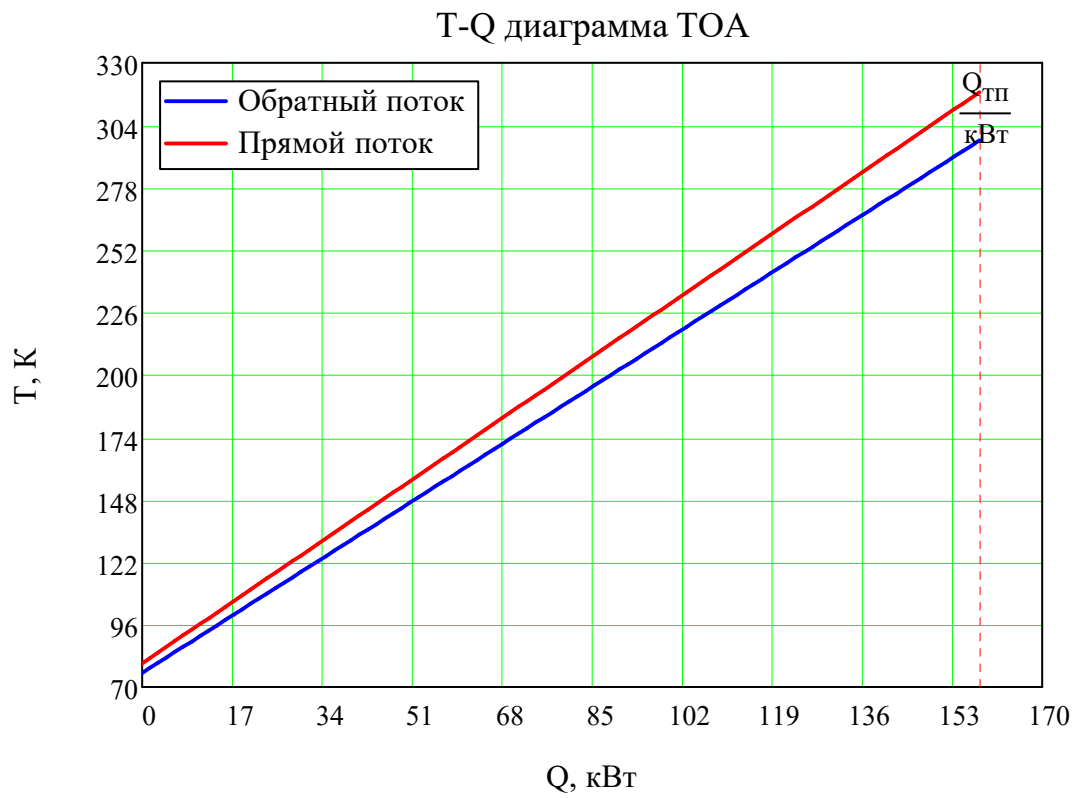
8. Средняя удельная теплоемкость потоков:

$$\begin{aligned} c_{p1m} &= \frac{c_{p1n} + c_{p1k}}{2} = 5.22 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \\ c_{p2m} &= \frac{c_{p2n} + c_{p2k}}{2} = 5.195 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \end{aligned}$$

9. Тепловой поток и T-Q диаграмма теплообменного аппарата:

$$Q_{\text{ТП}} = G_1 \cdot (h_{1n} - h_{1k}) = 158.33 \cdot \text{кВт}$$





Проверка граничных условий:

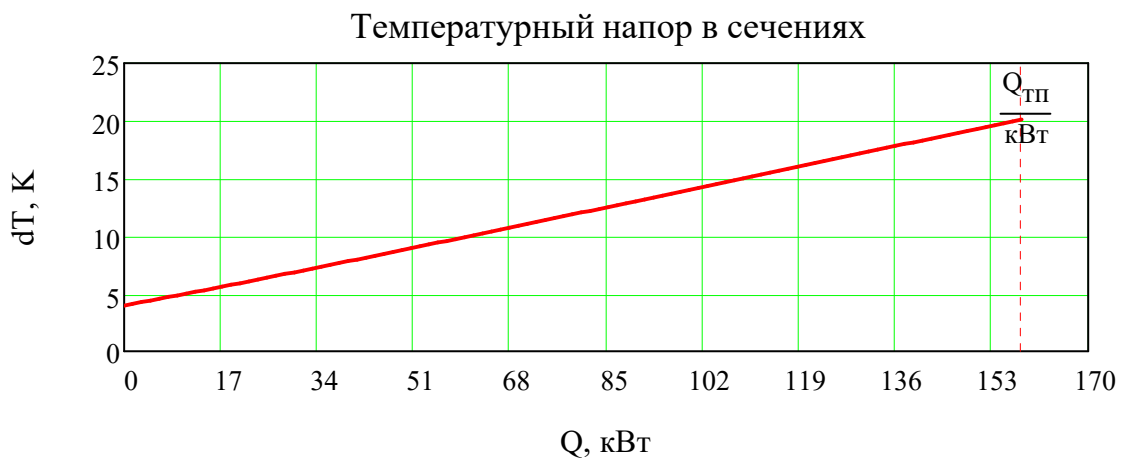
$$T_{1i}(0) = 80 \text{ K}$$

$$T_{2i}(0) = 76 \text{ K}$$

$$T_{1i}(Q_{\text{ТП}}) = 318.1 \text{ K}$$

$$T_{2i}(Q_{\text{ТП}}) = 297.92 \text{ K}$$

10. Температурный напор в сечениях:



11. Средняя разность температур:

$$\Delta T_m = \left| \begin{array}{l} \frac{\int_0^{Q_{\text{ТП}}} dT(Q) dQ}{Q_{\text{ТП}}} \quad \text{if} \left(\left| \frac{C_{p1k} - C_{p1n}}{C_{p1n}} \right| > 0.05 \right) \vee \left(\left| \frac{C_{p2k} - C_{p2n}}{C_{p2n}} \right| > 0.05 \right) \\ \frac{(T_{1n} - T_{2k}) + (T_{1k} - T_{2n})}{2} \quad \text{if } 0.8 < \frac{T_{1n} - T_{2k}}{T_{1k} - T_{2n}} < 1.2 \\ \frac{(T_{1k} - T_{2n}) - (T_{1n} - T_{2k})}{\ln \left(\frac{T_{1k} - T_{2n}}{T_{1n} - T_{2k}} \right)} \quad \text{otherwise} \end{array} \right.$$

Условия:

$$\left| \frac{C_{p1k} - C_{p1n}}{C_{p1n}} \right| > 0.05 = 0 \quad \left| \frac{C_{p2k} - C_{p2n}}{C_{p2n}} \right| > 0.05 = 0 \quad \frac{T_{1n} - T_{2k}}{T_{1k} - T_{2n}} = 5.1$$

Средний температурный напор: $\Delta T_m = 10.08 \text{ K}$

12. Запас поверхности: $Z = 1.3$

13. Допускаемые потери давления в намотке: коэффициент ($a=0.65...0.70$) $a = 0.65$

$$\Delta P_{1'} = a \cdot \Delta p_{\text{пр}} = 23.4 \cdot \text{кПа} \quad \Delta P_{2'} = a \cdot \Delta p_{\text{обр}} = 5.92 \cdot \text{кПа}$$

14. Плотность при средней температуре для прямого и обратного потока:

$$\rho_{1m} = \rho_{\text{Трз}}(T_{1m}, p_{1m}, x_{\text{пр}}) \quad \rho_{2m} = \rho_{\text{Трз}}(T_{2m}, p_{2m}, x_{\text{обр}})$$

$$\rho_{1m} = 5.4 \cdot \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad \rho_{2m} = 0.28 \cdot \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

15. Теплопроводность при средней температуре для прямого и обратного потока:

$$\begin{aligned} \lambda_{1m} &= \lambda_{\text{Тдх}}(T_{1m}, \rho_{1m}, x_{\text{пр}}) & \lambda_{2m} &= \lambda_{\text{Тдх}}(T_{2m}, \rho_{2m}, x_{\text{обр}}) \\ \lambda_{1m} &= 0.1193 \cdot \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} & \lambda_{2m} &= 0.1126 \cdot \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \end{aligned}$$

16. Динамическая вязкость при средней температуре для прямого и обратного потока:

$$\begin{aligned} \mu_{1m} &= \mu_{\text{Тдх}}(T_{1m}, \rho_{1m}, x_{\text{пр}}) & \mu_{2m} &= \mu_{\text{Тдх}}(T_{2m}, \rho_{2m}, x_{\text{обр}}) \\ \mu_{1m} &= 1.53 \times 10^{-5} \cdot \text{Па} \cdot \text{с} & \mu_{2m} &= 1.45 \times 10^{-5} \cdot \text{Па} \cdot \text{с} \end{aligned}$$

17. Типоразмер теплообменной поверхности:

Типоразмер

100	16	50
150	25	90
200	33.5	110
300	50	200
300	80	250
300	80	250
400	80	250
500	80	275
600	100	400
700	120	400
800	150	500
1000	160	550

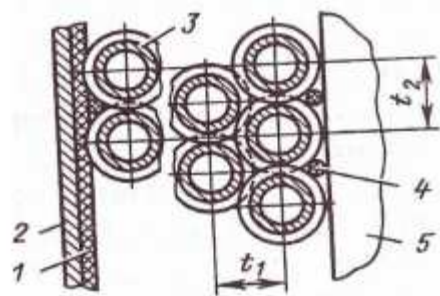
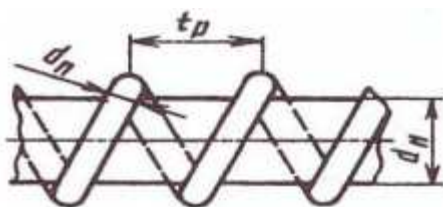


Рис.2 Параметры навивки



Параметры выбранной поверхности:

Наружный диаметр трубы:	$d_2 = 5 \cdot \text{мм}$	Коэффициент оребрения:	$\varphi = 2.59$
Внутренний диаметр трубы:	$d_1 = 4 \cdot \text{мм}$	Отношение площадей:	$S_{\text{уд}} = 0.303$
Диаметр проволоки:	$d_{\text{п}} = 0.8 \cdot \text{мм}$	Компактность:	$\psi = 985 \cdot \frac{\text{м}^2}{\text{м}^3}$
Поперечный шаг намотки:	$t_1 = 5.35 \cdot \text{мм}$	Приведенная масса:	$M' = 0.35 \cdot \frac{\text{м}^2}{\text{кг}}$
Продольный шаг намотки:	$t_2 = 6.1 \cdot \text{мм}$		
Эквивалентный диаметр:	$d_9 = 1.23 \cdot \text{мм}$		

I. Предварительный расчет

I.1 Критерий Прандтля:

$$Pr_1 = \frac{\mu_{1\text{м}} \cdot Cp_{1\text{м}}}{\lambda_{1\text{м}}} = 0.6672$$

$$Pr_2 = \frac{\mu_{2\text{м}} \cdot Cp_{2\text{м}}}{\lambda_{2\text{м}}} = 0.6674$$

I.2 Коэффициенты уравнения теплопередачи:

$$A_1 = 0.023 \cdot \frac{\lambda_{1\text{м}}}{d_1} \cdot Pr_1^{0.33}$$

$$A_2 = 0.168 \cdot \frac{\lambda_{2\text{м}}}{d_9} \cdot Pr_2^{0.33}$$

$$A_1 = 0.6005$$

$$A_2 = 13.46$$

$$P_1 = \frac{Z \cdot Q_{\text{ТП}}}{8 \cdot \varphi \cdot \rho_{1\text{м}} \cdot \Delta P_{1\text{м}} \cdot \Delta T_{\text{м}} \cdot G_1} \cdot \left(\frac{\mu_{1\text{м}}}{d_1} \right)^3$$

$$P_2 = \frac{Z \cdot Q_{\text{ТП}}}{2 \cdot \rho_{2\text{м}} \cdot \Delta P_{2\text{м}} \cdot \Delta T_{\text{м}} \cdot G_2} \cdot \left(\frac{\mu_{2\text{м}}}{d_9} \right)^3$$

$$P_1 = 3.3649 \times 10^{-9} \cdot \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

$$P_2 = 7.2483 \times 10^{-5} \cdot \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

I.2.1 Граничные значения коэффициента теплоотдачи:

1. По трубному потоку:

$$g_1 = 3.3856 \cdot 10^8 \cdot P_1 = 1.139 \cdot \frac{Вт}{м^2 \cdot К} \quad \text{при} \quad Re_1 = 2300$$

2. По межтрубному потоку:

$$g_{21} = 15.05 \cdot 10^3 \cdot P_2 = 1.091 \cdot \frac{Вт}{м^2 \cdot К} \quad \text{при} \quad Re_{21} = 20$$

$$g_{22} = 6.656 \cdot 10^5 \cdot P_2 = 48.245 \cdot \frac{Вт}{м^2 \cdot К} \quad \text{при} \quad Re_{22} = 100$$

3. Критериальные коэффициенты в зависимости от гидравлического сопротивления:

трубный поток

$$S_1(k) = \begin{cases} \begin{pmatrix} 64 \\ -1 \end{pmatrix} & \text{if } k \leq g_1 \\ \begin{pmatrix} 0.3164 \\ -0.25 \end{pmatrix} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$B_1(k) = S_1(k)_0$$

$$x_1(k) = S_1(k)_1$$

$$Re_1(k) = \left(\frac{k}{B_1(k) \cdot P_1} \right)^{\frac{1}{x_1(k)+3}}$$

$$\zeta_1(k) = B_1(k) \cdot Re_1(k)^{x_1(k)}$$

межтрубный поток

$$S_2(k) = \begin{cases} \begin{pmatrix} 12.8 \\ -0.64 \end{pmatrix} & \text{if } g_{21} \leq k \leq g_{22} \\ \begin{pmatrix} 2.65 \\ -0.3 \end{pmatrix} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$B_2(k) = S_2(k)_0$$

$$x_2(k) = S_2(k)_1$$

$$Re_2(k) = \left(\frac{k}{B_2(k) \cdot P_2} \right)^{\frac{1}{x_2(k)+3}}$$

$$f_2(k) = B_2(k) \cdot Re_2(k)^{x_2(k)}$$

I.3 Число Нуссельта и Стантона:

$$St_2(k) = 0.168 \cdot Re_2(k)^{-0.3} \cdot Pr_2^{-0.66}$$

$$St_2(g_{22}) = 0.055$$

$$Nu_1(k) = \begin{cases} Re_1, = Re_1(k) \\ 3.66 & \text{if } Re_1, \leq 2300 \\ \left[3.66 \cdot \left(\frac{Re_1,}{2300} \right)^{(2.3 + \log(Pr_1))} \right] & \text{if } 2300 < Re_1, \leq 4000 \\ \left(0.023 \cdot Re_1,^{0.8} \cdot Pr_1^{0.33} \right) & \text{if } 4000 < Re_1, \leq 10^5 \\ \text{"null"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Nu_1(g_1) = 3.66$$

Массовые скорости потоков:

трубный поток

межтрубный поток

$$w_1(k) = Re_1(k) \cdot \frac{\mu_{1m}}{d_1}$$

$$w_2(k) = Re_2(k) \cdot \frac{\mu_{2m}}{d_2}$$

Коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_1(k) = \frac{Nu_1(k) \cdot \lambda_{1m}}{d_1}$$

$$\alpha_2(k) = St_2(k) \cdot w_2(k) \cdot Cp_{2m}$$

$$\alpha_1(g_1) = 109.2 \cdot \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$$

$$\alpha_2(g_{22}) = 335.82 \cdot \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$$

Коэффициент теплопередачи:

$$F(k) = \frac{k}{\alpha_2(k)} + \frac{k \cdot \varphi}{\alpha_1(k)} - 1$$

$$F(g_{22}) = -0.691 \quad F(g_{21}) = -0.964$$

$$F(g_{21}) < 1 = 1$$

Корень уравнения:

$$k' = \text{root} \left(F(k), k, g_{21}, 1000 \frac{Вт}{м^2 \cdot К} \right) = 244.79 \cdot \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$$

Коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_1(k') = 1212.52 \cdot \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$$

$$\alpha_2(k') = 513.04 \cdot \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$$

Факторы трения Дарси: $\zeta_1(k') = 0.0293 \quad f_2(k') = 0.556$

Число Нуссельта и Стантена:

$$Nu_1(k') = 40.64$$

$$St_2(k') = 0.046$$

II. Расчет геометрических и конструктивных параметров намотки теплообменного аппарата

II.1 Действительная площадь поверхности ТОА:

$$F_d = \frac{Z \cdot Q_{ТП}}{k' \cdot \Delta T_m} = 83.4 \cdot м^2$$

II.2 Критерий Рейнольдса:

трубный поток

$$Re_1(k') = 13535.8$$

межтрубный поток

$$Re_2(k') = 182.5$$

II.3 Массовые скорости потоков:

$$w_1(k') = 51.62 \cdot \frac{кг}{м^2 \cdot с}$$

$$w_2(k') = 2.15 \cdot \frac{кг}{м^2 \cdot с}$$

$$\frac{w_1(k')}{\rho_{1m}} = 9.51 \cdot \frac{м}{с}$$

$$\frac{w_2(k')}{\rho_{2m}} = 7.61 \cdot \frac{м}{с}$$

II.4 Число труб:

$$n'_{\text{тр}} = \frac{G_1}{\frac{\pi}{4} \cdot d_1^2 \cdot w_1(k')} = 197 \quad n_{\text{тр}} = \text{ceil}(n'_{\text{тр}}) = 197$$



Число труб на главной диагонали: $n_{\text{диаг}} = n_{\text{тр}} \cdot (n_{\text{тр}})_1 = 16$

Оценка патрубка для размещения вводного пучка: $2 \cdot n_{\text{диаг}} \cdot d_1 = 128 \cdot \text{мм} \quad d_1 = 4 \cdot \text{мм}$

II.5 Средняя длина одной трубы:

$$L_{1\text{тр}} = \frac{F_{\text{д}}}{\varphi \cdot \pi \cdot d_1 \cdot n_{\text{тр}}} = 13 \cdot \text{м}$$

II.6 Площадь среднего сечения свободного объема намотки:

$$S_2 = \frac{G_2}{w_2(k')} = 0.064 \cdot \text{м}^2$$

II.7 Площадь фронтального сечения:

$$S_{\Phi} = \frac{S_2}{E_1} = 0.2112 \cdot \text{м}^2 \quad E_1 = 0.303$$

II.8 Высота навивки:

$$H_{\text{нав}} = \frac{F_{\text{д}}}{S_2 \cdot E_2} = 401.28 \cdot \text{мм} \quad \frac{F_{\text{д}}}{\psi \cdot S_{\Phi}} = 400.81 \cdot \text{мм} \quad E_2 = 3247 \cdot$$

II.9 Число рядов труб по высотк намотки:

$$n_p = \frac{H_{\text{нав}} - (d_2 + 2 \cdot d_{\text{п}})}{t_2} + 1 = 65.7$$

II.10 Наружный диаметр намотки:

Диаметр сердечника: $D_c = 20 \cdot d_2 = 100 \cdot \text{мм}$

$$D = \sqrt{\frac{S_{\Phi}}{\frac{\pi}{4}} + D_c^2} = 528.12 \cdot \text{мм}$$

II.11 Средний диаметр намотки:

$$D_{\text{ср}} = \frac{D + D_c}{2} = 314.058 \cdot \text{мм}$$

II.12 Средняя относительная кривизна труб в намотке:

$$A_{\text{тр}} = \frac{d_1}{D_{\text{ср}}} = 0.0127$$

II.13 Число слоев труб в намотке:

$$m'_{\text{тр}} = \frac{0.5 \cdot (D - D_{\text{с}}) - d_2 - 2 \cdot d_{\text{п}}}{t_1} + 1 = 39.8 \quad m_{\text{тр}} = \text{ceil}(m'_{\text{тр}}) = 40$$

II.14 Объем навивки:

$$V_{\text{нав}} = \frac{F_{\text{д}}}{E_3} = 0.0847 \cdot \text{м}^3 \quad E_3 = 985 \frac{1}{\text{м}}$$

II.15 Масса навивки:

$$M_{\text{нав}} = \frac{F_{\text{д}}}{E_4} = 238.231 \cdot \text{кг} \quad E_4 = 0.35 \frac{\text{м}^2}{\text{кг}}$$

II.16 Гидравлическое сопротивление:

$$\Delta p'_{11} = \zeta_1(k') \cdot \frac{w_1(k')^2}{2 \cdot \rho_{1\text{м}}} \cdot \frac{L_{1\text{тр}}}{d_1} \quad \Delta p'_{11} = 23397.7 \cdot \text{Па}$$

$$\Delta p'_{22} = f_2(k') \cdot \frac{w_2(k')^2}{2 \cdot \rho_{2\text{м}}} \cdot \frac{F_{\text{д}}}{S_2} \quad \Delta p'_{22} = 5915 \cdot \text{Па}$$

$$\frac{\Delta p_{\text{пр}} - \Delta p'_{11}}{\Delta p_{\text{пр}}} = 0.35 \quad \Delta p_{\text{пр}} = 36 \cdot \text{кПа}$$

$$\frac{\Delta p_{\text{обр}} - \Delta p'_{22}}{\Delta p_{\text{обр}}} = 35\% \quad \Delta p_{\text{обр}} = 9.1 \cdot \text{кПа}$$

III. Уточненный расчет геометрических и конструктивных параметров намотки теплообменного аппарата

Уточняем количество труб в намотке, для заполнения трубной решетки:

$$n''_{\text{тр}} = n_{\text{тр}}'(n_{\text{тр}})_0 \quad n''_{\text{тр}} = 217$$

Количество слоев навивки:

$$m''_{\text{тр}} = \text{round}\left(\frac{n_{\text{тр}}}{n''_{\text{тр}}} \cdot m_{\text{тр}}\right) = 36$$

1. Наружный диаметр намотки:

$$D'' = D_{\text{с}} + 2 \cdot (m''_{\text{тр}} - 1) \cdot t_1 + 2 \cdot (d_2 + 2 \cdot d_{\text{п}}) = 487.7 \cdot \text{мм}$$

2. Средний диаметр намотки:

$$D''_{\text{ср}} = \frac{D'' + D_{\text{с}}}{2} = 293.8 \cdot \text{мм}$$

3. Средняя относительная кривизна труб в намотке:

$$A''_{\text{тр}} = \frac{d_1}{D''_{\text{ср}}} = 0.014$$

4. Площадь фронтального сечения:

$$S''_{\text{ф}} = \frac{\pi}{4} \cdot (D''^2 - D_{\text{с}}^2) = 0.179 \cdot \text{м}^2$$

5. Площадь среднего сечения свободного объёма:

$$S''_2 = S''_{\phi} \cdot E_1 = 0.0542 \cdot \text{м}^2$$

6. Массовая скорость межтрубного потока:

$$w''_2 = \frac{G_2}{S''_2} = 2.533 \cdot \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$$

7. Критерий Рейнольдса:

$$\text{Re}''_2 = \frac{w''_2 \cdot d_3}{\mu_{2m}} = 215.4$$

8. Критерий Прандтля:

$$\text{Pr}_2 = 0.6674$$

9. Критерий Стантона:

$$\text{St}''_2 = 0.168 \cdot \frac{\text{Re}''_2^{-0.3}}{\text{Pr}_2^{0.66}} = 0.0438$$

10. Коэффициент теплоотдачи в межтрубном пространстве:

$$\alpha''_2 = \text{St}''_2 \cdot w''_2 \cdot C_{p2m} = 576.13 \cdot \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

11. Площадь сечения труб:

$$S''_1 = \pi \cdot \frac{d_1^2}{4} \cdot n''_{\text{тр}} = 2.7 \times 10^{-3} \cdot \text{м}^2$$

12. Массовая скорость трубного потока:

$$w''_1 = \frac{G_1}{S''_1} = 46.86 \cdot \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$$

13. Критерий Рейнольдса:

$$\text{Re}''_1 = \frac{w''_1 \cdot d_1}{\mu_{1m}} = 12287$$

14. Критерий Прандтля:

$$\text{Pr}_1 = 0.6672$$

15. Критерий Нуссельта:

$$A''_{\text{тр}} > 2 \cdot 10^{-3} = 1 \quad \text{необходимо учесть кривизну при расчете сопротивления и числа Нуссельта}$$

$$a_1 = 0.023 \quad a_2 = 3.65 \quad b_2 = 0.2903 \quad b_1 = 14.8 \quad R = 2.2 \cdot 10^4$$

$$Nu_{1k}(Re_1, A_{Tp}) = \begin{cases} Re_K = 2300 \cdot (1 + 8.6 \cdot A_{Tp}^{0.45}) \\ \left[a_2 + 0.08 \cdot (1 + 0.8 \cdot A_{Tp}^{0.9}) \cdot Re_1^{(0.5+b_2 \cdot A_{Tp}^{0.194})} \cdot Pr_1^{\frac{1}{3}} \right] & \text{if } 100 < Re_1 \leq Re_K \\ \left[a_1 \cdot \left[1 + 14.8 \cdot (1 + A_{Tp}) \cdot A_{Tp}^{\frac{1}{3}} \right] \cdot Re_1^{(0.8-0.22 \cdot A_{Tp}^{0.1})} \cdot Pr_1^{\frac{1}{3}} \right] & \text{if } Re_K < Re_1 < R \\ \left[a_1 \cdot \left[1 + 3.6 \cdot (1 - A_{Tp}) \cdot A_{Tp}^{0.8} \right] \cdot Re_1^{0.8} \cdot Pr_1^{\frac{1}{3}} \right] & \text{if } R < Re_1 < 1.5 \cdot 10^5 \end{cases}$$

$$Nu''_1 = Nu_{1k}(Re''_1, A''_{Tp}) = 44.7$$

16. Коэффициент теплоотдачи в трубном пространстве:

$$\alpha''_1 = \frac{Nu''_1 \cdot \lambda_{1m}}{d_1} = 1333.8 \cdot \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$$

17. Коэффициент теплопередачи:

$$k'' = \frac{1}{\frac{\varphi}{\alpha''_1} + \frac{1}{\alpha''_2}} = 271.92 \cdot \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$$

18. Необходимая площадь поверхности теплообмена:

$$F''_H = \frac{Q_{ТП}}{k'' \cdot \Delta T_m} = 57.74 \cdot м^2$$

19. Действительная площадь поверхности теплообмена:

$$F''_Д = Z \cdot F''_H = 75.06 \cdot м^2$$

20. Высота намотки:

$$H''_{нав} = \frac{F''_Д}{S''_2 \cdot E_2} = 426.33 \cdot мм \quad \frac{F''_Д}{\psi \cdot S''_{\phi}} = 425.83 \cdot мм$$

21. Число рядов труб по высоте намотки:

$$n''_p = \frac{H''_{нав} - (d_2 + 2 \cdot d_{II})}{t_2} + 1 = 69.8$$

22. Средняя длина одной трубы:

$$L''_{1Tp} = \frac{F''_Д}{\varphi \cdot \pi \cdot d_1 \cdot n''_{Tp}} = 10.6 \cdot м$$

23. Объем навивки:

$$V''_{нав} = \frac{F''_Д}{E_3} = 76.205 \cdot л$$

24. Масса навивки:

$$M''_{\text{нав}} = \frac{F''_{\text{д}}}{E_4} = 214.461 \cdot \text{кг}$$

25. Коэффициент сопротивления в трубах:

$$A''_{\text{тр}} > 2 \cdot 10^{-3} = 1 \quad \text{необходимо учесть кривизну при расчете сопротивления и числа Нуссельта}$$

$$\zeta_{1k}(Re_1, A_{\text{тр}}) = \begin{cases} Re_k = 2300 \cdot (1 + 8.6 \cdot A_{\text{тр}}^{0.45}) \\ \left[1 + 0.14 \cdot A_{\text{тр}}^{0.97} \cdot Re_1^{(1-0.644 \cdot A_{\text{тр}}^{0.312})} \right] \cdot \frac{64}{Re_1} & \text{if } 100 < Re_1 \leq Re_k \\ \left(1 + 2.88 \cdot \frac{10^4 \cdot A_{\text{тр}}^{0.62}}{Re_1} \right) \cdot \frac{0.3164}{Re_1^{0.25}} & \text{if } Re_k < Re_1 < 2.2 \cdot 10^4 \\ \left[1 + 0.0823 \cdot (1 + A_{\text{тр}}) \cdot A_{\text{тр}}^{0.53} \cdot Re_1^{0.25} \right] \cdot \frac{0.3164}{Re_1^{0.25}} & \text{if } 2.2 \cdot 10^4 < Re_1 < 1.5 \cdot 10^5 \end{cases}$$

$$\zeta''_1 = \zeta_{1k}(Re''_1, A''_{\text{тр}}) = 0.035$$

26. Гидравлическое сопротивление по трубному потоку:

$$\Delta p''_1 = \zeta''_1 \cdot \frac{w''_1{}^2}{2 \cdot \rho_{1m}} \cdot \frac{L''_{1\text{тр}}}{d_1} \quad \begin{matrix} \Delta p''_1 = 18.8 \cdot \text{кПа} \\ \Delta p_{\text{пр}} = 36 \cdot \text{кПа} \end{matrix} \quad \frac{\Delta p_{\text{пр}} - \Delta p''_1}{\Delta p_{\text{пр}}} = 47.8\%$$

27. Коэффициент сопротивления в межтрубном пространстве:

$$f_2(Re_2) = \begin{cases} (12.8 \cdot Re_2^{-0.64}) & \text{if } 40 \leq Re_2 \leq 100 \\ (2.65 \cdot Re_2^{-0.3}) & \text{if } 100 < Re_2 < 4000 \\ f_2(k') & \text{otherwise} \end{cases} \quad f''_2 = f_2(Re''_2) = 0.5288$$

28. Гидравлическое сопротивление по межтрубному пространству:

$$\Delta p''_2 = f''_2 \cdot \frac{w''_2{}^2}{2 \cdot \rho_{2m}} \cdot \frac{F''_{\text{д}}}{S''_2} \quad \begin{matrix} \Delta p''_2 = 8.33 \cdot \text{кПа} \\ \Delta p_{\text{обр}} = 9.1 \cdot \text{кПа} \end{matrix} \quad \frac{\Delta p_{\text{обр}} - \Delta p''_2}{\Delta p_{\text{обр}}} = 8.48\%$$

Распределение трубок по слоям теплообменника

Средний диаметр слоя: $D_{\text{слоя}}(j) = D_c + d_2 + 2 \cdot d_{\text{п}} + 2 \cdot t_1 \cdot (j - 1)$

Наружный диаметр слоя: $D_{\text{н}}(j) = D_c + 2d_2 + 2 \cdot d_{\text{п}} + 2 \cdot t_1 \cdot (j - 1)$

Расчетное число трубок в слое: $i(j) = \text{round}\left(\frac{n''_{\text{тр}} \cdot D_{\text{слоя}}(j)}{m''_{\text{тр}} \cdot D''_{\text{ср}}}\right)$

Число витков одной трубки в слое: $n_{\text{тр_сл}}(j) = \frac{n''_p}{i(j)}$ $n''_p = 69.8$

Длина витка трубки в слое: $l_{\text{тр_сл}}(j) = \sqrt{(\pi \cdot D_{\text{слоя}}(j))^2 + (i(j) \cdot t_2)^2}$

Длина одной трубки в слое: $l(j) = l_{\text{тр_сл}}(j) \cdot n_{\text{тр_сл}}(j)$

$j = 1 \dots m''_{\text{тр}}$

$m''_{\text{тр}} = 36$

$D_{\text{слоя}}(j) =$	$i(j) =$	$n_{\text{тр_сл}}(j) =$	$l_{\text{тр_сл}}(j) =$	$l(j) =$	$D_H(j) =$
106.6 · мм	2	34.9	335.1 · мм	11.7 · м	111.6 · мм
117.3	2	34.9	368.7	12.87	122.3
128	3	23.3	402.5	9.37	133
138.7	3	23.3	436.1	10.15	143.7
149.4	3	23.3	469.7	10.93	154.4
160.1	3	23.3	503.3	11.71	165.1
170.8	4	17.5	537.1	9.37	175.8
181.5	4	17.5	570.7	9.96	186.5
192.2	4	17.5	604.3	10.55	197.2
202.9	4	17.5	637.9	11.13	207.9
213.6	4	17.5	671.5	11.72	218.6
224.3	5	14	705.3	9.85	229.3
235	5	14	738.9	10.32	240
245.7	5	14	772.5	10.79	250.7
256.4	5	14	806.1	11.25	261.4
267.1	5	14	839.7	11.72	272.1
277.8	6	11.6	873.5	10.16	282.8
288.5	6	11.6	907.1	10.55	293.5
299.2	6	11.6	940.7	10.94	304.2
309.9	6	11.6	974.3	11.34	314.9
320.6	7	10	$1 \cdot 10^3$	10.05	325.6
331.3	7	10	$1 \cdot 10^3$	10.39	336.3
342	7	10	$1.1 \cdot 10^3$	10.72	...
...

$\sum_j i(j) = 217$

$\sum_j (i(j) \cdot l(j)) = 2321.9 \cdot \text{м}$