

Расчет турбодетандера

Дано

Газ - Азот

$$p_0 := 4.2 \cdot \text{МПа}$$

$$\dot{m} := 0.3 \cdot \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad k := 1.4$$

$$T_0 := 175 \cdot \text{К}$$

$$\mu_{\text{аз}} := 0.6$$

$$R := 295.7 \cdot \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$p_K := 0.55 \cdot \text{МПа}$$

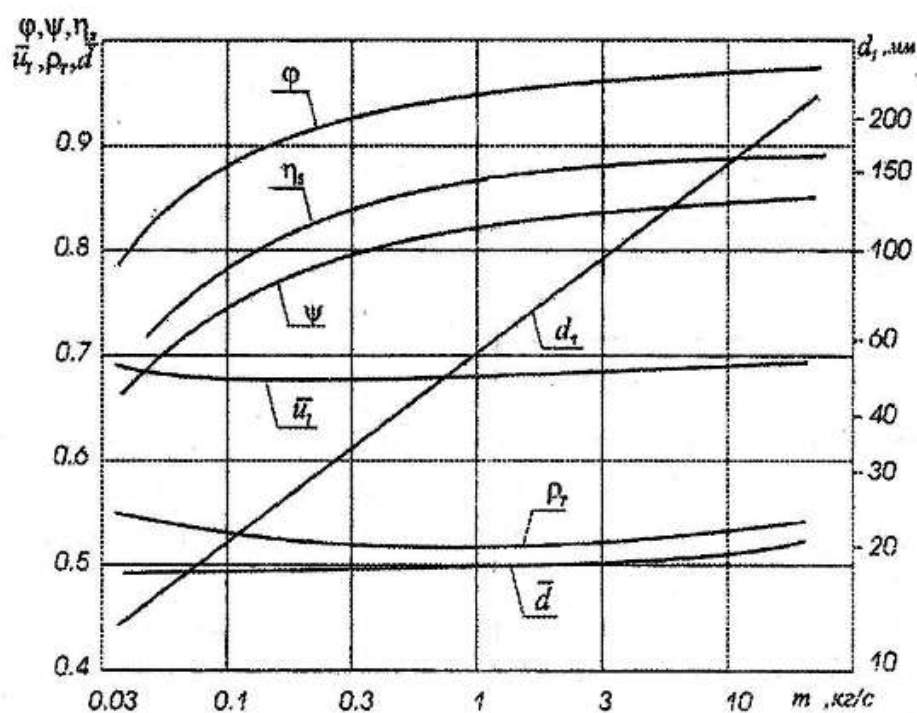


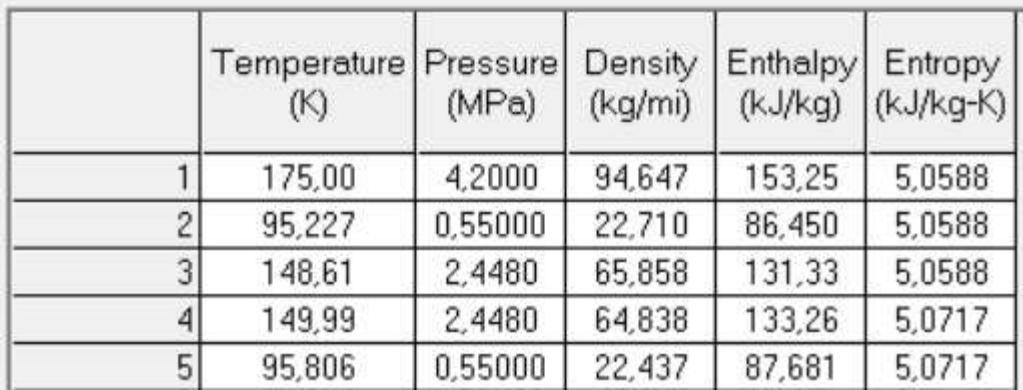
Рис. 2. Оптимальные параметры воздушных турбодетандеров среднего давления.

$$\varphi := 0.94 \quad \psi := 0.79 \quad d_1 := 35 \cdot \text{мм}$$

$$\eta_s := 0.84 \quad u_{np1} := 0.67 \quad p_t := 0.52$$

$$d_{np} := 0.5$$

$$p_1 := (p_0 - p_K) \cdot p_t + p_K = 2.448 \cdot \text{МПа}$$



$$h_0 := 153 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$h_{ks} := 86.45 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$h_{1s} := 131.33 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$\frac{p_1}{p_0} = \left(\frac{T_1}{T_0} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad T_1 := T_0 \cdot \left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 149.988 \cdot \text{К}$$

$$h_1 := 133.26 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$h_{2s} := 87.678 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Общий изоэнтروпный перепад

$$\Delta h_s := h_0 - h_{ks} = 66.55 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Изоэнтропный перепад в СА

$$\Delta h_{sc} := h_0 - h_{1s} = 21.67 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Изоэнтропный перепад в РК

$$\Delta h_{\text{скол}} := h_1 - h_{2s} = 45.582 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Потеря кинетической энергии в СА

$$q_c := h_1 - h_{1s} = 1.93 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Потери холода в СА

$$\delta h_c := h_{2s} - h_{ks} = 1.228 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Коэффициент возврата кинетической энергии в СА

$$\alpha_a := \frac{q_c - \delta h_c}{\Delta h_s} = 0.010548$$

Условная изоэнтروпная скорость

$$C_s := \sqrt{2 \cdot \Delta h_s} = 364.829 \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Изоэнтروпная скорость на выходе из СА

$$C_{1s} := \sqrt{(1 - \rho_t + \alpha_a) \cdot 2 \cdot \Delta h_s} = 255.523 \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Действительная скорость на выходе из СА

$$c_1 := \varphi \cdot C_{1s} = 240.192 \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Показатель политропы процесса расширения в СА

$$n := \frac{k}{k - \varphi^2 \cdot (k - 1)} = 1.338$$

Отношение давлений при истечении из СА с трением

$$\frac{p^*}{p_0} = \left(\frac{2}{n+1} \right)^{\frac{n}{n-1}} \quad p^* := p_0 \cdot \left(\frac{2}{n+1} \right)^{\frac{n}{n-1}} = 2.264 \cdot \text{МПа}$$

Отношение температур при истечении с трением

$$\frac{T^*}{T_0} = \frac{2}{n+1} \quad T^* := T_0 \cdot \frac{2}{n+1} = 149.719 \cdot K$$

| | Temperature (K) | Pressure (MPa) | Density (kg/mi) | Enthalpy (kJ/kg) | Entropy (kJ/kg-K) |
|---|--------------------|-------------------|--------------------|---------------------|----------------------|
| 1 | 149,72 | 2,2640 | 59,280 | 134,78 | 5,1017 |

$$\rho^* := 59.28 \cdot \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Критическая скорость при истечении с трением

$$c^* := \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k-1} \cdot R \cdot T_0 \cdot \left(\frac{n-1}{n+1} \right)} = 228.757 \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$c_1 = 240.192 \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad c^* = 228.757 \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$c_1 > c^*$ -режим закритический

Для закритического течения площадь горла SA

| | Temperature (K) | Pressure (MPa) | Density (kg/mi) | Enthalpy (kJ/kg) | Entropy (kJ/kg-K) | Comp. Factor |
|---|--------------------|-------------------|--------------------|---------------------|----------------------|--------------|
| 1 | 175,00 | 4,2000 | 94,647 | 153,25 | 5,0588 | 0,85435 |
| 2 | | | | | | |

$$z_0 := 0.85435$$

$$f := \frac{m}{\frac{P_0}{\sqrt{R \cdot z_0 \cdot T_0}} \cdot \sqrt{\frac{k \cdot (n-1)}{(k-1)} \cdot \left(\frac{2}{n+1} \right)^{\frac{n+1}{n-1}}}} = 0.000024 \text{ м}^2$$

Угол установки сопла для крыловидного лопаточного СА

$$\sin(\alpha_c) = \sin(\alpha_1) \cdot \frac{\rho_1 \cdot c_1}{\rho^* \cdot c^*}$$

$$\alpha_1 = (12 \div 18) \cdot \text{град}$$

$$\alpha_1 := 15 \cdot \text{град}$$

$$\alpha_c := \text{asin}\left(\sin(\alpha_1) \cdot \frac{\rho_1 \cdot c_1}{\rho^* \cdot c^*}\right) = 17.289 \text{ град}$$

| | Temperature (K) | Pressure (MPa) | Density (kg/m ³) |
|---|--------------------|-------------------|---------------------------------|
| 1 | 150,00 | 2,4480 | 64,831 |

$$\rho_1 := 64.83 \cdot \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

В ТД СД

$$\delta := 5 \cdot \text{град}$$

Окружная скорость на внешнем диаметре РК

$$u_1 := u_{\text{пр1}} \cdot C_s = 244.435 \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Внешний диаметр РК

$$T_2 := T_1 \cdot \left(\frac{p_k}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = 97.9 \cdot \text{K}$$

| | Temperature (K) | Pressure (MPa) | Density (kg/m ³) | Enthalpy (kJ/kg) | Entropy (kJ/kg-K) |
|---|--------------------|-------------------|---------------------------------|---------------------|----------------------|
| 1 | 97,900 | 0,55000 | 21,703 | 90,482 | 5,1006 |

$$\rho_2 := 21.7 \cdot \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$\theta = (0.034 \div 0.05) \quad \theta := \frac{0.034 + 0.05}{2} = 0.042$$

$$d_1 := \sqrt{\frac{m}{\theta \cdot u_1 \cdot \rho_2}} = 0.037 \cdot \text{м}$$

Диаметр выхода из РК

$$d_2 := d_{\text{пр}} \cdot d_1 = 0.018 \cdot \text{м}$$

Диаметр воронки

$$\zeta_{\text{ВТ}} := 0.95$$

$$d_0 := d_2 \cdot \sqrt{\frac{2}{1 + \zeta_{\text{ВТ}}^2}} = 0.019 \cdot \text{м}$$

Диаметр втулки

$$d_{\text{ВТ}} := \zeta_{\text{ВТ}} \cdot d_0 = 0.018 \cdot \text{м}$$

Ширина РК на входе

$$\tau_1 = (0.9 \quad 0.95) \quad \tau_1 := \frac{0.9 + 0.95}{2} = 0.925$$

$$b_1 := \frac{m}{\pi \cdot \rho_1 \cdot d_1 \cdot c_1 \cdot \tau_1 \cdot \sin(\alpha_1)} = 0.001 \cdot \text{м}$$

Треугольник скоростей на входе в колесо

$$w_1 := \sqrt{u_1^2 + c_1^2 - 2 \cdot u_1 \cdot c_1 \cdot \cos(\alpha_1)} = 63.396 \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$\beta_1 := \text{atan} \left(\frac{\sin(\alpha_1)}{\frac{u_1}{c_1} - \cos(\alpha_1)} \right) = 78.695 \cdot \text{град}$$

$$\beta_2 = (35 \quad 40) \cdot \text{град}$$

$$\beta_2 := 40 \cdot \text{град}$$

Изоэнтропная скорость на выходе из колеса

$$u_2 := d_{\text{пр}} \cdot u_1 = 122.218 \cdot \frac{\text{М}}{\text{с}}$$

$$w_{2s} := \sqrt{2 \cdot \Delta h_{\text{скол}} - u_1^2 + w_1^2 + u_2^2} = 224.436 \cdot \frac{\text{М}}{\text{с}}$$

Действительная скорость на выходе

$$w_2 := \psi \cdot w_{2s} = 177.305 \cdot \frac{\text{М}}{\text{с}}$$

Число лопаток на входе в колесо

$$z_1 \geq \frac{4}{\tan(\alpha_1)}$$

$$z_1 := \frac{4}{\tan(\alpha_1)} = 14.928$$

$$z_1 := 14$$

Число лопаток на выходе из колеса

$$z_2 := \frac{z_1}{2} = 7$$

Минимальное число сопел лопаточного СА с крыловидными профилями лопаток по условию неотрывности потока

$$z_c := \frac{360 \cdot \text{град}}{1.42 \cdot \alpha_c} = 14.663$$

$$z_c := 19$$

Площадь одного сопла определяется по полной площади

$$b_c := 1 \cdot \text{мм} \qquad h := 1.528 \text{ мм} \qquad \frac{b_c}{h} = 0.654 \qquad 0.5 \leq \frac{b_c}{h} \leq 2$$

$$f_{\text{юзк}} := z_c \cdot b_c \cdot h = 0.000029 \cdot \text{м}^2$$

$$d_c := d_1 + 1 \text{ мм} = 0.038 \cdot \text{м}$$

$$d_0 := 0.052 \cdot \text{м}$$

$$R = (3 \cdot 5) \cdot h \quad \gamma := \frac{360}{z_c} = 18.947$$

$$R := 3 \cdot h = 4.584 \times 10^{-3} \cdot \text{м}$$

$$l_r := 0.5 \cdot h = 0.00076 \cdot \text{м}$$

Толщина входной кромки

$$\Delta_{\text{BX}} := 2.2 \text{ мм}$$

Угол потока на входе находится из соотношения

$$\cos(\alpha_0) = \frac{d_c}{d_0} \cdot \cos(\alpha_c)$$

$$\alpha_0 := \arccos\left(\frac{d_c}{d_0} \cdot \cos(\alpha_c)\right) = 46.197 \cdot \text{град}$$

Коэффициент стеснения

$$\tau_0 := 1 - \frac{\Delta_{\text{BX}} \cdot z_c}{\pi \cdot d_0 \cdot \sin(\alpha_0)} = 0.645$$

Скорость потока на входе в СА определяется из соотношения

$$c_0 := c^* \cdot \frac{h}{\pi \cdot d_0 \cdot \tau_0 \cdot \sin(\alpha_0)} = 4.593 \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$\frac{c_0}{c^*} = \frac{h}{\pi \cdot d_0 \cdot \tau_0 \cdot \sin(\alpha_0)} = 1$$

Потери на трение дисков и перетечек

Коэффициент сжимаемости и динамическая вязкость
определяется по температуре T_1

| Temperature (K) | Pressure (MPa) | Density (kg/m ³) | Enthalpy (kJ/kg) | Entropy (kJ/kg·K) | Comp. Factor | Viscosity (μPa·s) |
|--------------------|-------------------|---------------------------------|---------------------|----------------------|--------------|----------------------|
| 150,00 | 2,4480 | 64,831 | 133,27 | 5,0718 | 0,84816 | 11,139 |

$$z_1 := 0.84816 \quad \mu_1 := 11.139 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$$

Для гидравлически гладких поверхностей число Рейнольдса

$$Re := \frac{u_1 \cdot d_1 \cdot \rho_1}{\mu_1} = 5.221 \times 10^7$$

$$Re > 5.6 \cdot 10^5$$

$$Rz = (5 \div 7) \text{ мкм}$$

$$Rz := 6 \text{ мкм}$$

$$Re_{\text{пред}} := \frac{50 \cdot d_1}{Rz} = 3.058 \times 10^5$$

Коэффициент сопротивления трения

$$c_f := 0.0089 \cdot Re_{\text{пред}}^{-0.2} = 0.00071$$

Мощность трения дисков

$$k_{\text{ТД}} = (1.6 \quad 2.5)$$

$$k_{\text{ТД}} := \frac{1.6 + 2.5}{2} = 2.05$$

$$N_{\text{ТД}} := k_{\text{ТД}} \cdot c_f \cdot \rho_1 \cdot u_1^3 \cdot d_1^2 = 1.86 \times 10^3 \cdot \text{Вт}$$

$$c_2 := \sqrt{(u_2 - w_2 \cdot \cos(\beta_2))^2 + (w_2 \cdot \sin(\beta_2))^2} = 114.778 \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$\alpha_2 := \text{atan}\left(\frac{w_2 \cdot \sin(\beta_2)}{u_2 - w_2 \cdot \cos(\beta_2)}\right) = -83.192 \cdot \text{град}$$

Техническая работа

$$L_t := u_1 \cdot c_1 \cdot \cos(\alpha_1) - u_2 \cdot c_2 \cdot \cos(\alpha_2) = 55047.91 \cdot \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

Коэффициент потерь на трение дисков

$$\alpha_{\text{ТД}} := \frac{N_{\text{ТД}}}{m \cdot L_t} = 0.113$$

Коэффициент потерь холода от перетечек газа через зазор

$$\alpha_{\text{УТ}} := 0.020$$

Гидравлический КПД

$$\eta_{\text{Г}} := 2 \cdot u_{\text{пр1}} \cdot \varphi \cdot \cos(\alpha_1) \cdot \sqrt{1 - \rho_t} = 0.843$$

Изоэнтропный КПД

$$\eta_{\text{сн}} := \eta_{\text{Г}} \cdot (1 - \alpha_{\text{УТ}} - \alpha_{\text{ТД}}) = 0.731$$

чертёж соплового аппарата

