

Расчет винтового компрессора

Техническое задание:

- 1) Подобрать диаметр винтов по нескольким вариантам исполнения
- 2) Рассчитать углы

Исходные данные:

Плотность:

$$\rho_{1''} := 9.05 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$\frac{\text{л}}{\text{м}^3}$

Энтальпия начальной точки

$$i_1 := 342.89 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$

Энтальпия точки

$$i_{10} := 201.64 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$

число компрессоров

$$z := 2$$

давление конечное

$$P_k := 17.49 \cdot \text{bar}$$

давление начальное

$$P_1 := 1.1 \cdot \text{bar}$$

давление порта экономайзера

$$P_m := 4.58 \cdot \text{bar}$$

показатель политропы

$$n := 1.1551$$

степень повышения давления во 2 ступени

$$\pi_2 := \frac{P_k}{P_m} = 3.82$$

степень повышения давления в 1 ступени

$$\pi_1 := \frac{P_m}{P_1} = 4.16$$

степень повышения давления

$$\pi_{\Sigma} := \pi_2 \cdot \pi_1 = 15.9$$

числа зубьев на ведущем и ведомом винтах равны соответственно:

$$z_1 := 4$$

$$z_2 := 6$$

частота вращения:

$$n_1 := 49 \cdot \frac{1}{\text{s}}$$

коэффициент площади парных впадин

$$K_f := 0.1191$$

задаем относительные длины винта

$$K_{11} := 0.9$$

$$K_{12} := 1.0$$

$$K_{13} := 1.35$$

$$K_{14} := 1.5$$

для 0.9 и 1.0 значение коэффициент использования объема парной полости

$$K_{h12} := 1.2$$

Для 1.35 и 1.5 значение коэффициент использования объема парной полости

$$Kh34 := 1.6$$

коэффициент С равен соответственно для каждой относительной длины винта

$$C1 := 5.4$$

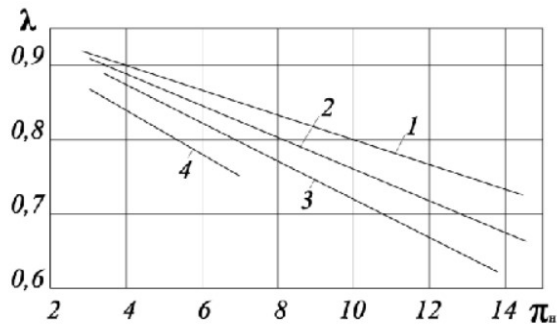
$$C2 := 5.3$$

$$C3 := 5.0$$

$$C4 := 4.3$$

Коэффициент подачи согласно справочным данным:
для низкотемпературных $\lambda = 5,0$ при $\pi > 8$

$$\lambda := 0.62$$



Расчет

1) Рассчитаем объемную производительность. Для этого нужно знать следующие величины (вычислены в программе REFPROP. Холодопроизводительность базового цикла _____

$$Q_{x\ 6} := 350 \cdot \text{kW}$$

$$m_l := \frac{Q_{x\ 6}}{i_1 - i_{10}} = 2.478 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

объемная производительность $V_1 := \frac{m_l}{\rho_{1''}} = 985.674 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot \frac{\text{s}}{\text{hr}}$

действительная объемная производительность одного компрессора

$$V_d := \frac{V_1}{z} = 492.837 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$$

2) теоретическая объемная производительность компрессора:

$$V_o := \frac{V_d}{\lambda} = 794.899 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{hr}} \quad V_T := V_o = 0.221 \text{ s}^{-1} \cdot \text{m}^3$$

2) Угол закрутки ведущего винта

$$\tau_{11} := 2 \cdot \pi \cdot \frac{K_{11}}{Kh_{12}} = 270 \cdot \text{deg} \quad \tau_{12} := 2 \cdot \pi \cdot \frac{K_{12}}{Kh_{12}} = 300 \cdot \text{deg}$$

$$\tau_{13} := 2 \cdot \pi \cdot \frac{K_{l3}}{Kh34} = 303.75 \cdot \text{deg} \quad \tau_{14} := 2 \cdot \pi \cdot \frac{K_{l4}}{Kh34} = 337.5 \cdot \text{deg}$$

Предельный угол закрутки ведущего винта равен: $\tau_{1\text{пр}} := 223.7 \cdot \text{deg}$

Ки – коэффициент использования объема парной полости. Рассчитаем

$$K_{i1} := 1 - C1 \cdot (\tau_{11} - \tau_{1\text{пр}}) \cdot 10^{-4} = 1$$

$$K_{i2} := 1 - C2 \cdot (\tau_{12} - \tau_{1\text{пр}}) \cdot 10^{-4} = 0.999$$

$$K_{i3} := 1 - C3 \cdot (\tau_{13} - \tau_{1\text{пр}}) \cdot 10^{-4} = 0.999$$

$$K_{i4} := 1 - C4 \cdot (\tau_{14} - \tau_{1\text{пр}}) \cdot 10^{-4} = 0.999$$

3) Определяем диаметры винтов по 4 вариантам

$$D_{11} := \sqrt[3]{\frac{V_T}{K_{l1} \cdot K_f \cdot K_{i1} \cdot z_1 \cdot n_1}} = 219.077 \cdot \text{mm}$$

$$D_{12} := \sqrt[3]{\frac{V_T}{K_{l2} \cdot K_f \cdot K_{i2} \cdot z_1 \cdot n_1}} = 211.535 \cdot \text{mm}$$

$$D_{13} := \sqrt[3]{\frac{V_T}{K_{l3} \cdot K_f \cdot K_{i3} \cdot z_1 \cdot n_1}} = 191.398 \cdot \text{mm}$$

$$D_{14} := \sqrt[3]{\frac{V_T}{K_{l4} \cdot K_f \cdot K_{i4} \cdot z_1 \cdot n_1}} = 184.802 \cdot \text{mm}$$

Выбираем ближайший больший размер винта

$$D_{11} := 220 \cdot \text{mm} \quad \text{при } K_{l4} := 0.9$$

$$D_{12} := 215 \cdot \text{mm} \quad \text{при } K_{l2} := 1.0$$

$$D_{13} := 195 \cdot \text{mm} \quad \text{при } K_{l3} := 1.35$$

$$D_{14} := 185 \cdot \text{mm} \quad \text{при } K_{l4} := 1.5$$

4) Выберем лучший вариант исполнения винтов:
при 0.9 D1

$$Wp := (434 \quad 848 \quad 1656)^T$$

$$D := (160 \quad 200 \quad 250)^T$$

$$E := \text{cspline}(Wp, D)$$

при 1,0 D1 $Wp_1 := (468 \quad 915 \quad 1787)^T$

$$D_1 := (160 \quad 200 \quad 250)^T$$

$$E_1 := \text{cspline}(Wp_1, D_1)$$

при 1.35 D1

$$W_{p1.35} := (632.8 \quad 1236 \quad 2412)^T$$

$$D_{1.35} := (160 \quad 200 \quad 250)^T$$

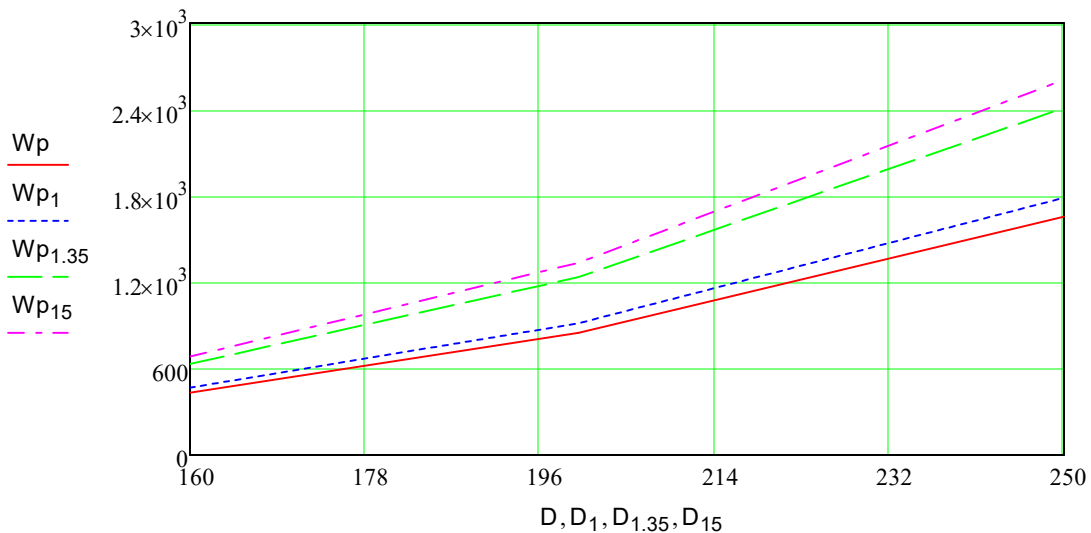
$$E_{1.35} := \text{cspline}(W_{p1.35}, D_{1.35})$$

при 1.5 D1

$$W_{p15} := (683.5 \quad 1335 \quad 2607.4)^T$$

$$D_{15} := (160 \quad 200 \quad 250)^T$$

$$E_{15} := \text{cspline}(W_{p15}, D_{15})$$



По построенному графику определим W_p для необходимых диаметров.

Тогда вариант 1

$$W_p := 1252 \cdot \text{cm}^3$$

$$D_1 := 220 \cdot \text{mm}$$

при 0.9 D1

$$V_{T1} := W_p \cdot z_1 \cdot n_1 = 0.245 \text{ s}^{-1} \cdot \text{m}^3$$

Отклонение по производительности

$$\delta_v := \frac{V_{T1} - V_T}{V_T} = 11.135 \cdot \%$$

Вариант 2 Методом нахождения зависимости значений W_p и t_d от D1 запишем следующие значения:

$$W_p := 1264 \cdot \text{cm}^3$$

$$D_1 := 215 \cdot \text{mm}$$

при 1,0 D1

$$V_{T2} := W_p \cdot z_1 \cdot n_1 = 0.248 \text{ s}^{-1} \cdot \text{m}^3$$

Отклонение по производительности

$$\delta_{\text{в}} := \frac{V_{\text{T2}} - V_{\text{T}}}{V_{\text{T}}} = 12.2 \cdot \%$$

Вариант 3

$$W_{\text{п}} := 1160 \cdot \text{cm}^3$$

$$D_1 := 195 \cdot \text{mm}$$

при 1,35 D1

$$V_{\text{T3}} := W_{\text{п}} \cdot z_1 \cdot n_1 = 0.227 \text{ s}^{-1} \cdot \text{m}^3$$

Отклонение по производительности

$$\delta_{\text{в}} := \frac{V_{\text{T3}} - V_{\text{T}}}{V_{\text{T}}} = 2.969 \cdot \%$$

Вариант 4

$$W_{\text{п}} := 1172 \cdot \text{cm}^3$$

$$D_1 := 190 \cdot \text{mm}$$

при 1,5 D1

$$V_{\text{T4}} := W_{\text{п}} \cdot z_1 \cdot n_1 = 0.23 \text{ s}^{-1} \cdot \text{m}^3$$

Отклонение по производительности

$$\delta_{\text{в}} := \frac{V_{\text{T4}} - V_{\text{T}}}{V_{\text{T}}} = 4.034 \cdot \%$$

Выбираем вариант 3. Полученный запас по производительности позволит компенсировать не учтенные до данного момента потери в холодильной машине.

$$D_1 := 195 \cdot \text{mm} \quad \text{при } K_{\text{I3}} := 1.35$$

$$u_1 := 3.14 \cdot D_1 \cdot n_1 = 30.003 \text{ s}^{-1} \cdot \text{m}$$

скорость находится в пределах рекомендуемых значений

4) Рассчитываем остальные параметры выбранного варианта исполнения винтового компрессора

Длина винта – нарезанной части ротора $l := K_{\text{I3}} \cdot D_1 = 0.263 \text{ m}$

Передаточное число: $i_{12} := \frac{z_2}{z_1} = 1.5$

частота вращения ВМ винта

$$n_2 := 32.7 \cdot \frac{1}{\text{s}} \quad n_2 := 1940 \cdot \text{rpm}$$

Межосевое расстояние, т. е. расстояние между осями ВЦ и ВМ винтов:

$$a_w := 0.8 \cdot D_1 = 0.156 \text{ m}$$

Диаметры начальных окружностей ВЦ и ВМ винтов соответственно

$$d_{1H} := \frac{2 \cdot a_w}{1 + i_{12}} = 0.125 \text{ m}$$

$$d_{2H} := i_{12} \cdot d_{1H} = 0.187 \text{ m} \quad r_{2H} := \frac{d_{2H}}{2} = 0.094 \text{ m}$$

Ход винтовой линии ведущего винта- расстояние по образующей между двумя одноименными точками одной и той же винтовой линии

Высота ножки ведущего винта и головки ведомого винта:

$$r_0 := 0.02 \cdot D_1 = 3.9 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Центральные углы ведущего винта

$$\Theta_1 := 42.37 \text{ deg}$$

$$\Theta_2 := 19.71 \text{ deg}$$

Центральные углы ведомого винта

$$\Theta_3 := 28.24 \text{ deg}$$

$$\Theta_4 := 13.14 \text{ deg}$$

$$\gamma_{2\varepsilon} := 9.305 \text{ deg}$$

$$h_1 := 1.6 \cdot D_1 = 0.312 \text{ m}$$

Ход винтовой линии ведомого винта равен: $h_2 := i_{12} \cdot h_1 = 0.468 \text{ m}$

Угол наклона винтовой линии на начальных цилиндрах винтов - угол между образующей цилиндра диаметром d_{1H} (d_{2H}) и касательной к винтовой линии на этом же диаметр

$$\beta_H := \operatorname{atan}\left(\frac{\pi \cdot d_{1H}}{h_1}\right) = 51.488 \cdot \text{deg} \quad \text{Для 1.35D1 } \beta_H := 51.79 \text{ deg}$$

Угол закрутки ведущего винта:

$$\tau_{13} := 360 \cdot \frac{l}{h_1} = 303.75 \quad \tau_{13} := 337.5 \cdot \text{deg}$$

Угол закрутки ведомого винта:

$$\tau_{23} := \frac{\tau_{13}}{i_{12}} = 225 \cdot \text{deg}$$

Угол заключенный между линией центров O_1O_2 и лучом, проведенным через вершину зуба ВЦ винта и центр ВЦ винта O_1 в положение начала сжатия пара в парной полости.

$$\beta_{01} := \operatorname{acos}\left[\frac{a_w^2 + \left(\frac{D_1}{2}\right)^2 - r_{2H}^2}{2 \cdot a_w \cdot \left(\frac{D_1}{2}\right)}\right] = 34.462 \cdot \text{deg}$$

угол заключенный между линией центров и лучом, проведенным через центр ВМ винта O_2 и точку Н пересечения начальной окружности ВМ винта и внешней окружностью ВЦ

$$\beta_{02} := \arccos \left[\frac{a_w^2 - \left(\frac{D_1}{2} \right)^2 + r_{2H}^2}{2 \cdot a_w \cdot \left(\frac{D_1}{2} \right)} \right] = 39.15 \cdot \text{deg}$$

Угол полного освобождения впадины ведущего винта от зуба ведомого у торца нагнетания:

$$\alpha_{01} := i_{12} \cdot (\beta_{02} - \Theta_3) = 16.364 \cdot \text{deg}$$

Предельный угол закрутки ВЩ винта

$$\tau_{1пр} := 2 \cdot \pi \cdot \frac{z_1 - 1}{z_1} - (\beta_{01} + \alpha_{01}) = 219.173 \cdot \text{deg}$$

угол окна всасывания ведущего винта

$$\alpha_{1в} := \frac{1}{2} \cdot \tau_{13} + 3.14 \cdot \frac{(z_1 - 1)}{z_1 - \alpha_{01} - \beta_{01}} = 342.133 \cdot \text{deg}$$

частота вращения ВМ винт

$$n_2 := \frac{1}{i_{12}} \cdot n_1 = 32.667 \text{ s}^{-1}$$

средний диаметр впадины ВМ винта. $D_1 = D_2$.

$$d_{2ВН} := 117 \cdot \text{mm}$$

$$d_{1ВН} := d_{2ВН}$$

$$d_{2ср} := 0.5 \cdot (D_1 + d_{1ВН}) = 0.15 \text{ m}$$

угол наклона винтовой линии на цилиндре диаметра $d_{2ср}$

$$\beta_{2ср} := \arctan \left(\frac{3.14 \cdot d_{2ср}}{h_2} \right) = 46.306 \cdot \text{deg}$$

длина канала ВМ винта на среднем диаметре

$$l_{2ц} := \frac{l}{\cos(\beta_{2ср})} = 0.381 \text{ m}$$

Пренебрегая влиянием масла, содержащегося в перегретом паре холодильного агента, местную скорость звука можно найти по формуле:

$$k := 1.16 \text{ - показатель адиабаты}$$

$$p_1 := 1.73 \cdot \text{bar} \text{ - давление на всасывании}$$

$$\nu_1 := 0.10839 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$a_1 := \sqrt{k \cdot p_1 \cdot \nu_1} = 147.485 \text{ s}^{-1} \cdot \text{m}$$

средняя скорость движения пара в полости винта в период ее заполнения

$$\alpha_{22в} := \frac{1}{i_{12}} \cdot \alpha_{1в} + \Theta_3 + 2 \cdot \gamma_{2\varepsilon} = 274.939 \cdot \text{deg}$$

$$C_{a,ср} := 360 \cdot l \cdot n_2 \cdot \frac{\lambda}{\alpha_{22в}} = 399.994 \text{ s}^{-1} \cdot \text{m}$$

Определен угол наддува

$$\Delta\alpha_{2B} := \frac{360 \cdot l_{2ц} \cdot n_2}{a_1 - C_{a.cp}} = -17.748 \quad \text{deg}$$

Определен угол перекрытия (дополнительное значение угла всасывания):

$$\Delta\alpha_{1B} := \frac{6 \cdot l \cdot n_1}{a_1} = 30.067 \cdot \text{deg}$$

$$\alpha_{11B} := \frac{1}{\tau_{13}} + 3.14 \cdot \frac{z_1 - 1}{z_1} + \Delta\alpha_{1B} = 174.726 \cdot \text{deg}$$

Расчет окна нагнетания

$$Ки3 = 0.999$$

$$W_n := 1160 \cdot \text{cm}^3$$

Given

$$\frac{W_0}{W_n} = Ки3$$

$$\text{Find}(W_0) \rightarrow 1159.18966108159153 \cdot \text{cm}^3$$

$$W_0 := 1159 \cdot \text{cm}^3$$

степень сжатия для низкотемпературных машин

$$\varepsilon_{\Gamma} := 5$$

Величина заполненного объема парной полости:

$$W_3 := W_0 - \frac{W_n}{\varepsilon_{\Gamma}} = 927 \cdot \text{cm}^3$$

$$\frac{W_3}{\left(\frac{D_1}{10}\right)^3} = 125.019$$

По графику находим φ

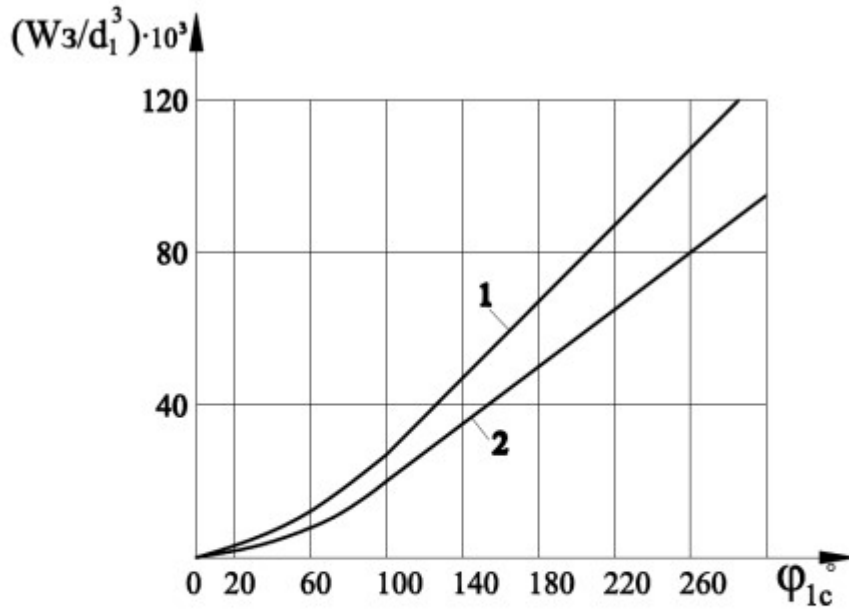


Рис. 11. Изменение заполненного объема парной полости в зависимости от угла поворота ВЩ винта $W_3 = f(\varphi_{1c})$

(от начала заполнения объема полости):

1 – $h_1 = 1,6D_1$; $\beta_n = 51,79^\circ$; $l_b = 1,35D_1$; $1,5D_1$:

2 – $h_1 = 1,2D_1$; $\beta_n = 59,17^\circ$; $l_b = 0,9D_1$; $1,0D_1$

Для 1-го варианта смотрим

$$\varphi_{1c} := 280 \text{ deg}$$

$$\text{Угол окна нагнетания ВЩ винта} \quad \alpha_{1n} := \tau_{13} - \varphi_{1c} + \beta_{01} = 91.962 \cdot \text{deg}$$

$$\text{Угол окна нагнетания ведомого винта:} \quad \alpha_{2n} := \alpha_{1n} \cdot \frac{1}{i_{12}} + \Theta_4 + 2 \cdot \gamma_{2e} = 93.058 \cdot \text{deg}$$

Геометрическая степень сжатия, соответствующая сжатию до давления потока экономайзера:

$$\varepsilon_{\text{эко}} := \left(\frac{P_m}{P_1} \right)^{\frac{1}{n}} = 3.438$$

Определенной выше степени сжатия соответствует следующая величина заполненного объема парной полости:

$$W_{\text{эко}} := W_0 - \frac{W_n}{\varepsilon_{\text{эко}}} = 821.585 \cdot \text{cm}^3$$

Определен параметр:

$$\frac{W_{\text{эко}}}{\left(\frac{D_1}{10}\right)^3} = 110.802$$

Для 1-го варианта смотрим

$$\varphi_{1\text{ЭКО}} := 250 \text{ deg}$$

$$l_{\text{эко}} := \varphi_{1\text{ЭКО}} \cdot \frac{h_1}{360} = 0.217 \text{ m}$$

Определение сил и моментов в компрессоре

1) Определение давлений

Были определены средние величины давлений, действующих в соседних полостях по всей длине ведущего винта. Между соседними полостями разность, измеренная в угле поворота ведущего винта, составляет 90°.

$$p_1 := 17.49 \cdot \text{bar} \quad \text{при } 280^\circ$$

$$p_2 := 6.25 \cdot \text{bar} \quad \text{при } 190^\circ$$

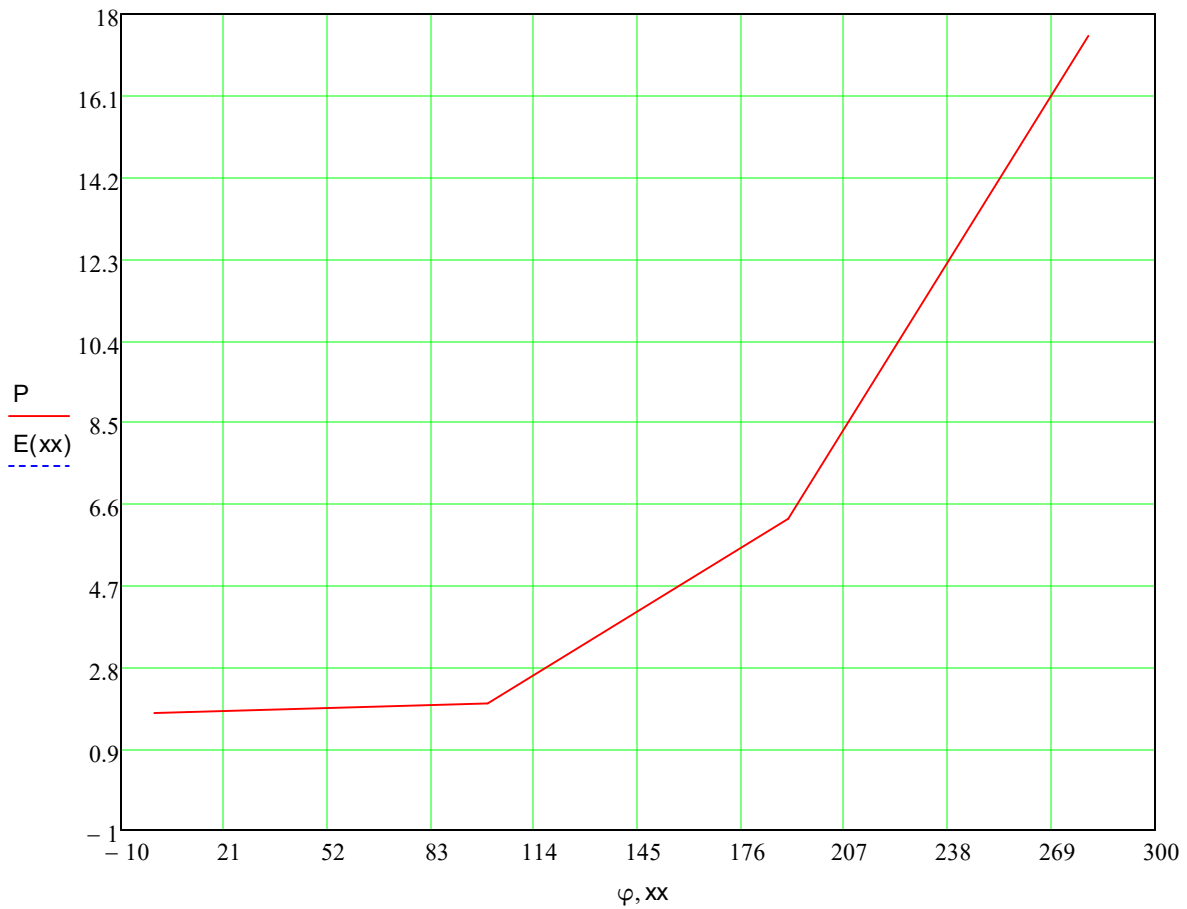
$$p_3 := 1.95 \cdot \text{bar} \quad \text{при } 100^\circ$$

$$p_4 := 1.748 \cdot \text{bar} \quad \text{при } 10^\circ$$

$$p_5 := 1.73 \cdot \text{bar} \quad \text{при } 0^\circ$$

$$P := \begin{pmatrix} 17.49 \\ 6.25 \\ 1.95 \\ 1.748 \\ 1.73 \end{pmatrix} \quad \varphi := \begin{pmatrix} 280 \\ 190 \\ 100 \\ 10 \\ 0 \end{pmatrix} \quad xx := 0, 1 \dots 10$$

$$E_{xx} := \text{linterp}(P, \varphi, xx)$$



Определены разности давлений между соседними областями:

$$\Delta p_H := p_1 - p_5 = 15.76 \cdot \text{bar}$$

$$\Delta p_1 := p_2 - p_3 = 4.3 \cdot \text{bar}$$

$$\Delta p_2 := p_3 - p_4 = 0.202 \cdot \text{bar}$$

$$\Delta p_3 := p_4 - p_5 = 0.018 \cdot \text{bar}$$

Для определения радиальных сил необходимо построить развертку внешней цилиндрической поверхности винтов

Определяем углы наклонных линий на плоскости развертки:

$$\beta_1 := \text{atan}\left(\frac{\beta_H \cdot D_1}{d_{1H}}\right) = 54.7 \cdot \text{deg}$$

$$\beta_2 := \text{atan}\left(\frac{\beta_H \cdot D_1}{d_{2H}}\right) = 43.276 \cdot \text{deg}$$

Определено расстояние от торца (точка C(A1)) всасывания до торца всасывания:

$$z_c := h_1 \cdot \frac{\varphi_{1c}}{2 \cdot 3.14} = 0.243 \text{ m}$$

Точка В1 отстоит от точки С (А1) на расстоянии, равном толщине гребня ВМ винта в направлении оси Z

$$\Delta z_G := 2 \cdot h_1 \cdot i_{12} \gamma_{2\varepsilon} \cdot \frac{1}{2 \cdot 3.14} = 0.024 \text{ m}$$

На этом же расстоянии ZG точка B2 отстоит от точки A2, точка B3 от точки A3 и т. д.

Осевой размер ширины зуба по гребню ведомого винта (смещение линий зубьев ведомого винта относительно ведущего):

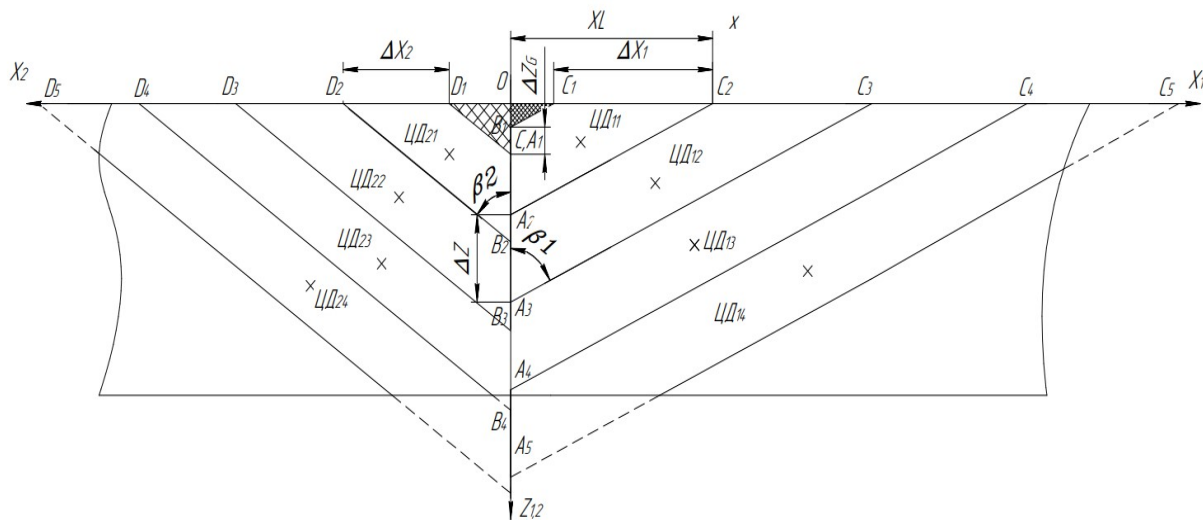
$$\Delta z_{23} := \pi \gamma_{2\varepsilon} \cdot d_{2H} \cdot \tan\left(\frac{90 - \beta_H \cdot \frac{180}{3.14}}{90}\right) = 0.043 \text{ m}$$

$$\Delta z := \frac{h_1}{z_1} = 0.078 \text{ m}$$

$$\Delta X1 := \Delta z \cdot \tan(\beta_1) = 0.11 \text{ m}$$

$$\Delta X2 := \Delta z \cdot \tan(\beta_2) = 0.073 \text{ m}$$

Построим развертку.



Расчет радиальных сил, действующих на ведущий винт

Хордалыый коэффициент:

$$K_{1xp} := \frac{\sin\left(\frac{180 \cdot \text{deg}}{z_1}\right) \cdot z_1}{180 \cdot \text{deg}} = 0.9$$

По развертке

Со стороны ВЩ винта избыточное давление p_1 действует на треугольную площадку ОС2А2

Треугольник О-С2-А2

$$l_{oc2} := 213 \cdot \text{mm}$$

$$l_{oa2} := 93 \cdot \text{mm}$$

$$\text{Площадь } F_{1H} := l_{oc2} \cdot \frac{l_{oa2}}{2} = 9.905 \times 10^{-3} \cdot \text{m}^2$$

$$\text{Центры масс } x_1 := \frac{l_{oc2}}{3} = 71 \cdot \text{mm} \quad z_1 := \frac{l_{oa2}}{3} = 31 \cdot \text{mm}$$

$$\text{Сила: } P_{1H} := \Delta p_H \cdot K_{1xp} \cdot F_{1H} = 1.405 \times 10^4 \cdot \text{N}$$

$$\Delta p_H = 15.76 \cdot \text{bar}$$

Угол наклона к горизонтальной плоскости

$$\gamma_{1H} := x_1 \cdot \frac{360}{180 \cdot D_1} = 41.723 \cdot \text{deg}$$

Со стороны ВМ винта это же давление p_1 действует на площадку ОВ2Д2

Треугольник

О-Д2-В2

$$l_{oD2} := 181 \cdot \text{mm}$$

$$l_{oB2} := 115 \cdot \text{mm}$$

$$\text{Площадь } F_{2H} := l_{oB2} \cdot \frac{l_{oD2}}{2} = 1.041 \times 10^4 \cdot \text{mm}^2$$

$$\text{Центры масс } x_2 := \frac{l_{oD2}}{3} = 0.06 \text{ m} \quad z_2 := \frac{l_{oB2}}{3} = 0.038 \text{ m}$$

$$\text{Сила: } P_{2H} := \Delta p_H \cdot K_{1xp} \cdot F_{2H} = 1.477 \times 10^4 \cdot \text{N}$$

Угол наклона к горизонтальной плоскости:

$$\gamma_{2H} := x_2 \cdot \frac{360}{180 \cdot D_1} = 35.455 \cdot \text{deg}$$

Трапеция С2-С3-А2-А3.

$$\text{Площадь } F_3 := 20.829 \cdot 10^3 \cdot \text{mm}^2$$

Центры масс

$$X_3 := 150 \cdot \text{mm}$$

$$Z_3 := 64.5 \cdot \text{mm}$$

$$\text{Сила: } P_3 := \Delta p_1 \cdot K_{1xp} \cdot F_3 = 8.064 \times 10^3 \cdot \text{N}$$

Угол наклона к горизонтальной плоскости:

$$\gamma_3 := X_3 \cdot \frac{360}{180 \cdot D_1} = 88.147 \cdot \text{deg}$$

Трапеция D2-D3-B2-B3.

Площадь $F_4 := 16.6 \cdot 10^3 \cdot \text{mm}^2$

Центры масс $X_4 := 114 \cdot \text{mm}$

$Z_4 := 77.1 \cdot \text{mm}$

Сила: $P_4 := \Delta p_1 \cdot K_{1xp} \cdot F_4 = 6.426 \times 10^3 \cdot \text{N}$

Угол наклона к горизонтальной плоскости: $\gamma_4 := X_4 \cdot \frac{360}{180 \cdot D_1} = 66.992 \cdot \text{deg}$

Трапеция C4-C3-A3-A4.

Площадь $F_5 := 32.4 \cdot 10^3 \cdot \text{mm}^2$

Центры масс $X_5 := 190 \cdot \text{mm}$

$Z_5 := 116.4 \cdot \text{mm}$

Сила: $P_5 := \Delta p_2 \cdot K_{1xp} \cdot F_5 = 589.239 \cdot \text{N}$

Угол наклона к горизонтальной плоскости: $\gamma_5 := X_5 \cdot \frac{360}{180 \cdot D_1} = 111.653 \cdot \text{deg}$

Трапеция D4-D3-B3-B4.

Площадь $F_6 := 21.726 \cdot 10^3 \cdot \text{mm}^2$

Центры масс $X_6 := 132.9 \cdot \text{mm}$

$Z_6 := 131.7 \cdot \text{mm}$

Сила: $P_6 := \Delta p_2 \cdot K_{1xp} \cdot F_6 = 395.118 \cdot \text{N}$ Н

Угол наклона к горизонтальной плоскости: $\gamma_6 := X_6 \cdot \frac{360}{180 \cdot D_1} = 78.099 \cdot \text{deg}$

Трапеция C5-C4-A5-A4.

Площадь $F_7 := 43.65 \cdot 10^3 \cdot \text{mm}^2$

Центры масс $X_7 := 303 \cdot \text{mm}$

$Z_7 := 138 \cdot \text{mm}$

$P_7 := \Delta p_3 \cdot K_{1xp} \cdot F_7 = 70.738 \cdot \text{N}$

Угол наклона к горизонтальной плоскости: $\gamma_7 := X_7 \cdot \frac{360}{180 \cdot D_1} = 178.058 \cdot \text{deg}$

Трапеция D5-D4-B5-B4.

Площадь $F_8 := 55 \cdot 10^3 \cdot \text{mm}^2$

Центры масс $X_8 := 205.8 \cdot \text{mm}$

$Z_8 := 150 \text{mm}$

$$P_8 := \Delta p_3 \cdot K_{1xp} \cdot F_8 = 89.131 \cdot \text{N}$$

Угол наклона к горизонтальной плоскости: $\gamma_8 := X_8 \cdot \frac{360}{180 \cdot D_1} = 120.938 \cdot \text{deg}$

Осевые силы и моменты, действующие на винты

Площадь торцевого сечения зуба винта:
Площадь впадин ВЩ и ВМ винта

$$f_{1п} := 27.77 \cdot \text{cm}^2$$

$$f_{2п} := 19.88 \cdot \text{cm}^2$$

$$f_{\text{в1}} := \frac{\pi}{4} \cdot \frac{D_1^2 - d_{1\text{вн}}^2}{Z_1} - f_{1п} = 2.001 \times 10^{-3} \cdot \text{m}^2$$

Кольцевая площадь, образованная окружностями впадин винта и вала:
диаметр шейки вала непосредственно у винтовой части ротора

$$d_{1ш} := 84 \cdot \text{mm}$$

$$f_{к1} := \frac{\pi}{4} \cdot (d_{1\text{вн}}^2 - d_{1ш}^2) = 5.21 \times 10^{-3} \cdot \text{m}^2$$

Осевая сила, действующая на ведущий винт с торца нагнетания:

$$P_{т1} := (2.5 \cdot f_{\text{в1}} + 0.5 \cdot f_{к1}) \cdot (\Delta p_H \cdot 10 - 1 \text{bar}) = 119.144 \cdot \text{kN}$$

Крутящий момент от двигателя на ведущем винте при расчетном режиме:

$$N_{\text{дв}} := 186000 \text{W}$$

$$M_{\text{кр}} := \frac{N_{\text{дв}}}{2 \cdot \pi \cdot n_1} = 604.139 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

Средний момент окружных газовых сил на ведомом винте (10% от крутящего момента двигателя):

$$M_{2\text{газ}} := 0.1 \cdot M_{\text{кр}} = 60.414 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

Средний момент окружных газовых сил на ведущем винте (110% от крутящего момента двигателя):

$$M_{1\text{газ}} := 1.1 \cdot M_{\text{кр}} = 664.553 \cdot \text{m} \cdot \text{N}$$

Суммарная осевая сила, действующая на профильные поверхности винтов

$$P_{1a} := 2 \cdot \frac{\pi \cdot M_{1\text{газ}}}{h_1} = 1.338 \times 10^4 \cdot \text{N}$$

Осевые силы в полостях:

$$P_{1aH} := P_{1a} \cdot \frac{P_{1H}}{P_{1H} + P_3} = 8.504 \times 10^3 \cdot \text{N}$$

$$P_{1a} := 2 \cdot \frac{\pi \cdot M_{1\text{газ}}}{h_1} = 1.338 \times 10^4 \cdot \text{N}$$

$$P_{2aH} := P_{1a} \cdot \frac{P_{2H}}{P_{2H} + P_4} = 9.325 \times 10^3 \cdot \text{N}$$

$$P_{1a1} := P_{1a} \cdot \frac{P_3}{P_{1H} + P_3} = 4.879 \times 10^3 \cdot \text{N}$$

$$P_{2a1} := P_{1a} \cdot \frac{P_4}{P_{2H} + P_4} = 4.058 \times 10^3 \cdot \text{N}$$

$$P_{1a11} := P_{1a} \cdot \frac{P_5}{P_{1H} + P_3} = 356.548 \cdot \text{N}$$

$$P_{2a11} := P_{1a} \cdot \frac{P_6}{P_{2H} + P_4} = 249.503 \cdot \text{N}$$

$$P_{1a111} := P_{1a} \cdot \frac{P_7}{P_{1H} + P_3} = 42.803 \cdot \text{N}$$

$$P_{2a111} := P_{1a} \cdot \frac{P_8}{P_{2H} + P_4} = 56.283 \cdot \text{N}$$

Средний диаметр:

$$d_{1cp} := \frac{d_{1H} + D_1}{2} = 0.16 \text{ m}$$

Угол наклона винтовой линии, проходящей через центр давления:

$$\beta_{1cp} := \text{atan}\left(\frac{d_{1cp} \cdot \tan(\beta_H)}{d_{1H}}\right) = 58.433 \cdot \text{deg}$$

Окружные силы:

$$P_{ok1H} := P_{1aH} \cdot \frac{1}{\tan(\beta_{1cp})} = 5.225 \times 10^3 \cdot \text{N}$$

$$P_{ok11} := P_{1a1} \cdot \frac{1}{\tan(\beta_{1cp})} = 2.998 \times 10^3 \cdot \text{N}$$

$$P_{ok111} := P_{1a11} \cdot \frac{1}{\tan(\beta_{1cp})} = 219.064 \cdot \text{N}$$

$$P_{ok1111} := P_{1a111} \cdot \frac{1}{\tan(\beta_{1cp})} = 26.299 \cdot \text{N}$$

$$P_{ok2H} := P_{2aH} \cdot \frac{1}{\tan(\beta_{1cp})} = 5.729 \times 10^3 \cdot \text{N}$$

$$P_{ok21} := P_{2a1} \cdot \frac{1}{\tan(\beta_{1cp})} = 2.493 \times 10^3 \cdot \text{N}$$

$$P_{ok211} := P_{2a11} \cdot \frac{1}{\tan(\beta_{1cp})} = 153.296 \cdot N$$

$$P_{ok2111} := P_{2a111} \cdot \frac{1}{\tan(\beta_{1cp})} = 34.581 \cdot N$$

Проверка расчета.

Суммарная окружная сила:

$$P_{ok1} := P_{ok1H} + P_{ok11} + P_{ok111} + P_{ok111} = 8.661 \times 10^3 \cdot N$$

$$P_{ok2} := P_{ok2H} + P_{ok21} + P_{ok211} + P_{ok211} = 8.529 \times 10^3 \cdot N$$

Момент от окружных сил:

$$M_1 := P_{ok1} \cdot 0.5 \cdot d_{1cp} = 692.425 \cdot N \cdot m$$

$$M_2 := P_{ok2} \cdot 0.5 \cdot d_{1cp} = 681.909 \cdot m \cdot N$$

Отклонение от момента газовых сил $M_{1газ}$ составляет 5%, что является приемлемым результатом

Определены моменты внецентренно приложенных осевых сил в полостях

$$M_{1ан} := P_{1ан} \cdot 0.5 \cdot d_{1cp} = 679.874 \cdot N \cdot m$$

$$M_{2ан} := P_{2ан} \cdot 0.5 \cdot d_{1cp} = 745.531 \cdot m \cdot N$$

$$M_{1a1} := P_{1a1} \cdot 0.5 \cdot d_{1cp} = 390.101 \cdot m \cdot N$$

$$M_{2a1} := P_{2a1} \cdot 0.5 \cdot d_{1cp} = 324.444 \cdot N \cdot m$$

$$M_{1a11} := P_{1a11} \cdot 0.5 \cdot d_{1cp} = 28.506 \cdot N \cdot m$$

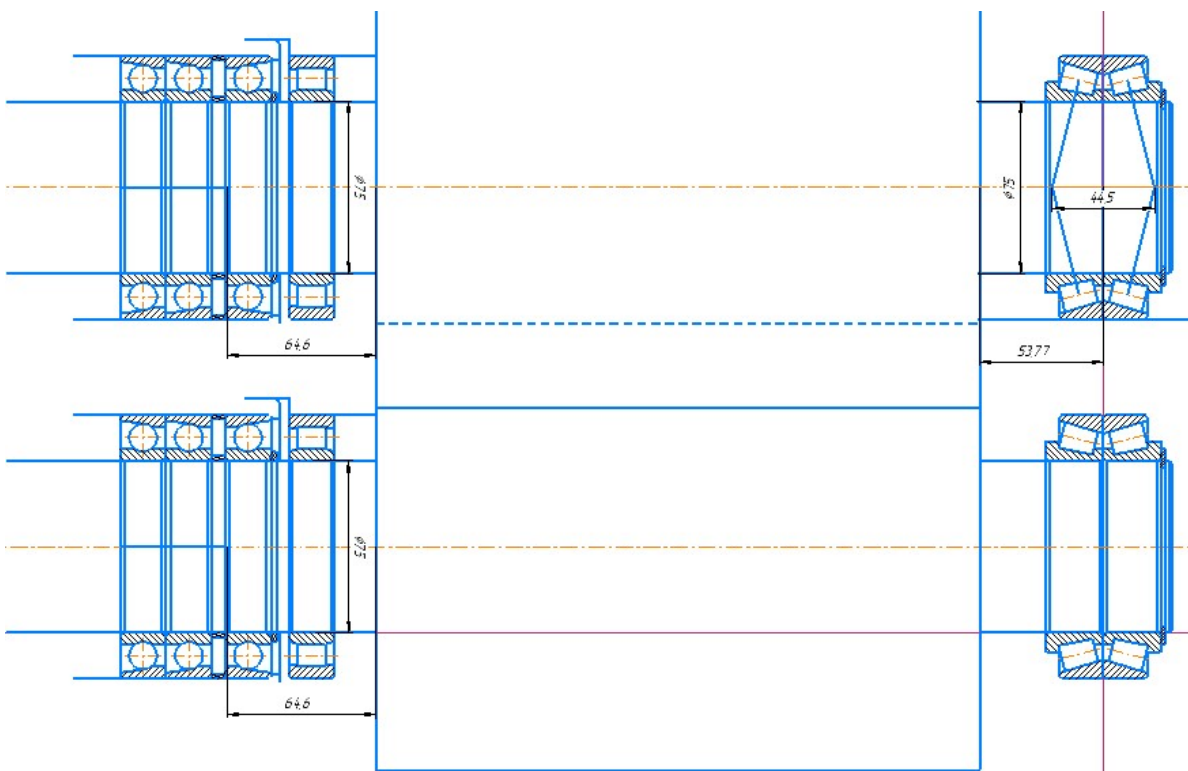
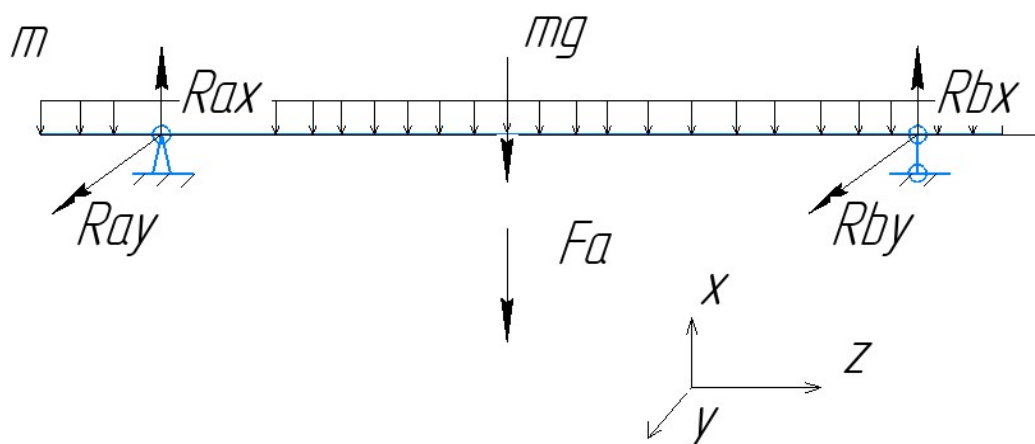
$$M_{2a11} := P_{2a11} \cdot 0.5 \cdot d_{1cp} = 19.948 \cdot m \cdot N$$

Определен момент от силы, лежащей в плоскости P_{1H}

$$M_{t1} := P_{T1} \cdot 0.5 \cdot d_{1BH} = 6.97 \times 10^3 \cdot N \cdot m$$

Расчет нагрузки на опоры

К определению реакций на опорах ВЩ винта от действия радиальных и осевых сил



Для расчета радиальных и упорных подшипников, напряжений на валах и их прогибов необходимо определить реакции в опорах. Учет *массовых сил ротора* даёт поправку примерно на 3-4%, данное расхождение находится в пределах инженерной погрешности, поэтому влиянием массовых сил при расчете пренебрегаю.

Окружные и внецентрично расположенные осевые силы вызывают прогиб вала. Однако, эти силы действуют в различных радиальных плоскостях, что, в отличие от радиальных сил, затрудняет их приведение к двум взаимно перпендикулярным плоскостям и оценку их влияния в общем балансе сил. Поэтому реакции на радиальных опорах были определены в радиальных плоскостях действия сил и нормальных к ним плоскостях с последующим нахождением равнодействующей на опорах.

Расчет в плоскости P_{1H} и P_{2H} исходя из равенства моментов

$$L := l = 0.263 \text{ m}$$

$$L_1 := 0.065 \text{ m}$$

$$L_2 := 0.054 \text{ m}$$

$$Z_1 := 0.031 \text{ m}$$

$$H_{H1} \cdot (L + L_1 + L_2) + P_{1H} \cdot (L + L_1 - Z_1 + L_2) - (M_{1aH} + M_{t1}) = 0$$

$$H_{H1} := \frac{-[P_{1H} \cdot (L + L_1 - Z_1 + L_2) - (M_{1aH} + M_{t1})]}{(L + L_1 + L_2)} = 7.099 \times 10^3 \cdot \text{N}$$

$$H_{H2} \cdot (L + L_1 + L_2) + P_{2H} \cdot (L + L_1 - Z_1 + L_2) - M_{2aH} - M_{t1} = 0$$

$$H_{H2} := \frac{-[P_{2H} \cdot (L + L_1 - Z_1 + L_2) - M_{2aH} - M_{t1}]}{(L + L_1 + L_2)} = 6.615 \times 10^3 \cdot \text{N}$$

Реакция в опоре со стороны всасывания В'Н определена исходя из равенства моментов

$$B_{H1} \cdot (L + L_1 + L_2) + P_{1H} \cdot (Z_1) + M_{1aH} + M_{t1} = 0$$

$$B_{H1} := \frac{-[P_{1H} \cdot (Z_1) + M_{1aH} + M_{t1}]}{(L + L_1 + L_2)} = -2.115 \times 10^4 \cdot \text{N}$$

$$B_{H2} \cdot (L + L_1 + L_2) + P_{2H} \cdot (Z_1) + M_{2aH} + M_{t1} = 0$$

$$B_{H2} := \frac{-[P_{2H} \cdot (Z_1) + M_{2aH} + M_{t1}]}{(L + L_1 + L_2)} = -2.138 \times 10^4 \cdot \text{N}$$

Расчет в плоскости силы окружной исходя из равенства моментов

$$H_{H11} \cdot (L + L_1 + L_2) + P_{ок1H} \cdot (L + L_1 - Z_1 + L_2) = 0$$

$$H_{H11} := \frac{-[P_{ок1H} \cdot (L + L_1 - Z_1 + L_2)]}{(L + L_1 + L_2)} = -4.801 \times 10^3 \cdot \text{N}$$

$$H_{H22} \cdot (L + L_1 + L_2) + P_{ок2H} \cdot (L + L_1 - Z_1 + L_2) = 0$$

$$H_{H22} := \frac{-[P_{ок2H} \cdot (L + L_1 - Z_1 + L_2)]}{(L + L_1 + L_2)} = -5.265 \times 10^3 \cdot \text{N}$$

$$B_{H11} \cdot (L + L_1 + L_2) + P_{ок1H} \cdot (Z_1) = 0$$

$$B_{H11} := \frac{-[P_{ok1H} \cdot (Z_1)]}{(L + L_1 + L_2)} = -423.719 \cdot N$$

$$B_{H22} \cdot (L + L_1 + L_2) + P_{ok2H} \cdot (Z_1) = 0$$

$$B_{H22} := \frac{-[P_{ok2H} \cdot (Z_1)]}{(L + L_1 + L_2)} = -464.639 \cdot N$$

Модули сил:

$$H_H := \sqrt{H_{H11}^2 + H_{H1}^2} = 8.57 \times 10^3 \cdot N$$

$$H_H := \sqrt{H_{H22}^2 + H_{H2}^2} = 8.454 \times 10^3 \cdot N$$

$$B_H := \sqrt{B_{H1}^2 + B_{H11}^2} = 2.116 \times 10^4 \cdot N$$

$$B_H := \sqrt{B_{H2}^2 + B_{H22}^2} = 2.139 \times 10^4 \cdot N$$

Самые большие нагрузки на 1-ый винт. Далее рассматриваем только его

$$H_H := \sqrt{H_{H11}^2 + H_{H1}^2} = 8.57 \times 10^3 \cdot N$$

$$B_H := \sqrt{B_{H1}^2 + B_{H11}^2} = 2.116 \times 10^4 \cdot N$$

Углы силы B_H относительно плоскости силы P_{2H}

$$\gamma := \arccos\left(\frac{B_{H22}}{B_H}\right) = 91.258 \cdot \text{deg}$$

Горизонтальной оси $\gamma_B := \gamma + \gamma_{1H} = 132.982 \cdot \text{deg}$

Углы силы H_H относительно плоскости силы P_{2H}

$$\gamma_1 := \arccos\left(\frac{H_{H22}}{H_H}\right) = 127.903 \cdot \text{deg}$$

Горизонтальной оси $\gamma_H := \gamma_1 + \gamma_{1H} = 169.626 \cdot \text{deg}$

Расчет в плоскости силы P_3 и P_4 исходя из равенства моментов

$$H_1 \cdot (L + L_1 + L_2) + P_3 \cdot (L + L_1 - Z_2 + L_2) - (M_{1a1}) = 0$$

$$H_1 := \frac{-[P_3 \cdot (L + L_1 - Z_2 + L_2) - (M_{1a1})]}{(L + L_1 + L_2)} = -6.234 \times 10^3 N$$

$$H_2 \cdot (L + L_1 + L_2) + P_4 \cdot (L + L_1 - Z_2 + L_2) - M_{2a1} = 0$$

$$H_2 := \frac{-[P_4 \cdot (L + L_1 - Z_2 + L_2) - M_{2a1}]}{(L + L_1 + L_2)} = -4.933 \times 10^3 \text{ N}$$

Реакция в опоре со стороны всасывания В'1 определена исходя из равенства моментов

$$B_1 \cdot (L + L_1 + L_2) + P_3 \cdot (Z_2) + M_{1a1} = 0$$

$$B_1 := \frac{-[P_3 \cdot (Z_2) + M_{1a1}]}{(L + L_1 + L_2)} = -1.829 \times 10^3 \text{ N}$$

$$B_2 \cdot (L + L_1 + L_2) + P_4 \cdot (Z_2) + M_{2a1} = 0$$

$$B_2 := \frac{-[P_4 \cdot (Z_2) + M_{2a1}]}{(L + L_1 + L_2)} = -1.493 \times 10^3 \text{ N}$$

Расчет от окружной

$$H_{11} \cdot (L + L_1 + L_2) + P_{ok11} \cdot (L + L_1 - Z_2 + L_2) = 0$$

$$H_{11} := \frac{-[P_{ok11} \cdot (L + L_1 - Z_2 + L_2)]}{(L + L_1 + L_2)} = -2.697 \times 10^3 \text{ N}$$

$$H_{22} \cdot (L + L_1 + L_2) + P_{ok21} \cdot (L + L_1 - Z_2 + L_2) = 0$$

$$H_{22} := \frac{-[P_{ok21} \cdot (L + L_1 - Z_2 + L_2)]}{(L + L_1 + L_2)} = -2.243 \times 10^3 \text{ N}$$

$$B_{11} \cdot (L + L_1 + L_2) + P_{ok11} \cdot (Z_2) = 0$$

$$B_{11} := \frac{-[P_{ok11} \cdot (Z_2)]}{(L + L_1 + L_2)} = -300.636 \text{ N}$$

$$B_{22} \cdot (L + L_1 + L_2) + P_{ok21} \cdot (Z_2) = 0$$

$$B_{22} := \frac{-[P_{ok21} \cdot (Z_2)]}{(L + L_1 + L_2)} = -250.037 \text{ N}$$

Модули сил:

$$H_{\text{вв}} := \sqrt{H_{11}^2 + H_1^2} = 6.793 \times 10^3 \cdot \text{N}$$

$$H_{\text{вв}} := \sqrt{H_{22}^2 + H_2^2} = 5.419 \times 10^3 \cdot \text{N}$$

$$B := \sqrt{B_1^2 + B_{11}^2} = 1.854 \times 10^3 \cdot \text{N}$$

$$B_{\text{вв}} := \sqrt{B_2^2 + B_{22}^2} = 1.514 \times 10^3 \cdot \text{N}$$

Самые большие нагрузки на 1-ый винт. Далее рассматриваем только его

$$H_{\text{вв}} := \sqrt{H_{11}^2 + H_1^2} = 6.793 \times 10^3 \cdot \text{N}$$

$$B_{\text{вв}} := \sqrt{B_1^2 + B_{11}^2} = 1.854 \times 10^3 \cdot \text{N}$$

$$\text{Углы силы } B_{\text{н}} \text{ относительно } \text{Плоскости силы } P_3 \quad \gamma_2 := \arccos\left(\frac{B_{11}}{B}\right) = 99.333 \cdot \text{deg}$$

$$\text{Горизонтальной оси} \quad \gamma_{B1} := \gamma_2 + \gamma_3 = 187.481 \cdot \text{deg}$$

$$\text{Углы силы } H_{\text{н}} \text{ относительно } \text{Плоскости силы } P_3 \quad \gamma_{\text{н}} := \arccos\left(\frac{H_{11}}{H}\right) = 113.395 \cdot \text{deg}$$

$$\text{Горизонтальной оси} \quad \gamma_{H1} := \gamma_{\text{н}} + \gamma_3 = 201.542 \cdot \text{deg}$$

Расчет в плоскости силы P_5 и P_6 исходя из равенства моментов

Given

$$H_{\text{н}} \cdot (L + L_1 + L_2) + P_5 \cdot (L + L_1 - Z_3 + L_2) - (M_{1a11}) = 0$$

$$H_{\text{н}} := \frac{-[P_5 \cdot (L + L_1 - Z_3 + L_2) - (M_{1a11})]}{(L + L_1 + L_2)} = -415.238 \text{ N}$$

$$H_{2\text{н}} \cdot (L + L_1 + L_2) + P_6 \cdot (L + L_1 - Z_3 + L_2) - M_{2a11} = 0$$

$$H_{2\text{н}} := \frac{-[P_6 \cdot (L + L_1 - Z_3 + L_2) - M_{2a11}]}{(L + L_1 + L_2)} = -276.261 \text{ N}$$

Реакция в опоре со стороны всасывания $B_{\text{н}}$ определена исходя из равенства моментов

$$B_{\text{н}} \cdot (L + L_1 + L_2) + P_5 \cdot (Z_3) + M_{1a11} = 0$$

$$B_{II} := \frac{-[P_5 \cdot (Z_3) + M_{1a11}]}{(L + L_1 + L_2)} = -174.001 \text{ N}$$

$$B_{2II} \cdot (L + L_1 + L_2) + P_6 \cdot (Z_3) + M_{2a11} = 0$$

$$B_{2II} := \frac{-[P_6 \cdot (Z_3) + M_{2a11}]}{(L + L_1 + L_2)} = -118.856 \text{ N}$$

Расчет от окружной

$$H_{III} \cdot (L + L_1 + L_2) + P_{ok111} \cdot (L + L_1 - Z_3 + L_2) = 0$$

$$H_{III} := \frac{-[P_{ok111} \cdot (L + L_1 - Z_3 + L_2)]}{(L + L_1 + L_2)} = -182.1 \text{ N}$$

$$H_{2III} \cdot (L + L_1 + L_2) + P_{ok211} \cdot (L + L_1 - Z_3 + L_2) = 0$$

$$H_{2III} := \frac{-[P_{ok211} \cdot (L + L_1 - Z_3 + L_2)]}{(L + L_1 + L_2)} = -127.429 \text{ N}$$

$$B_{III} \cdot (L + L_1 + L_2) + P_{ok111} \cdot (Z_3) = 0$$

$$B_{III} := \frac{-[P_{ok111} \cdot (Z_3)]}{(L + L_1 + L_2)} = -36.964 \text{ N}$$

$$B_{2III} \cdot (L + L_1 + L_2) + P_{ok211} \cdot (Z_3) = 0$$

$$B_{2III} := \frac{-[P_{ok211} \cdot (Z_3)]}{(L + L_1 + L_2)} = -25.867 \text{ N}$$

Модули сил:

$$H_I := \sqrt{H_{II}^2 + H_{III}^2} = 453.413 \cdot \text{N}$$

$$H_{II} := \sqrt{H_{2II}^2 + H_{2III}^2} = 304.234 \cdot \text{N}$$

$$B_I := \sqrt{B_{II}^2 + B_{III}^2} = 177.884 \cdot \text{N}$$

$$B_{II} := \sqrt{B_{2II}^2 + B_{2III}^2} = 121.638 \cdot \text{N}$$

Самые большие нагрузки на 1-ый винт. Далее рассматриваем только его

$$H_I := \sqrt{H_{II}^2 + H_{III}^2} = 453.413 \cdot N$$

$$B_I := \sqrt{B_{II}^2 + B_{III}^2} = 177.884 \cdot N$$

Углы силы B_n относительно Плоскости силы P_5 $\gamma_3 := \arccos\left(\frac{H_{III}}{H_I}\right) = 113.68 \cdot \text{deg}$

Горизонтальной оси $\gamma_{B2} := \gamma_3 + \gamma_5 = 225.333 \cdot \text{deg}$

Углы силы H_n относительно Плоскости силы P_5 $\gamma_{III} := \arccos\left(\frac{B_{III}}{B_I}\right) = 101.993 \cdot \text{deg}$

Горизонтальной оси $\gamma_{H2} := \gamma_{III} + \gamma_5 = 213.647 \cdot \text{deg}$

Для следующих зубьев рассчитывать силы не будем, они будут слишком малы из-за малого перепада давлений

Определение полных реакций и их направлений в опорах

Нахождение углов компонент реакции относительно плоскости P_{1n}

$$\theta_{HI} := \gamma_{H1} - \gamma_H = 31.917 \cdot \text{deg}$$

$$\theta_{HII} := \gamma_{H2} - \gamma_H = 44.021 \cdot \text{deg}$$

$$\theta_{BI} := \gamma_{B1} - \gamma_B = 54.499 \cdot \text{deg}$$

$$\theta_{BII} := \gamma_{B2} - \gamma_B = 92.351 \cdot \text{deg}$$

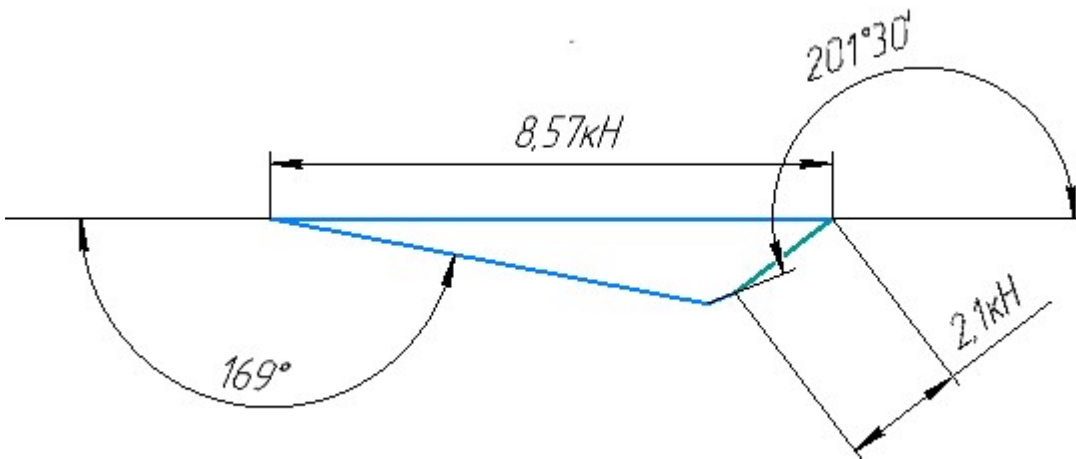
Реакции в опорах определены графически (рис.)

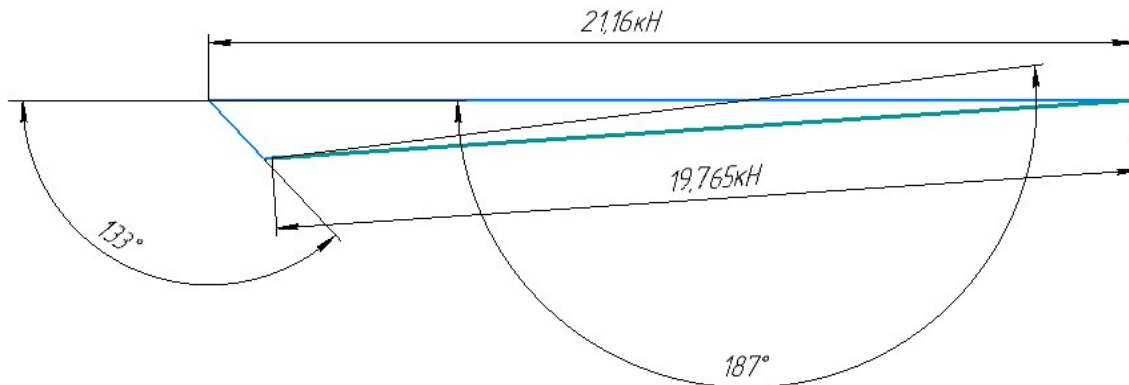
$$R_H := 2.1 \cdot 10^3 \cdot N$$

Нагнетание

$$R_B := 19.76 \cdot 10^3 \cdot N$$

Всасывание





Расчет подшипников

стандартный ресурс для компрессоров : $L'_{10ah} := 50000 \text{ ч}$

типовой режим нагружения - средний нормальный (II), коэффициент эквивалентности

$K_E := 0.56$

коэффициент динамичности нагрузки $K_B := 1.2$;

вероятность безотказной работы $P_t := 90\%$;

рабочая температура подшипников меньше 100 °С Б, температурный коэффициент $K_T := 1$

коэффициент вращения кольца $V := 1$ (вращается внутреннее кольцо). $n_1 := 2910$

Расчет подшипников ведущего ротора

Расчет радиальной опоры на стороне нагнетания

Из конструктивных соображений в качестве опоры выбран один роликовый радиальный подшипник 32215

$$C_r := 91 \cdot 10^3 \cdot \text{N}$$

коэффициент надежности: $a_1 := 1$

Эквивалентная динамическая радиальная нагрузка (Коэффициент радиальной нагрузки $X := 1$ при отсутствии осевой реакции):

$$P_3 := V \cdot X \cdot R_H \cdot K_T \cdot K_B = 2.52 \times 10^3 \cdot \text{N}$$

Коэффициент ресурса, зависящий от условия смазывания и материала подшипника:

$$a_{23} := 0.6 \quad k := \frac{10}{3} = 3.333$$

Грузоподъемность подшипника из условия

$$P_{\Sigma} = 2.52 \times 10^3 \cdot N \quad \blacksquare < \blacksquare \quad 0.5C_r = 4.55 \times 10^4 \cdot N$$

внутренний диаметр 75 мм. внешний 130 мм, ширина 31 мм

Ресурс для него

$$L'_{10ab} := a_1 \cdot a_{23} \cdot \left(\frac{C_r}{P_{\Sigma}} \right)^k \cdot \frac{10^6}{n_1 \cdot 60} = 3.209 \times 10^5 \quad \text{Подшипник подошел}$$

Расчет осевой опоры на стороне **нагнетания**

В качестве осевой опоры используется пара шариковых радиально-упорных подшипников.

$$k := 3$$

Предварительно выбран подшипник 46215

внутренний диаметр 75 мм. внешний 130 мм, ширина 25 мм

$$C_{r\Sigma} := 78.4 \cdot 10^3 \cdot N$$

$$C_{r\Sigma} := 1.625 \cdot C_r$$

Был выполнен расчет выбранного подшипника на ресурс.

Коэффициент надежности:

$$a_1 := 1$$

Коэффициент непостоянства нагрузки в течении года: $K_{нагр} := 0.6$

Коэффициент осевой нагрузки: $Y := 1$

$$P_{\Sigma} := Y \cdot \frac{P_{1a}}{2} \cdot K_T \cdot K_{нагр} \cdot K_B = 4.818 \times 10^3 \cdot N$$

Грузоподъемность подшипника из условия

$$P_{\Sigma} < 0.5C_{r\Sigma} :$$

$$a_{23} = 0.6$$

$$P_{\Sigma} = 4.818 \times 10^3 \cdot N < 0.5C_{r\Sigma} = 6.37 \times 10^4 \cdot N$$

Ресурс для него

$$L'_{10ab} := a_1 \cdot a_{23} \cdot \left(\frac{C_{r\Sigma}}{P_{\Sigma}} \right)^k \cdot \frac{10^6}{n_1 \cdot 60} = 6.354 \times 10^4 \quad \text{Подшипник подошел}$$

Расчет радиальной опоры на стороне **всасывания**

Подшипниковый узел ВЩ ротора образуют два специально подобранных и скомплектованных радиально- упорных однорядных роликоподшипника.

Предварительно назначен подшипник 2007115А ГОСТ 27365-87:

динамическая грузоподъемность $C_{\Sigma} := 99 \cdot 10^3 \cdot \text{N}$

статическая грузоподъемность $C_{0r} := 88 \cdot \text{kN}$

диаметр отверстия внутреннего кольца $d := 75 \text{mm}$

Коэффициент условий работы $a_1 := 0.6$
 $a_{23} := 0.62$ $k := \frac{10}{3}$

для комплекта из двух роликоподшипников :

$$C_{\Sigma} := 1.714 \cdot C_r$$

Задача рассчитываемых подшипников - воспринимать только осевую нагрузку

Коэффициент радиальной нагрузки: $X := 1$

Эквивалентная динамическая осевая нагрузка : $P_E := X \cdot V \cdot \frac{P_{1a}}{2} \cdot K_B \cdot K_T = 8.03 \times 10^3 \cdot \text{N}$

Расчетный скорректированный ресурс подшипника :

$$L_{10ah} := a_1 \cdot a_{23} \cdot \left(\frac{C_{r\Sigma}}{P_E} \right)^k \cdot \frac{10^6}{60 \cdot n_1} = 5.559 \times 10^4$$

Грузоподъемность подшипника из условия

$$P_E < 0.5C_r :$$

$$P_E = 8.03 \times 10^3 \cdot \text{N} < 0.5C_r = 4.95 \times 10^4 \cdot \text{N}$$

подшипники прошли проверку

Не будем рассчитывать реакции для ВМ винта, т к нагрузка на ВЦ больше, поэтому для расчета подшипников используем только реакции ВЦ винта и сами подшипники считаем только для ВЦ винта, т к подшипники на ВМ и ВЦ винт стоят одинаковые, то нет необходимости в отдельном расчете для подшипников ВМ винта.

$$\frac{\kappa}{\lambda^3}$$

$$\frac{|\kappa}{\Gamma}$$

$$\zeta$$

$$-$$

-----■

$$R_H := 3 \cdot 10^3 \cdot N$$

коэффициент надежности: $a_1 := 0.6$