

Техническое задание

Рассчитать основные параметры пластинчато-ребристого двухпоточного теплообменного аппарата.

Эскиз ТОА:

Прямой поток - ГЕЛИЙ.

Температура на входе в ТОА $T_1 := 318.1\text{K}$

Давление потока на входе $p_1 := 2.3\text{МПа}$

Массовый расход $G_1 := 460 \cdot \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$

Обратный поток - ГЕЛИЙ.

Температура на входе в ТОА $T_2 := 75.98\text{K}$

Давление потока на входе $p_2 := 0.1141\text{МПа}$

Массовый расход $G_2 := 494.5 \cdot \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$

Значение недорекуперации:

$$\Delta T := 4\text{K}$$

Коэффициент запаса по площади поверхности 20%, т.е.

$$\beta := 1.2$$

Средняя температура:

$$T_{\text{ср}} := \frac{T_1 + T_2}{2} = 197.04\text{K}$$

Для полученного значения по таблице свойств вещества определяем средние теплоемкости:

прямого

$$C_{p_{\text{ср}1}} := C_{p_Tprz}(T_{\text{ср}}, p_1, x_{\text{He}}) = 5.199 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$$

обратного

$$C_{p_{\text{ср}2}} := C_{p_Tprz}(T_{\text{ср}}, p_2, x_{\text{He}}) = 5.193 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$$

Дополнительно. Разъяснение по выбору конца задания недорекуперации.

Построим зависимость температуры в точке 3 от отношения водяных эквивалентов. Соотношение следует из теплового баланса аппарата:

$$Q_{OC} + W_{пр} \cdot (T_1 - T_3) = W_{обр} \cdot (T_1 - \Delta T - T_2)$$

$$T_3 = T_1 + \frac{Q_{OC}}{W_{пр}} - \frac{W_{обр}}{W_{пр}} \cdot (T_1 - \Delta T - T_2)$$

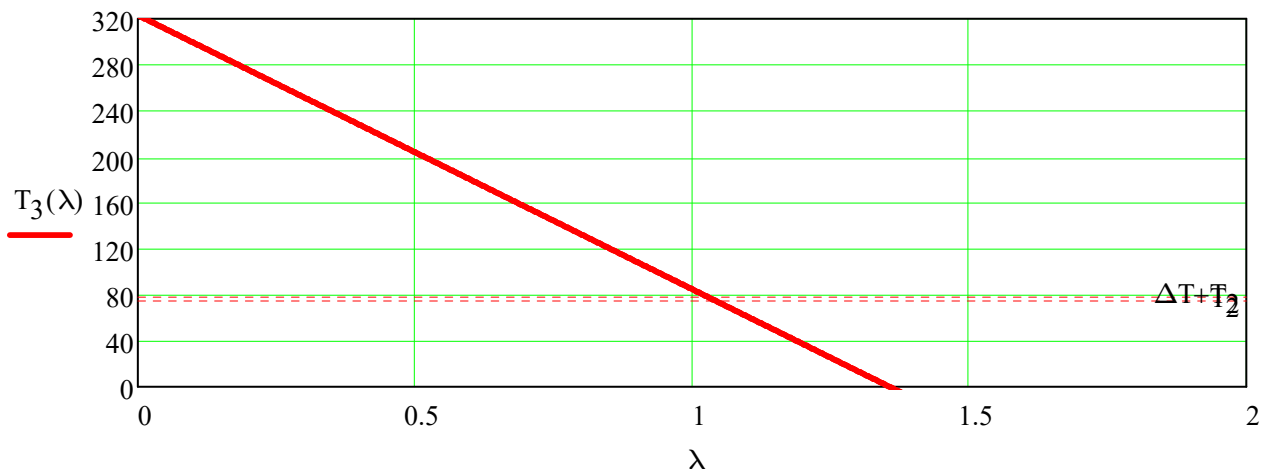
$$T_3(\lambda) = T_1 + \frac{Q_{OC}}{W_{пр}} - \lambda \cdot (T_1 - \Delta T - T_2)$$

Условно зададим:

$$\frac{Q_{OC}}{W_{пр}} = 5K$$

Тогда:

$$T_3(\lambda) := T_1 + 5K - \lambda \cdot (T_1 - \Delta T - T_2)$$



Из графика следует, следующее: когда отношение водяных эквивалентов обратного и прямого потоков меньше 1 (водяной эквивалент **прямого потока больше** водяного эквивалента **обратного потока**) недорекуперацию следует задавать на **теплом конце ТОА** и наоборот, когда водяной эквивалент обратного потока больше водяного эквивалента прямого потока, недорекуперация задается на **холодном конце**.

Из полученной закономерности также можно сделать вывод: в случае, когда водяной эквивалент прямого потока сильно больше водяного эквивалента обратного потока - обратный поток не может принять значительный тепловой поток, в результате чего возникает явление "засечка".

1. Определим водяные эквиваленты потоков:

прямого

$$W_1 := G_1 \cdot C_{p1} = 0.664 \cdot \frac{\text{кВт}}{\text{К}}$$

обратного

$$W_2 := G_2 \cdot C_{p2} = 0.713 \cdot \frac{\text{кВт}}{\text{К}}$$

Недорекупация на холодном конце теплообменника, т.к. $W_2 > W_1$:

$$T_3 := T_2 + \Delta T = 79.98 \text{ K}$$

Определим параметры рабочих веществ:

Прямой поток:

$$T_1 = 318.1 \text{ K}$$

$$T_3 = 79.98 \text{ K}$$

$$h_1 := h_{\text{TPZ}}(T_1, p_1, x_{\text{He}}) = 1.664 \times 10^3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad h_3 := h_{\text{TPZ}}(T_3, p_1, x_{\text{He}}) = 425.242 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$\rho_1 := \rho_{\text{TPZ}}(T_1, p_1, x_{\text{He}}) = 3.446 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad \rho_3 := \rho_{\text{TPZ}}(T_3, p_1, x_{\text{He}}) = 13.335 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Обратный поток:

$$T_2 = 75.98 \text{ K}$$

$$h_2 := h_{\text{TPZ}}(T_2, p_2, x_{\text{He}}) = 400.012 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$\rho_2 := \rho_{\text{TPZ}}(T_2, p_2, x_{\text{He}}) = 0.722 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Тепловой баланс ТОА:

$$G_1 \cdot h_1 + G_2 \cdot h_2 = G_1 \cdot h_3 + G_2 \cdot h_4$$

Тогда энтальпия обратного потока:

$$h_4 := \frac{G_1 \cdot h_1 + G_2 \cdot h_2 - G_1 \cdot h_3}{G_2} = 1.553 \times 10^3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Соответствующая данной энтальпии плотность:

$$\rho_4 := \rho_{\text{phz}}(p_2, h_4, x_{\text{He}}) = 0.184 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Соответствующая данной энтальпии температура

$$T_4 := T_{\text{phz}}(p_2, h_4, x_{\text{He}}) = 297.915 \text{ K}$$

Средняя температура прямого потока:

$$T_{\text{срПр}} := \frac{T_1 + T_3}{2} = 199.04 \text{ K}$$

Средняя температура обратного потока:

$$T_{\text{срОбр}} := \frac{T_2 + T_4}{2} = 186.947 \text{ K}$$

Теплофизические параметры, соответствующие средней температуре:

Плотности:

$$\rho_{\text{срПр}} := \rho_{\text{Трз}}(T_{\text{срПр}}, p_1, x_{\text{He}}) = 5.473 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$\rho_{\text{срОбр}} := \rho_{\text{Трз}}(T_{\text{срОбр}}, p_2, x_{\text{He}}) = 0.294 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Динамические вязкости:

$$\mu_{\text{срПр}} := \mu_{\text{Тдх}}(T_{\text{срПр}}, \rho_{\text{срПр}}, x_{\text{He}}) = 1.526 \times 10^{-5} \text{Па} \cdot \text{с}$$

$$\mu_{\text{срОбр}} := \mu_{\text{Тдх}}(T_{\text{срОбр}}, \rho_{\text{срОбр}}, x_{\text{He}}) = 1.447 \times 10^{-5} \text{Па} \cdot \text{с}$$

Коэффициент теплопроводности:

$$\lambda_{\text{срПр}} := \lambda_{\text{Тдх}}(T_{\text{срПр}}, \rho_{\text{срПр}}, x_{\text{He}}) = 0.119 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

$$\lambda_{\text{срОбр}} := \lambda_{\text{Тдх}}(T_{\text{срОбр}}, \rho_{\text{срОбр}}, x_{\text{He}}) = 0.113 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

Теплоемкости изобарные:

$$C_{\text{срПр}} := C_{p_Трз}(T_{\text{срПр}}, p_1, x_{\text{He}}) = 5.198 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$C_{\text{срОбр}} := C_{p_Трз}(T_{\text{срОбр}}, p_2, x_{\text{He}}) = 5.194 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Число Прандтля:

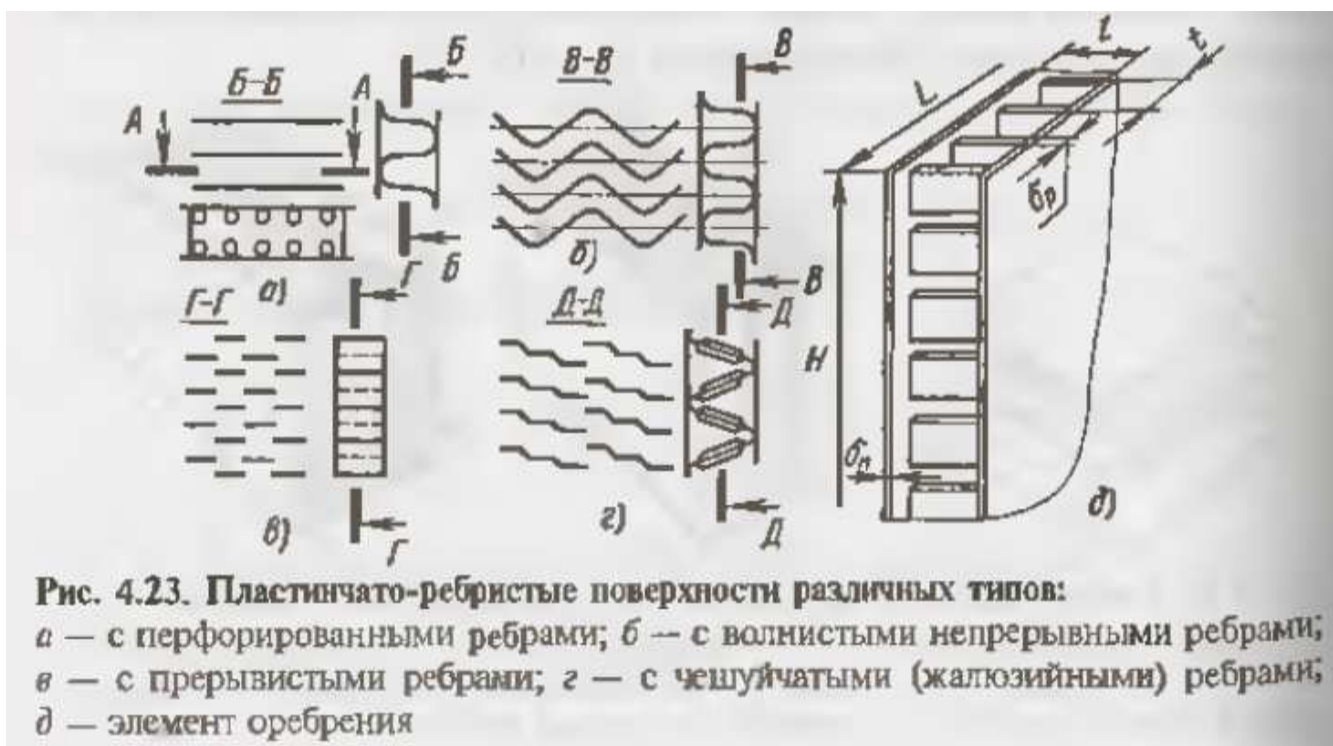
$$\text{Pr}_{\text{Пр}} := \frac{C_{\text{срПр}} \cdot \mu_{\text{срПр}}}{\lambda_{\text{срПр}}} = 0.664$$

$$\text{Pr}_{\text{Обр}} := \frac{C_{\text{срОбр}} \cdot \mu_{\text{срОбр}}}{\lambda_{\text{срОбр}}} = 0.667$$

2. Тепловой расчет

Рёбра	l/t	Толщина ребер δ_p	Расстояние между прорезями Δ	Эквивалент- ный диаметр d_3	Компактность по свободному объёму, $\text{м}^2/\text{м}^3$			Степень стеснения γ
					$S_{\text{св.р}}$	$S_{\text{св.п}}$	$S_{\text{св}}$	
Гладкие непре- рывные	—	0,15	—	4,64	520	342	862	0,196
Прерывистые	6/4	0,15	1,5	4,64	520	342	862	0,196
	12/4	0,25	2,0	5,69	534	169	703	0,153
	12/2	0,25	2,0	3,05	1143	169	1312	0,209
	4/2	0,15	1,0	2,50	1081	519	1600	0,285
	6/2	0,25	1,0	2,68	1143	342	1485	0,282
	6/2,3	0,20	10	3,08	952	342	1297	0,244
Чешуйчатые	7/4	0,15	5,0	4,22	604	342	946	0,175

Геометрические характеристики поверхности:



тип поверхности: 6/4

- высота ребра: $l := 6\text{мм}$
 - шаг ребра: $t := 4\text{мм}$

- толщина ребра: $\delta_p := 0.15\text{мм}$
 - расстояние между прорезями: $\Delta := 1.5\text{мм}$
 - эквивалентный диаметр: $d_3 := 4.64\text{мм}$

Компактность:

- поверхность ребер: $S_{CB.P} := 520 \frac{m^2}{m^3}$

- поверхность проставок: $S_{CB.П} := 342 \frac{m^2}{m^3}$

- по свободному объему: $S_{CB} := 862 \frac{m^2}{m^3}$

Степень стеснения: $\gamma := 0.196$

Коэффициент оребрения: $or := \frac{S_{CB.P}}{S_{CB}} = 0.603$

Задается:

- толщина пластины: $\delta_{П} := 0.5 \text{ мм}$

- материал: сплав алюминия деформируемый

- коэффициент теплопроводности материала проставок и ребер:

$$\lambda_{П} := 150 \cdot \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \quad \lambda_{Р} := 150 \cdot \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

Тепловая нагрузка:

$$Q := G_2 \cdot C_{cpOбП} \cdot (T_4 - T_2) = 158.325 \cdot \text{кВт}$$

Приняли, что теплообменные поверхности для прямого и обратного потоков одинаковые. Зададимся скоростью потока:

$$v_1 := 1.2 \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Площадь свободного сечения:

$$F_{cb1} := \frac{G_1}{\rho_{cpПр} \cdot v_1} = 0.019 \cdot \text{м}^2 \quad F_{cb2} := F_{cb1} = 0.019 \cdot \text{м}^2$$

Скорость обратного потока:

$$v_2 := \frac{G_2}{F_{cb2} \cdot \rho_2} = 9.785 \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Числа Рейнольдса

$$Re_1 := \frac{v_1 \cdot \rho_{cpПр} \cdot d_э}{\mu_{cpПр}} = 1997.5 \quad Re_2 := \frac{v_2 \cdot \rho_{cpOбР} \cdot d_э}{\mu_{cpOбР}} = 921$$

Коэффициенты теплоотдачи находятся в зависимости от чисел Рейнольдса по таблице:

Ребра	l/t	Теплообмен			Гидравлическое сопротивление		
		Re	A	n	Re	B	m
Непрерывные	6/4	500—2 000	0,21	0,48	7 000—2 000	32,7	—1,03
		2 000—6 500	0,0089	0,905	2 000—30 000	0,065	—0,21
		6 500—25 000	0,027	0,78			
Прерывистые	6/4	700—2 000	0,0088	1,067	600—2 000	0,73	—0,32
		2 000—13 000	0,076	0,77	2 000—17 000	0,12	—0,085
	12/4	1800—6 000	0,10	0,74	1800—6 000	0,21	—0,15
		6 000—22 000	0,23	0,65	6 000—30 000	0,12	—0,08
	12/2	700—2 500	0,0031	1,15	700—2 500	0,37	—0,21
		2 500—7 500	0,19	0,64	2 500—10 000	0,23	—0,15
	6/2	800—2 000	0,002	1,19	600—1200	5,95	—0,62
		2 000—5 500	0,0113	0,962	1200—6 500	0,22	—0,15
Чешуйчатые	4/2	700—4 500	0,0022	1,16	400—900	89,6	—1,0
					900—6 500	0,24	—0,13
	6/2,3	160—1600	0,0043	1,098	200—950	22,5	—0,93
		1600—4 500	0,0512	0,76	950—3 000	1,18	—0,49
					3 000—5 000	0,2	—0,27
	7/4	2 400—10 500	0,19	0,63	2 600—14 500	0,23	—0,14

$$A := 0.0088 \quad n := 1.067$$

фактор Колборна:

$$j_1 := A \cdot (Re_1)^{n-1} = 0.015 \quad j_2 := A \cdot (Re_2)^{n-1} = 0.014$$

коэффициенты теплоотдачи:

$$\alpha_1 := \frac{j_1 \cdot \rho_{\text{срПр}} \cdot v_1 \cdot C_{\text{срПр}}}{\frac{3}{2} \cdot Pr_{\text{Пр}}} = 923.06 \cdot \frac{Вт}{К \cdot м^2} \quad \alpha_2 := \frac{j_2 \cdot \rho_{\text{срОбр}} \cdot v_2 \cdot C_{\text{срОбр}}}{\frac{3}{2} \cdot Pr_{\text{Обр}}} = 380.521 \cdot \frac{Вт}{К \cdot м^2}$$

Определение коэффициента теплопередачи

Параметры ребра

$$m_1 := \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha_1}{\lambda_p \cdot \delta_p}} = 286.443 \cdot \frac{1}{м} \quad m_2 := \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha_2}{\lambda_p \cdot \delta_p}} = 183.913 \cdot \frac{1}{м}$$

КПД ребра

$$\eta_{p1} := \frac{\tanh\left(\frac{m_1 \cdot l}{2}\right)}{\frac{m_1 \cdot l}{2}} = 0.81 \quad \eta_{p2} := \frac{\tanh\left(\frac{m_2 \cdot l}{2}\right)}{\frac{m_2 \cdot l}{2}} = 0.91$$

КПД оребренных поверхностей

$$\eta_1 := 1 - \frac{S_{CB.P}}{S_{CB}} \cdot (1 - \eta_{p1}) = 0.885 \quad \eta_2 := 1 - \frac{S_{CB.P}}{S_{CB}} \cdot (1 - \eta_{p2}) = 0.945$$

Коэффициент теплопередачи, отнесённый к поверхности прямого потока:

$$k_1 := \left(\frac{1}{\alpha_1 \cdot \eta_1} + \frac{\delta_{\Pi} \cdot S_{CB}}{\lambda_{\Pi} \cdot S_{CB.\Pi}} + \frac{S_{CB} \cdot F_{cb1}}{\alpha_2 \cdot \eta_2 \cdot S_{CB} \cdot F_{cb2}} \right)^{-1} = 249.263 \cdot \frac{\text{Вт}}{\text{К} \cdot \text{м}^2}$$

Средний температурный напор:

$$\Delta T_{CP} := \frac{(T_1 - T_4) - (T_3 - T_2)}{\ln\left(\frac{T_1 - T_4}{T_3 - T_2}\right)} = 9.999 \text{ К}$$

Площадь поверхности теплообмена:

$$F_1 := \frac{Q}{k_1 \cdot \Delta T_{CP}} = 63.522 \cdot \text{м}^2$$

Основные геометрические характеристики:

Свободный объём каналов по тёплому потоку:

$$V_{CB1} := \frac{F_1}{S_{CB}} = 0.074 \cdot \text{м}^3$$

Высота теплообменника:

$$H := \frac{V_{CB1}}{F_{cb1}} = 3.788 \cdot \text{м}$$

Площадь полного поперечного сечения теплообменника:

$$F := 2 \cdot \frac{F_{cb1}}{1 - \gamma} = 0.048 \cdot \text{м}^2$$

Принимаем число каналов для каждого потока $N_K := 8$, высота канала $h_K := 16 \text{ мм}$, тогда ширина канала без учета проставочных брусков:

$$L := \frac{F}{2 \cdot N_K \cdot h_K} = 252.075 \cdot \text{мм}$$

С учётом толщины разделительных пластин $\delta_{\Pi} = 0.5$ мм ширина сечения пакета теплообменника:

$$\left[2 \cdot N_K \cdot h_K + \delta_{\Pi} \cdot (2 \cdot N_K + 1) \right] = 200.5 \cdot \text{мм}$$

$$L = 252.075 \text{ мм}$$

Гидравлические сопротивления собственной поверхности теплообменника (для данных поверхностей по таблице:

$$B := 0.73 \quad m := -0.32$$

Фактор трения прямого потока:

$$f_1 := B \cdot (Re_1)^m = 0.064$$

гидравлическое сопротивление:

$$\Delta p_1 := 4 \cdot f_1 \cdot \frac{\rho_{\text{срПр}} \cdot v_1^2}{2} \cdot \frac{H}{d_9} = 825.3 \cdot \text{Па}$$

Фактор трения обратного потока:

$$f_2 := B \cdot (Re_2)^m = 0.082$$

гидравлическое сопротивление:

$$\Delta p_2 := 4 \cdot f_2 \cdot \frac{\rho_{\text{срОбр}} \cdot v_2^2}{2} \cdot \frac{H}{d_9} = 3770.8 \cdot \text{Па}$$