

Техническое задание

Требуемая холодопроизводительность: $Q_x := 100 \text{ Вт}$

Температурный уровень охлаждения: $T_x := 80 \text{ К}$

Давление компримирования: $p_6 := 1 \text{ МПа}$

Давление наименьшее в ресивере РС_Б: $p_5 := 0.1 \text{ МПа}$

Температура сброса теплоты в КХ: $T_k := 300 \text{ К}$

Изоэнтропный КПД КМ: $\eta_{s_KM} := 0.8$

Разность температур в ТОА: $\Delta T_{TOA} := 3 \text{ К}$

Разность температур в охладителе: $\Delta T_{KX} := 5 \text{ К}$

Разность температур в регенераторе: $\Delta T_P := 5 \text{ К}$

Тепловой расчет машины Гиффорда-Макмагона

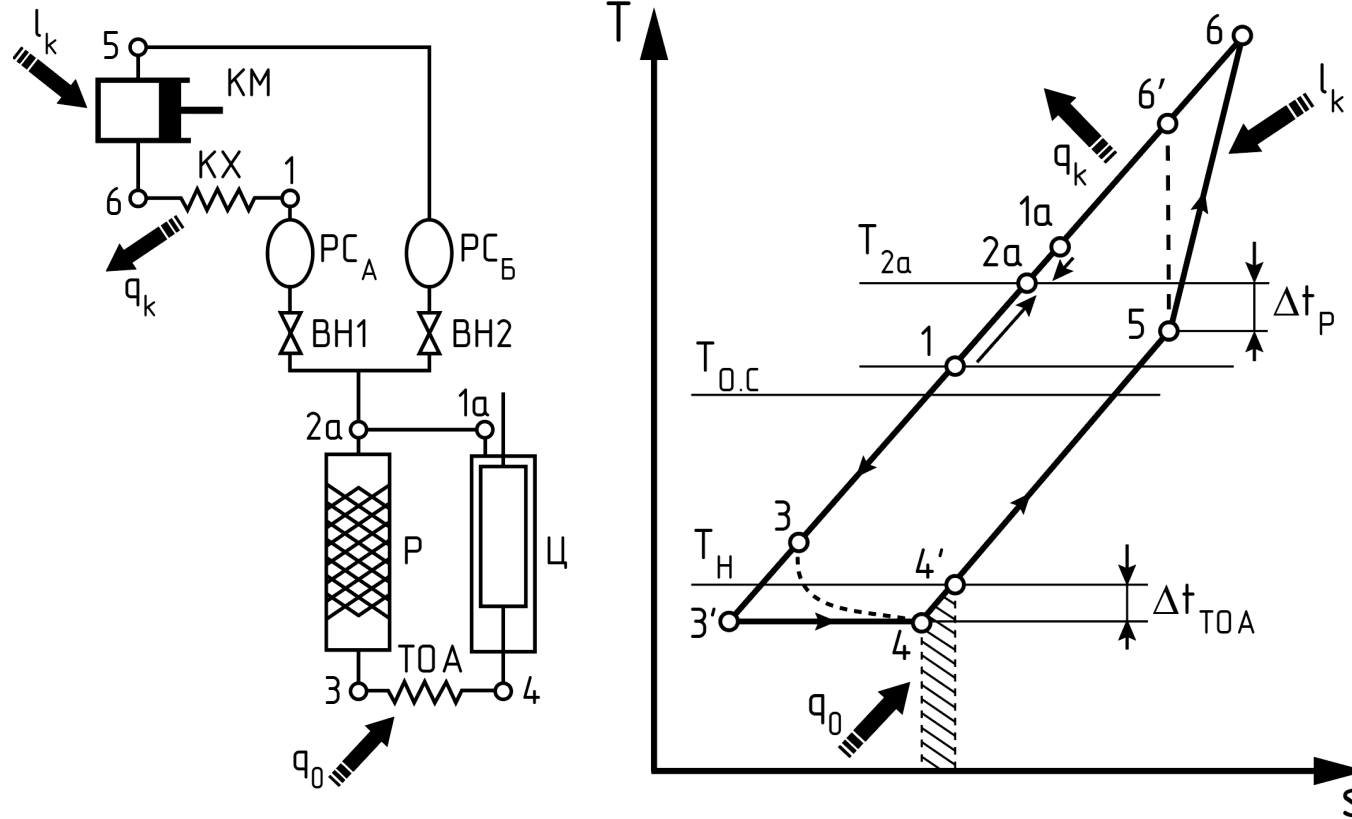
➡ Ссылка: C:\RFP8\rfp2mcd(c) Release [mcd14].xmcd

$i := 1$

$hfld := "C:\Rfp8\fluids\HELIUM.FLD"$

$ierr_{SETUP}(i, hfld, hfm, hrf) = 0$

$x_{tst} := (1)$



Обозначения на схеме:

KM - компрессорная машина; KX - концевой холодильник; BH1, BH2 - клапан впускной и выпускной, Ц - цилиндр с вытеснительным поршнем; PC - ресиверы высокого и низкого давления;

Параметры рабочего вещества после KM и KX:

$$T_1(p_5, p_6, T_k, T_x) := T_k + \Delta T_{KX}$$

$$p_1(p_5, p_6, T_k, T_x) := p_6$$

$$h_1(p_5, p_6, T_k, T_x) := h_{Tpz}(T_1(p_5, p_6, T_k, T_x), p_1(p_5, p_6, T_k, T_x), x_{tst})$$

$$p_1(p_5, p_6, T_k, T_x) = 1 \cdot \text{МПа}$$

$$T_1(p_5, p_6, T_k, T_x) = 305 \text{ К} \quad T_1(p_5, p_6, T_k, T_x) = 31.85 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$h_1(p_5, p_6, T_k, T_x) = 1592.3 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Параметры рабочего вещества в процессе охлаждения в ТОА:

$$T_4(p_5, p_6, T_k, T_x) := T_x - \Delta T_{\text{ТОА}}$$

$$p_4(p_5, p_6, T_k, T_x) := p_5$$

$$h_4(p_5, p_6, T_k, T_x) := h_{\text{Tpz}}(T_4(p_5, p_6, T_k, T_x), p_4(p_5, p_6, T_k, T_x), x_{\text{tst}})$$

$$T_{4'}(p_5, p_6, T_k, T_x) := T_x$$

$$p_{4'}(p_5, p_6, T_k, T_x) := p_5$$

$$T_4(p_5, p_6, T_k, T_x) = 77 \text{ К} \quad T_4(p_5, p_6, T_k, T_x) = -196.1 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$p_4(p_5, p_6, T_k, T_x) = 0.1 \cdot \text{МПа}$$

$$h_4(p_5, p_6, T_k, T_x) = 405.3 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$T_{4'}(p_5, p_6, T_k, T_x) = 80 \text{ К} \quad T_{4'}(p_5, p_6, T_k, T_x) = -193.1 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$p_{4'}(p_5, p_6, T_k, T_x) = 0.1 \cdot \text{МПа}$$

Показатель адиабаты по определению:

$$k(p_5, p_6, T_k, T_x) := \frac{C_{p_Tpz}(T_1(p_5, p_6, T_k, T_x), p_1(p_5, p_6, T_k, T_x), x_{\text{tst}})}{C_{v_Tpz}(T_1(p_5, p_6, T_k, T_x), p_1(p_5, p_6, T_k, T_x), x_{\text{tst}})}$$

$$k(p_5, p_6, T_k, T_x) = 1.666$$

Параметры рабочего вещества после заполнения всего доступного объема:

$$T_{1a}(p_5, p_6, T_k, T_x) := \frac{k(p_5, p_6, T_k, T_x) \cdot T_1(p_5, p_6, T_k, T_x)}{\frac{p_5}{p_1(p_5, p_6, T_k, T_x)} \cdot \left(\frac{T_1(p_5, p_6, T_k, T_x)}{T_k} \cdot k(p_5, p_6, T_k, T_x) - 1 \right) + 1}$$

$$p_{1a}(p_5, p_6, T_k, T_x) := p_6$$

$$h_{1a}(p_5, p_6, T_k, T_x) := h_{Tpz}(T_{1a}(p_5, p_6, T_k, T_x), p_{1a}(p_5, p_6, T_k, T_x), x_{tst})$$

$$T_{1a}(p_5, p_6, T_k, T_x) = 475.1 \text{ K} \quad T_{1a}(p_5, p_6, T_k, T_x) = 201.9.^\circ\text{C}$$

$$p_{1a}(p_5, p_6, T_k, T_x) = 1 \cdot \text{МПа}$$

$$h_{1a}(p_5, p_6, T_k, T_x) = 2475.6 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Изменение удельного объема рабочего вещества при его переталкивании через регенератор:

$$\frac{\nu_4}{\nu_{1a}} = \frac{T_4}{T_{1a}} \quad \frac{T_4(p_5, p_6, T_k, T_x)}{T_{1a}(p_5, p_6, T_k, T_x)} = 0.16207$$

Доля рабочего вещества, поступившего дополнительно в процессе переталкивания:

$$V_d(p_5, p_6, T_k, T_x) := 1 - \frac{T_4(p_5, p_6, T_k, T_x)}{T_{1a}(p_5, p_6, T_k, T_x)}$$

$$V_d(p_5, p_6, T_k, T_x) = 0.838$$

Параметры рабочего вещества перед регенератором после смешения:

$$h_{2a}(p_5, p_6, T_k, T_x) := \left[h_1(p_5, p_6, T_k, T_x) \cdot V_d(p_5, p_6, T_k, T_x) \dots \right. \\ \left. + h_{1a}(p_5, p_6, T_k, T_x) \cdot (1 - V_d(p_5, p_6, T_k, T_x)) \right]$$

$$p_{2a}(p_5, p_6, T_k, T_x) := p_6$$

$$T_{2a}(p_5, p_6, T_k, T_x) := T_{phz}(p_{2a}(p_5, p_6, T_k, T_x), h_{2a}(p_5, p_6, T_k, T_x), x_{tst})$$

$$h_{2a}(p_5, p_6, T_k, T_x) = 1735.4 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$p_{2a}(p_5, p_6, T_k, T_x) = 1 \cdot \text{МПа}$$

$$T_{2a}(p_5, p_6, T_k, T_x) = 332.6 \text{ K} \quad T_{2a}(p_5, p_6, T_k, T_x) = 59.4 \cdot ^\circ\text{C}$$

Проверка (допущение: изменение энтальпии пропорционально изменению температуры):

$$T_{2a_}(p_5, p_6, T_k, T_x) := \left(\frac{T_4(p_5, p_6, T_k, T_x)}{T_{1a}(p_5, p_6, T_k, T_x)} \cdot T_{1a}(p_5, p_6, T_k, T_x) \dots \right. \\ \left. + V_d(p_5, p_6, T_k, T_x) \cdot T_1(p_5, p_6, T_k, T_x) \right)$$

$$T_{2a_}(p_5, p_6, T_k, T_x) = 332.6 \text{ K} \quad T_{2a_}(p_5, p_6, T_k, T_x) = 59.4 \cdot ^\circ\text{C}$$

Параметры рабочего вещества на выходе из регенератора:

$$T_5(p_5, p_6, T_k, T_x) := T_{2a_}(p_5, p_6, T_k, T_x) - \Delta T_P$$

$$p_5 = 0.1 \cdot \text{МПа}$$

$$h_5(p_5, p_6, T_k, T_x) := h_{Tpz}(T_5(p_5, p_6, T_k, T_x), p_5, x_{tst})$$

$$s_5(p_5, p_6, T_k, T_x) := s_{\text{Tpz}}(T_5(p_5, p_6, T_k, T_x), p_5, x_{\text{tst}})$$

$$T_5(p_5, p_6, T_k, T_x) = 327.6 \text{ K} \quad T_5(p_5, p_6, T_k, T_x) = 54.4 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$h_5(p_5, p_6, T_k, T_x) = 1706.7 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$s_5(p_5, p_6, T_k, T_x) = 28.523 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$$

Условие работоспособности КГМ:

$$T_5(p_5, p_6, T_k, T_x) > T_1(p_5, p_6, T_k, T_x) = 1$$

$$T_5(p_5, p_6, T_k, T_x) = 327.6 \text{ K} \quad T_1(p_5, p_6, T_k, T_x) = 305 \text{ K}$$

Параметры рабочего вещества в конце изэнтропного сжатия:

$$s_6'(p_5, p_6, T_k, T_x) := s_5(p_5, p_6, T_k, T_x)$$

$$p_6'(p_5, p_6, T_k, T_x) := p_6$$

$$T_6'(p_5, p_6, T_k, T_x) := T_{\text{psz}}(p_6'(p_5, p_6, T_k, T_x), s_6'(p_5, p_6, T_k, T_x), x_{\text{tst}})$$

$$h_6'(p_5, p_6, T_k, T_x) := h_{\text{psz}}(p_6'(p_5, p_6, T_k, T_x), s_6'(p_5, p_6, T_k, T_x), x_{\text{tst}})$$

$$s_6'(p_5, p_6, T_k, T_x) = 28.523 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$$

$$p_6'(p_5, p_6, T_k, T_x) = 1 \cdot \text{МПа}$$

$$T_6'(p_5, p_6, T_k, T_x) = 822.7 \text{ K} \quad T_6'(p_5, p_6, T_k, T_x) = 549.6 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$h_6(p_5, p_6, T_k, T_x) = 4280.8 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Параметры рабочего вещества в конце сжатия в КМ:

$$h_6(p_5, p_6, T_k, T_x) := h_5(p_5, p_6, T_k, T_x) + \frac{(h_6'(p_5, p_6, T_k, T_x) - h_5(p_5, p_6, T_k, T_x))}{\eta_{s_KM}}$$

$$p_6 = 1 \cdot \text{МПа}$$

$$T_6(p_5, p_6, T_k, T_x) := T_{phz}(p_6, h_6(p_5, p_6, T_k, T_x), x_{tst})$$

$$h_6(p_5, p_6, T_k, T_x) = 4924.4 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$T_6(p_5, p_6, T_k, T_x) = 946.7 \text{ К} \quad T_6(p_5, p_6, T_k, T_x) = 673.5 \cdot ^\circ\text{C}$$

Удельная работа КМ:

$$l_k(p_5, p_6, T_k, T_x) := h_6(p_5, p_6, T_k, T_x) - h_5(p_5, p_6, T_k, T_x)$$

$$l_k(p_5, p_6, T_k, T_x) = 3.218 \times 10^3 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Удельная тепловая нагрузка на охладитель:

$$q_k(p_5, p_6, T_k, T_x) := h_6(p_5, p_6, T_k, T_x) - h_1(p_5, p_6, T_k, T_x)$$

$$q_k(p_5, p_6, T_k, T_x) = 3332.1 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Из уравнения теплового баланса ступени охлаждения интегральная изобарная холодопроизводительность:

$$q_0(p_5, p_6, T_k, T_x) := h_5(p_5, p_6, T_k, T_x) - h_1(p_5, p_6, T_k, T_x)$$

$$q_0(p_5, p_6, T_k, T_x) = 114.4 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Проверка энергетического баланса:

$$\frac{|q_k(p_5, p_6, T_k, T_x) - (q_0(p_5, p_6, T_k, T_x) + l_k(p_5, p_6, T_k, T_x))|}{q_k(p_5, p_6, T_k, T_x)} = 0\%$$

Массовый расход рабочего вещества:

$$G_0(p_5, p_6, T_k, T_x) := \frac{Q_x}{q_0(p_5, p_6, T_k, T_x)}$$

$$G_0(p_5, p_6, T_k, T_x) = 3.147 \cdot \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$$

Объемный расход рабочего вещества при условиях на всасывании:

$$V_0(p_5, p_6, T_k, T_x) := \frac{G_0(p_5, p_6, T_k, T_x)}{\rho_{\text{Tpz}}(T_5(p_5, p_6, T_k, T_x), p_5, x_{\text{tst}})}$$

$$V_0(p_5, p_6, T_k, T_x) = 21.43 \cdot \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$$

Мощность КМ:

$$N_{\text{KM}}(p_5, p_6, T_k, T_x) := l_k(p_5, p_6, T_k, T_x) \cdot G_0(p_5, p_6, T_k, T_x)$$

$$N_{\text{KM}}(p_5, p_6, T_k, T_x) = 2.81 \cdot \text{кВт}$$

Тепловая нагрузка на охладитель:

$$Q_k(p_5, p_6, T_k, T_x) := G_0(p_5, p_6, T_k, T_x) \cdot q_k(p_5, p_6, T_k, T_x)$$

$$Q_k(p_5, p_6, T_k, T_x) = 2.91 \cdot \text{кВт}$$

Холодильный коэффициент:

$$\varepsilon(p_5, p_6, T_k, T_x) := \frac{Q_x}{N_{KM}(p_5, p_6, T_k, T_x)}$$

$$\varepsilon(p_5, p_6, T_k, T_x) = 0.036$$

Холодильный коэффициент в цикле Карно:

$$\varepsilon_K := \frac{T_x}{T_k - T_x} = 0.364$$

Степень термодинамического совершенства:

$$\eta_t(p_5, p_6, T_k, T_x) := \frac{\varepsilon(p_5, p_6, T_k, T_x)}{\varepsilon_K}$$

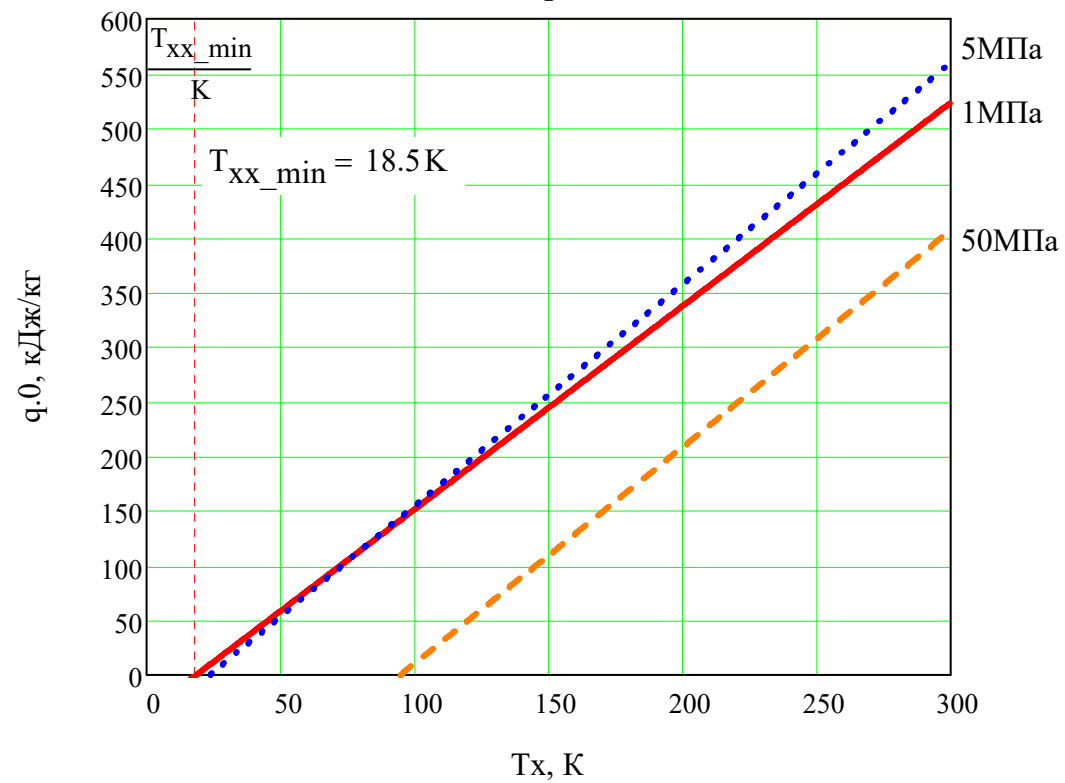
$$\eta_t(p_5, p_6, T_k, T_x) = 0.098$$

Given

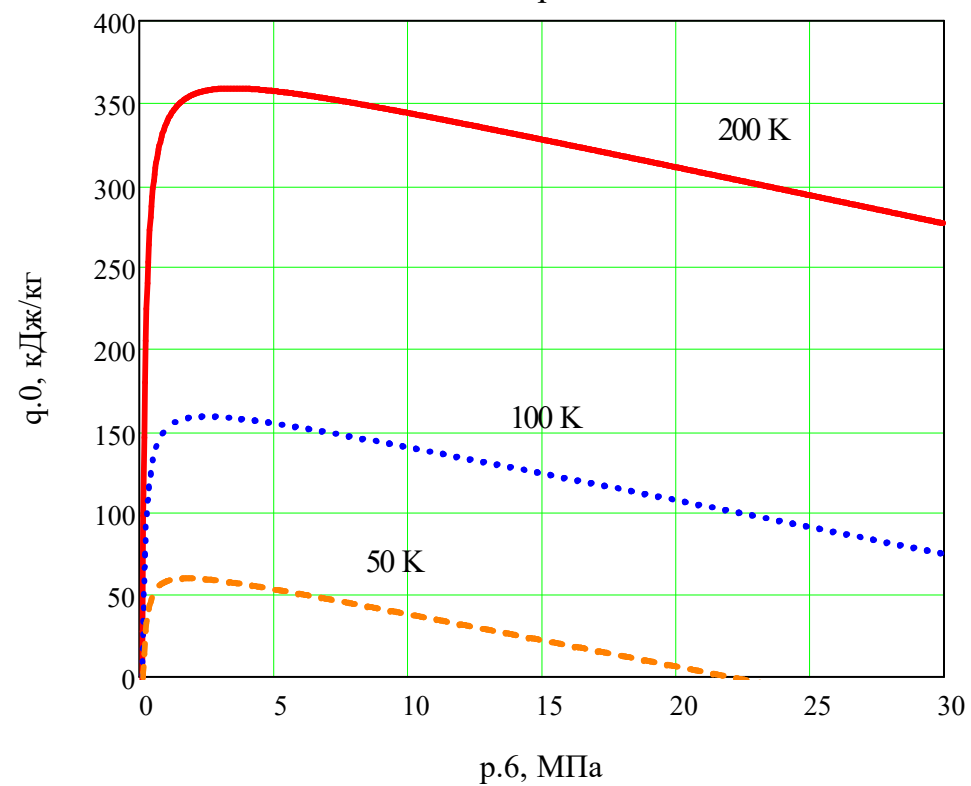
$$q_0(p_5, p_6, T_k, T_x) = 0$$

$$T_{xx_min} := \text{Find}(T_x) = 18.5 \text{ K}$$

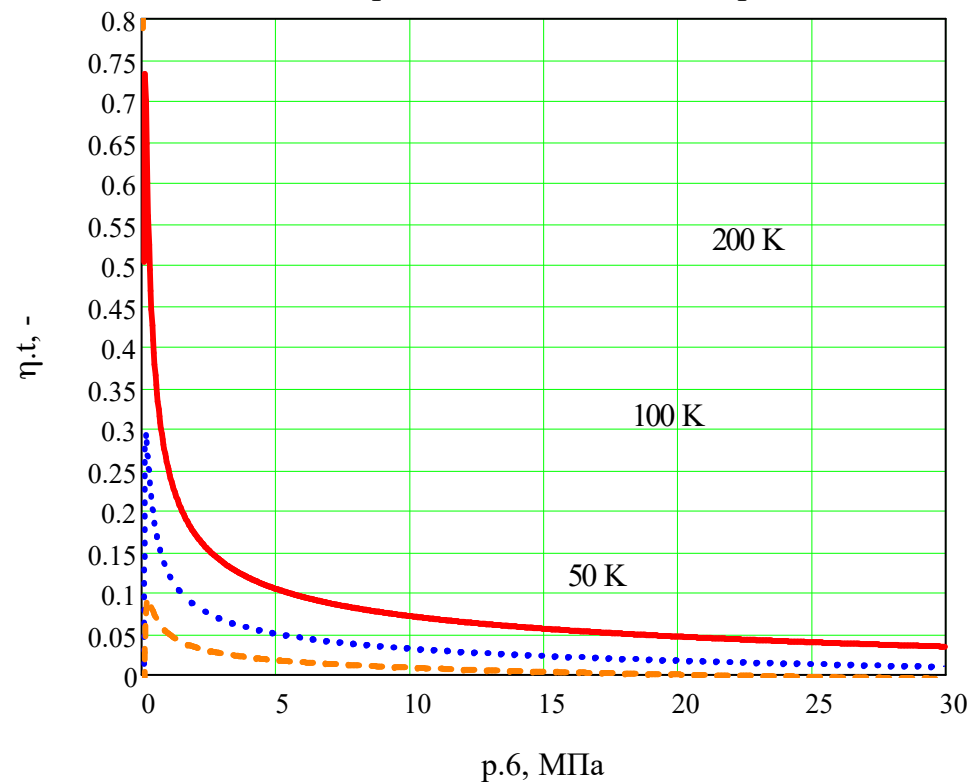
Удельная холодопроизводительность



Удельная холодопроизводительность



Степень термодинамического совершенства



КРИОРЕФРИЖЕРАТОРЫ НА 4К

	Холодопроизводительность 1-ой ступени	Холодоизвдопродительность 2-ой ступени
SRDK-101D	3 Вт@60K	0.1 Вт@4.2K
SRDK-205D	3 Вт@50K	0.5 Вт@4.2K
SRDK-305D	15 Вт@40K	0.4 Вт@4.2K
SRDK-408D2	34 Вт@40K	1 Вт@4.2K
SRDK-415D	35 Вт@50K	1.5 Вт@4.2K

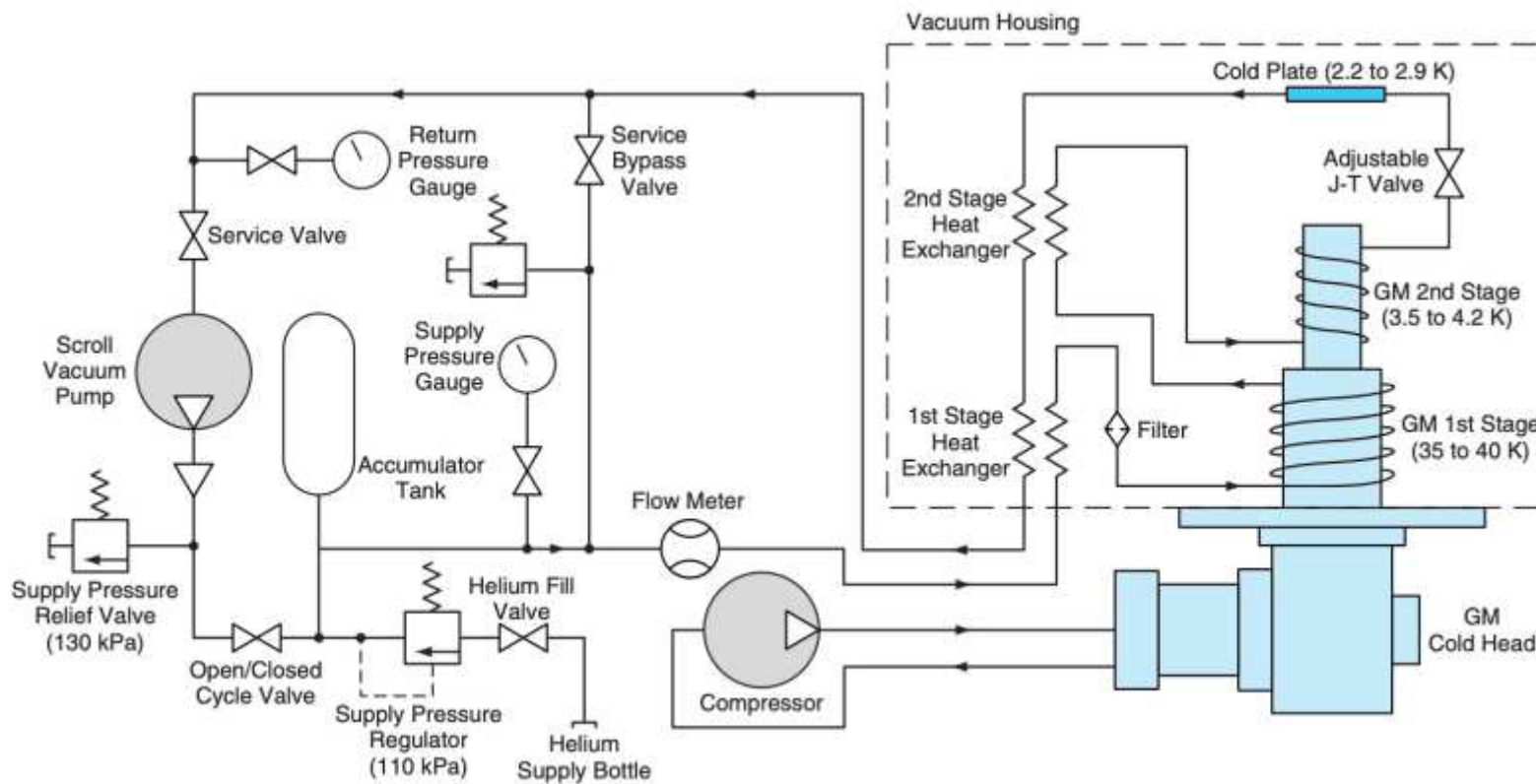
КРИОРЕФРИЖЕРАТОРЫ НА 6К

	Холодопроизводительность 1-ой ступени	Холодоизвдопродительность 2-ой ступени
SRDK-408S	30 Вт@45K	5.4 Вт@10K

КРИОРЕФРИЖЕРАТОРЫ НА 10К

Model	Watts @ 50Hz		Watts @ 60Hz	
	1st Stage Capacity	2nd Stage Capacity	1st Stage Capacity	2nd Stage Capacity
DE-202	7.3W @ 77K	1.8W @ 20K	8.8W @ 77K	2.2W @ 20K
DE-202 Lab	N/A	2.0W @ 20K	N/A	2.5W @ 20K
DE-202B Lab	N/A	2.0W @ 20K	N/A	2.5W @ 20K
DE-204SL	13.5W @ 80K	6.7W @ 20K	16.2W @ 80K	8.1W @ 20K
DE-204SL Lab	N/A	7.5W @ 20K	N/A	9.0W @ 20K
DE-204SLB	N/A	6.7W @ 20K	N/A	8.1W @ 20K
DE-204SLB Lab	N/A	7.5W @ 20K	N/A	9.0W @ 20K
DE-204SL 6.5K Lab	N/A	2.5W @ 10K	N/A	3W @ 10K
CH-204S	13.5W @ 80K	6.7W @ 20K	16.2W @ 80K	8.1W @ 20K
CH-204S Lab	N/A	7.5W @ 20K	N/A	9.0W @ 20K
CH-208R	65W @ 77K	6W @ 20K	80W @ 77K	7.5W @ 20K
CH-208L	28W @ 77K	8W @ 20K	35W @ 77K	10W @ 20K
CH-210	110W @ 77K	6W @ 20K	110W @ 77K	6W @ 20K
SRDK-408S	30W @ 45K	5.4W @ 10K	35W @ 45K	6.3W @ 10K
SRDK-400 Series	54W @ 40K	N/A	70W @ 40K	N/A





Список литературы для самостоятельного изучения:

1. Криогенные системы. Том 1. Основы теории и расчета. А.М. Архаров, И.В. Марфенина, Е.И. Микулин.
2. Машины низкотемпературной техники. Криогенные машины и инструменты: учебник для вузов / Под общ. ред. А.М. Архарова и И.К. Буткевича, 2015.
3. Низкотемпературные газовые машины (криогенераторы). Архаров А.М., 1969.
4. Установки для трансформации и охлаждения: Сборник задач, Мартынов А.В., 1989.

