

Technická univerzita v Košiciach

Letecká fakulta

Katedra leteckého inžinierstva

VÝPOČTOVÉ CVIČENIE č. 1

**Približný výpočet odstredivého kompresora
LTKM**

Študent:

Roman Baltes

Cvičiaci učiteľ:

Ing. Marián HOCKO, PhD.

Košice 2006

TECHNICKÁ UNIVERZITA V KOŠICIACH

LETECKÁ FAKULTA

Katedra leteckého inžinierstva

Akademický rok: 2005/2006

VÝPOČTOVÉ ZADANIE č.1

Meno študenta: Roman Baltes

Názov študijného odboru: 5-430-3C

Názov špecializácie: Údržba a oprava lietadiel a leteckých motorov

Názov ročníkovej práce: Približný výpočet odstredivého kompresora LTKM

Zadanie ročníkovej práce:

Pre nižšie uvedené hodnoty navrhňte jednostranný odstredivý (radiálny) kompresor s bezlopatkovým a lopatkovým difúzorom a kolenovým výstupom vzduchu do spaľovacej komory LTKM.

Prednášajúci učiteľ: Ing. Marián Hocko, PhD.

Cvičiaci učiteľ: Ing. Marián Hocko, PhD.

Vedúci katedry: prof. Ing. Jozef POVAŽAN, CSc.

Dekan LF: m. prof. RNDr. František OLEJNÍK

Termín odovzdania ročníkovej práce: 9.5.2006

V Košiciach dňa 8.3.2006

PRIBLIŽNÝ VÝPOČET ODS TRE DIVÉHO KOMPRESORA

Zadanie:

Pre nižšie uvedené hodnoty navrhňte jednostranný odstredivý (radiálny) kompresor s bezlopatkovým a lopatkovým difúzorom a kolenovým výstupom vzduchu do spaľovacej komory LTKM.

Zadané parametre:

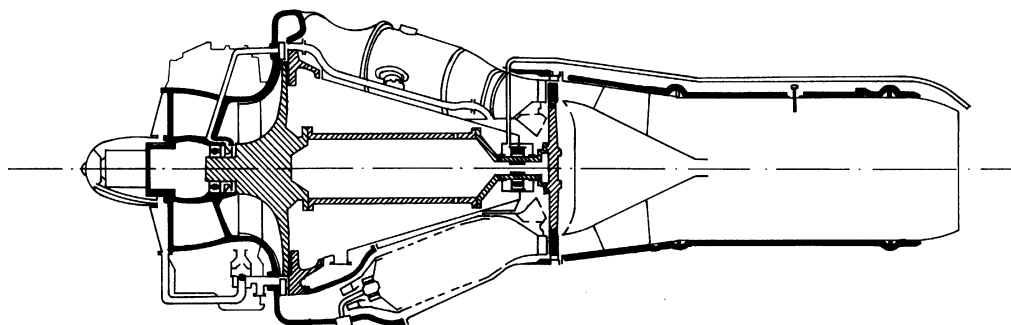
Výška letu $H = 0$ m

Rýchlosť letu $c_0 = 0$ m.s⁻¹

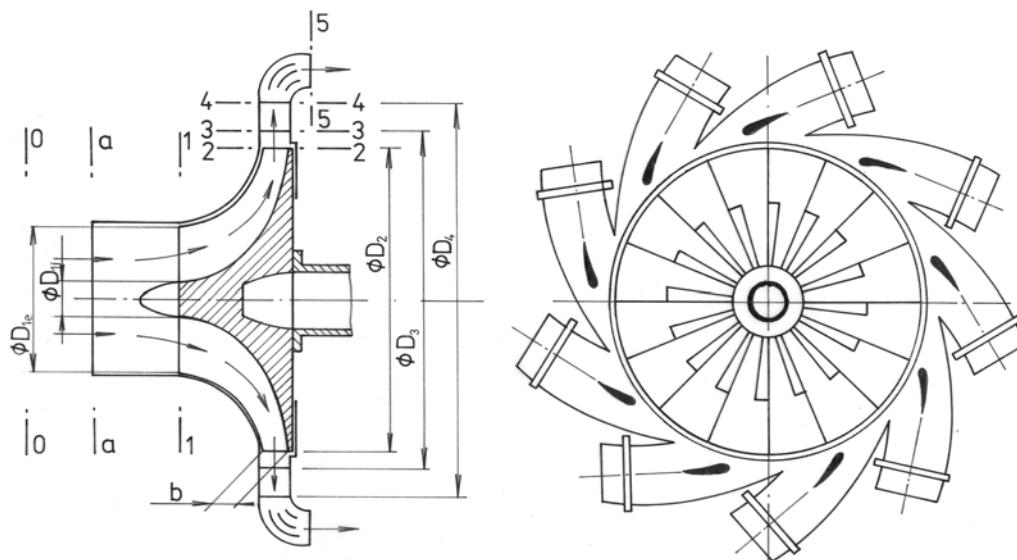
Prietokové množstvo vzduchu $Q_v = 12$ kg.s⁻¹

Celkový stupeň stlačenia $\pi_{KC} = 4,2$

Celková účinnosť kompresora $\eta_{KC} = 0,79$

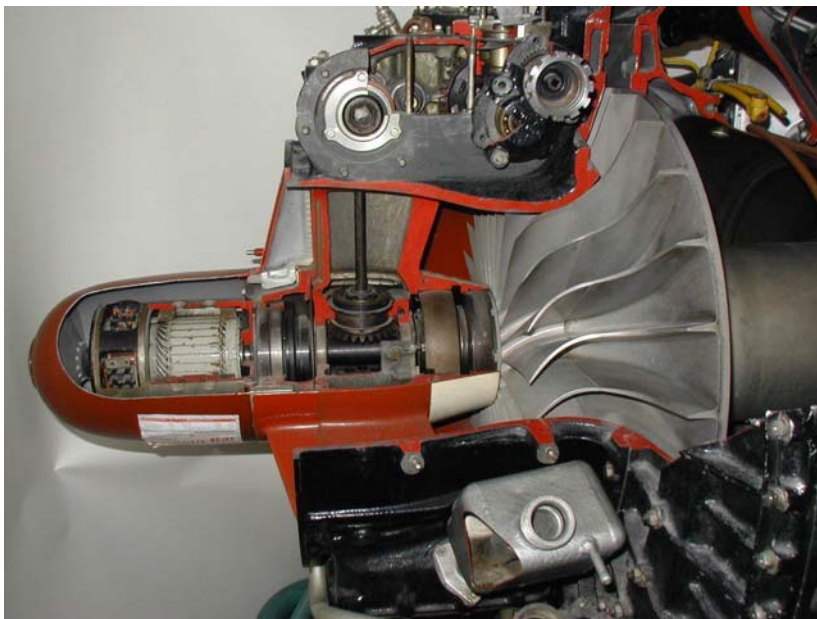


Obr. 1 Principiálna schéma jednorúrovňového leteckého turbokompresorového motora s jednostranným odstredivým kompresorom M-701



Obr. 2 Principiálna schéma odstredivého (radiálneho) kompresora LTKM

a – 1 vstupné ústrojenstvo, 1 – 2 obežné koleso, 2 – 3 bezlopatkový difúzor, 3 – 4 lopatkový difúzor, 4 – 5 výstupné ústrojenstvo odstredivého kompresora.



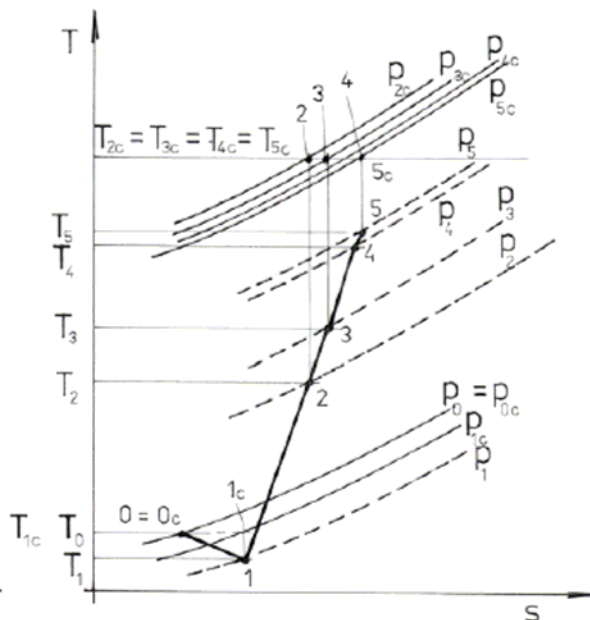
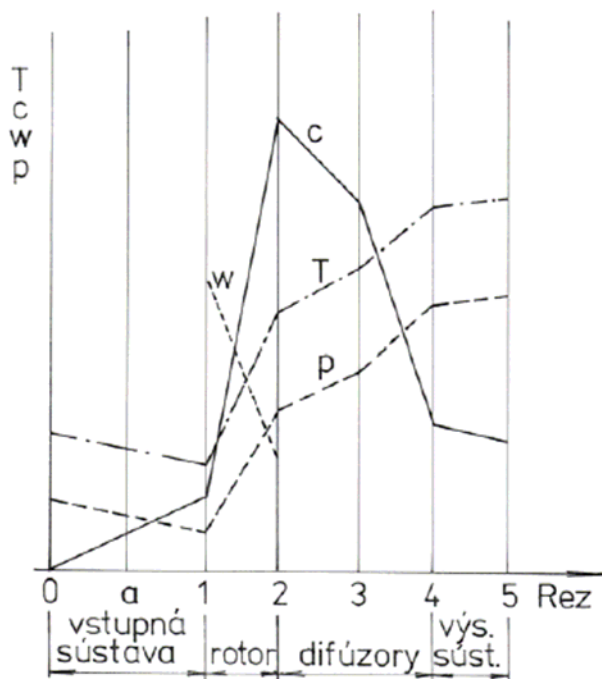
Obr. 3 Rez odstredivého kompresora motora M-701

1. Z tabuliek medzinárodnej štandardnej atmosféry je možné odčítať pre zadané hodnoty

Pre základné fyzikálne podmienky:

$$p_0 = 10,13 \text{ N.cm}^{-2},$$

$$T_0 = 288 \text{ K.}$$



Obr. 4 Priebeh zmeny parametrov vzduchu pri prietoku odstredivým (radiálnym) kompresorom LTKM

2. Celkový tlak a celková teplota na vstupu do kompresora

$$p_{0c} = p_0 \cdot \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} \cdot M_0^2\right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} [\text{Pa}]$$

$$p_{0c} = 101300 \cdot \left(1 + \frac{1,4 - 1}{2} \cdot 0^2\right)^{\frac{1,4}{1,4 - 1}}$$

$$\mathbf{p_{0c} = 101\,300\, \text{Pa}}$$

$$T_{0c} = T_0 \cdot \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} \cdot M_0^2\right) [\text{K}]$$

$$T_{0c} = 288 \cdot \left(1 + \frac{1,4 - 1}{2} \cdot 0^2\right)$$

$$\mathbf{T_{0c} = 288\, \text{K}}$$

kde:

$$\kappa = 1,4$$

$$M_0 = \frac{c_0}{20,05 \cdot \sqrt{T_0}} [1]$$

$$M_0 = \frac{0}{20,05 \cdot \sqrt{288}}$$

$$M_0 = 0$$

3. Celkový tlak p_{1c} a celková teplota T_{1c} na vstupu do obehného kola

Predpoklad:

na vstup do obehného kola neprivádzame ani neodvádzame teplo $\Delta Q_0 = 0$.

$$p_{1c} = \sigma_v \cdot p_{0c} [\text{Pa}]$$

$$p_{1c} = 0,98 \cdot 101300$$

$$\mathbf{p_{1c} = 99\,274\, \text{Pa}}$$

Hodnota súčiniteľa zachovania celkového tlaku na vstupe do obehného kola kompresora σ_v sa volí v rozsahu $\sigma_v = 0,97$ až $0,99$ pre prípad nulovej rýchlosti $M_0 = 0$.

$$T_{1c} = T_{0c} [\text{K}]$$

$$\mathbf{T_{1c} = 288\, \text{K}}$$

4. Výpočet adiabatickej práce kompresora

$$W_{ad,c} = c_p \cdot T_{1c} \cdot \left(\pi_{KC}^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} - 1\right) [\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

$$W_{ad,c} = 1005 \cdot 288 \cdot \left(4,2^{\frac{1,4 - 1}{1,4}} - 1\right)$$

$$\mathbf{W_{ad,c} = 146\,703,87\, \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

I. VÝPOČET OBEŽNÉHO KOLESA

5. Výpočet obvodovej rýchlosti na výstupe z obežného kola u_2

Predpoklad:

1. Vzduch vstupuje do kompresora bez rozvírenia $c_{1u} = 0$ teda platí: $c_{1a} = c_1$.
2. Voľba súčiniteľa sklzu μ , ktorý má hodnotu $\mu = 0,86$ až $0,92$.
Voľba súčiniteľa trecej práce disku α , ktorý má u odstredivých (radiálnych) kompresorov LTKM hodnotu $\alpha = 0,03$ až $0,05$. Súčiniteľ sklzu $\mu = \frac{c_{2u}}{u_{2\infty}}$ [1] je pomer obvodových zložiek absolútnej rýchlosti prúdu vzduchu pre skutočné obežné koleso a obežné koleso s nekonečným počtom lopatiek. Pre obežné koleso s radiálnymi lopatkami platí: $c_{2u,\infty} = u_2$. Súčiniteľ α definuje straty v koncovej časti obežného kola $\alpha = \alpha_0 \cdot (1)$.
3. Približné stanovenie obvodovej rýchlosti na vonkajšom priemere obežného kola odstredivého (radiálneho) kompresora.

$$u_2 = \sqrt{\frac{W_{ad,c}}{\eta_{KC} \cdot (\mu + \alpha)}} \quad [m \cdot s^{-1}]$$

$$u_2 = \sqrt{\frac{146703,87}{0,79 \cdot (0,91 + 0,04)}}$$

$$u_2 = 442,13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$



Obr. 5 Jednostranné obežné koleso odstredivého kompresora motora M-701

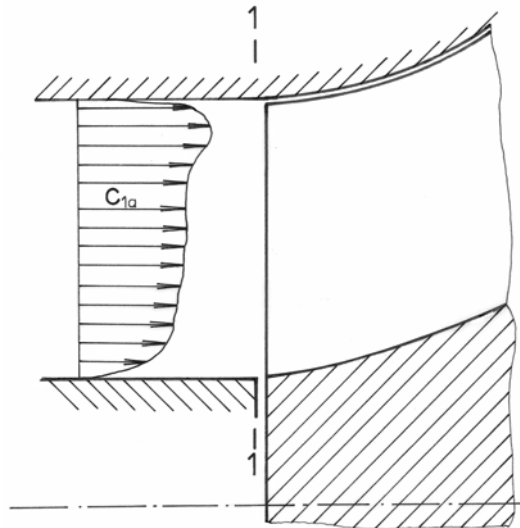
6. Stanovenie absolútnej rýchlosti na vstupe do obežného kola c_1

Voľba pomeru $\frac{c_{2r}}{u_2} = 0,25 \approx 0,35$ [1]. Za predpokladu, že $c_{2r} = c_{1a}$ bude určená rýchlosť c_1 .

$$c_{2r} = 0,28 \cdot u_2 [m \cdot s^{-1}]$$

$$c_{2r} = 0,28 \cdot 442,13$$

$$c_{2r} = \mathbf{123,80 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}$$



Obr. 6 Rozloženie osovej zložky vstupnej absolútnej rýchlosti c_{1a} na vstupe do obežného kolesa odstredivého (radiálneho) kompresora

7. Parametre na vstupe do obežného kolesa na strednom priemere:

Predpoklad: $c_1 = c_{1s} [m \cdot s^{-1}]$.

$$T_1 = T_{1c} - \frac{c_{1s}^2}{2 \cdot c_p} [K]$$

$$T_1 = 288 - \frac{123,80^2}{2 \cdot 1005}$$

$$\mathbf{T_1 = 280,37 \text{ K}}$$

$$p_1 = p_{1c} \left(\frac{T_1}{T_{1c}} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} [Pa]$$

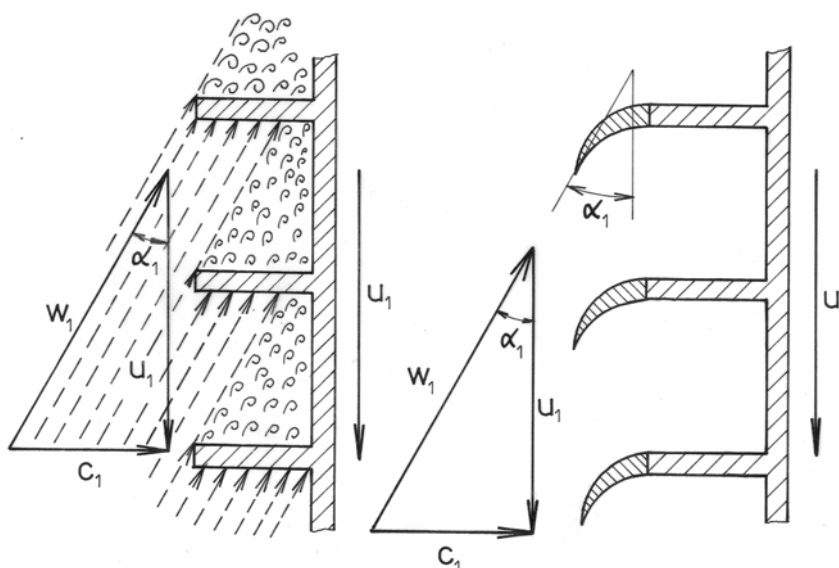
$$p_1 = 99274 \cdot \left(\frac{280,37}{288} \right)^{1,4-1}$$

$$\mathbf{p_1 = 90 \text{ 369,57 Pa}}$$

$$\rho_1 = \frac{p_1}{R \cdot T_1} [kg \cdot m^{-3}]$$

$$\rho_1 = \frac{90369,57}{287,1 \cdot 280,37}$$

$$\rho_1 = 1,12 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$



Obr. 7 Rýchlostné pomery na vstupe do obežného kola odstredivého (radiálneho) kompresora LTKM s rozvírením a bez rozvírenia

8. Výpočet vonkajšieho priemeru na vstupe do obežného kola odstredivého (radiálneho) kompresora

$$D_{1e} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_v}{\pi \cdot c_{1as} \cdot \rho_1 \cdot (1 - v^2)}} [m]$$

$$D_{1e} = \sqrt{\frac{4 \cdot 12}{\pi \cdot 123,80 \cdot 1,12 \cdot (1 - 0,35^2)}}$$

$$D_{1e} = 0,354 \text{ m}$$

$$v = \frac{D_{1i}}{D_{1e}} = 0,35 [1]$$

$$D_{1i} = 0,35 \cdot 0,354$$

$$D_{1i} = 0,124 \text{ m}$$

9. Stanovenie stredného priemeru na vstupe do obežného kola

$$D_{1s} = D_{1e} \cdot \sqrt{\frac{1 + v^2}{2}} [m]$$

$$D_{1s} = 0,354 \cdot \sqrt{\frac{1 + 0,35^2}{2}}$$

$$D_{1s} = 0,265 \text{ m}$$

10. Stanovenie vonkajšieho priemeru obežného kola odstredivého kompresora

Pomer $\frac{D_{1e}}{D_2} \approx 0,45 \div 0,65$. V uvedenom rozsahu sa volí pomer priemerov

$$D_2 = \frac{D_{1e}}{0,65} [m]$$

$$D_2 = \frac{0,354}{0,65}$$

$$D_2 = 0,545 \text{ m}$$

11. Výpočet otáčok odstredivého (radiálneho) kompresora

$$n = \frac{60 \cdot u_2}{\pi \cdot D_2} [\text{min}^{-1}]$$

$$n = \frac{60 \cdot 442,13}{\pi \cdot 0,545}$$

$$n = 15\,493,69 \text{ min}^{-1}$$

12. Výpočet vstupnej obvodovej rýchlosti obežného kola odstredivého kompresora

$$u_{1i} = \frac{\pi \cdot D_{1i} \cdot n}{60} [m \cdot s^{-1}]$$

$$u_{1i} = \frac{\pi \cdot 0,124 \cdot 15\,493,69}{60}$$

$$u_{1i} = 100,59 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$u_{1s} = \frac{\pi \cdot D_{1s} \cdot n}{60} [m \cdot s^{-1}]$$

$$u_{1s} = \frac{\pi \cdot 0,265 \cdot 15\,493,69}{60}$$

$$u_{1s} = 214 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$u_{1e} = \frac{\pi \cdot D_{1e} \cdot n}{60} [m \cdot s^{-1}]$$

$$u_{1e} = \frac{\pi \cdot 0,354 \cdot 15\,493,69}{60}$$

$$u_{1e} = 287,18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

13. Výpočet vstupnej relatívnej rýchlosti obežného kola odstredivého kompresora

$$w_{1i} = \sqrt{u_{1i}^2 + c_{1ai}^2} [m \cdot s^{-1}]$$

$$w_{1i} = \sqrt{100,59^2 + 123,80^2}$$

$$w_{1i} = 159,51 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$w_{1s} = \sqrt{u_{1s}^2 + c_{1as}^2} [m \cdot s^{-1}]$$

$$w_{1s} = \sqrt{214^2 + 123,80^2}$$

$$w_{1s} = 247,23 \text{ m.s}^{-1}$$

$$w_{1e} = \sqrt{u_{1e}^2 + c_{1ae}^2} [m.s^{-1}]$$

$$w_{1e} = \sqrt{287,18^2 + 123,80^2}$$

$$w_{1e} = 312,73 \text{ m.s}^{-1}$$

Predpoklad:

$$c_{1ai} = c_{1as} = c_{1ae} = c_{1a} = c_1 [m.s^{-1}]$$

$c_{1r,r} = \text{konšt.}$

14. Statická teplota na vstupe do obežného kola odstředivého kompresora

$$T_{li} = T_{0c} - \frac{c_{li}^2}{2.c_p} [K]$$

$$\text{kde: } c_{li} = \sqrt{w_{li}^2 - u_{li}^2} [m.s^{-1}]$$

$$T_{li} = 288 - \frac{123,79^2}{2.1005}$$

$$c_{li} = \sqrt{159,51^2 - 100,59^2}$$

$$T_{li} = 280,376 \text{ K}$$

$$c_{li} = 123,79 \text{ m.s}^{-1}$$

$$T_{ls} = T_{0c} - \frac{c_{ls}^2}{2.c_p} [K]$$

$$c_{ls} = \sqrt{w_{ls}^2 - u_{ls}^2} [m.s^{-1}]$$

$$T_{ls} = 288 - \frac{123,80^2}{2.1005}$$

$$c_{ls} = \sqrt{247,23^2 - 214^2}$$

$$T_{ls} = 280,375 \text{ K}$$

$$c_{ls} = 123,80 \text{ m.s}^{-1}$$

$$T_{le} = T_{0c} - \frac{c_{le}^2}{2.c_p} [K]$$

$$c_{le} = \sqrt{w_{le}^2 - u_{le}^2} [m.s^{-1}]$$

$$T_{le} = 288 - \frac{123,81^2}{2.1005}$$

$$c_{le} = \sqrt{312,73^2 - 287,18^2}$$

$$T_{le} = 280,374 \text{ K}$$

$$c_{le} = 123,81 \text{ m.s}^{-1}$$

15. Machové číslo relativního proudu vzduchu na vstupe do obežného kola

$$M_{wli} = \frac{w_{li}}{20,05\sqrt{T_{li}}} [1]$$

$$M_{wli} = \frac{159,51}{20,05\sqrt{280,376}}$$

$$M_{wli} = 0,48$$

$$M_{wls} = \frac{w_{ls}}{20,05\sqrt{T_{ls}}} [1]$$

$$M_{w1s} = \frac{247,23}{20,05 \cdot \sqrt{280,375}}$$

$$\mathbf{M_{w1s} = 0,74}$$

$$M_{w1e} = \frac{w_{1e}}{20,05 \sqrt{T_{1e}}} [1]$$

$$M_{w1e} = \frac{312,73}{20,05 \cdot \sqrt{280,374}}$$

$$\mathbf{M_{w1e} = 0,93}$$

16. Určenie uhla α_1

$$\operatorname{tg} \alpha_{1i} = \frac{c_{1ai}}{u_{1i} - c_{1ui}} \Rightarrow \alpha_{1i} [^\circ]$$

$$\operatorname{tg} \alpha_{1i} = \frac{123,80}{100,59} \Rightarrow \alpha_{1i} = 50,91^\circ$$

$$\operatorname{tg} \alpha_{1s} = \frac{c_{1as}}{u_{1s} - c_{1ui}} \Rightarrow \alpha_{1s} [^\circ]$$

$$\operatorname{tg} \alpha_{1s} = \frac{123,80}{214} \Rightarrow \alpha_{1s} = 30,05^\circ$$

$$\operatorname{tg} \alpha_{1e} = \frac{c_{1ae}}{u_{1e} - c_{1ui}} \Rightarrow \alpha_{1e} [^\circ]$$

$$\operatorname{tg} \alpha_{1e} = \frac{123,80}{287,18} \Rightarrow \alpha_{1e} = 23,32^\circ$$

17. Voľba počtu lopatiek z_k obežného kola radiálneho kompresora

$$z_k = \frac{2 \cdot \pi \cdot \sin \frac{\varphi_{1s} + \varphi_2}{2}}{k \cdot \ln \frac{D_2}{D_{1e}}} [1]$$

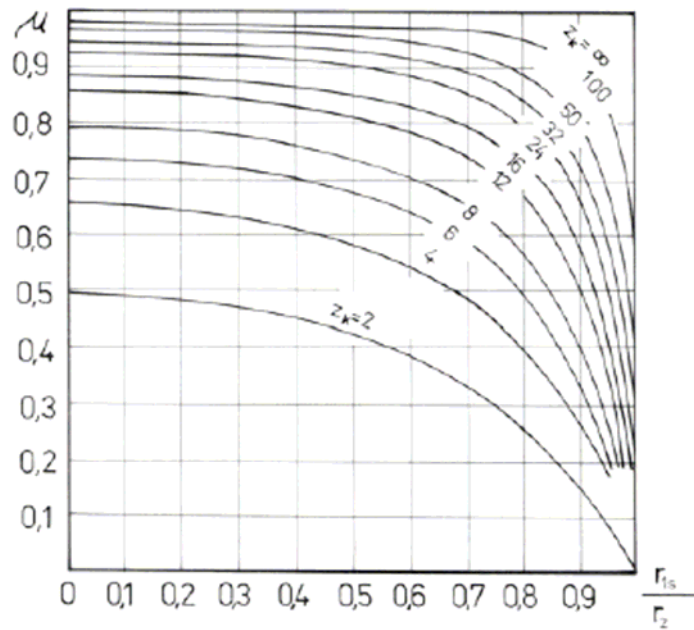
$$z_k = \frac{2 \cdot \pi \cdot \sin \frac{30,05 + 90}{2}}{0,45 \cdot \ln \frac{0,545}{0,354}}$$

$$\mathbf{z_k = 28}$$

kde:

$$\varphi_{1s} = \alpha_{1s}$$

$$\varphi_2 = 90^\circ$$



Obr. 8 Závislosť súčiniteľa sklzu od pomeru polomerov pre zadaný počet lopatiek obežného kola odstredivého kola

18. Kontrola voleného súčiniteľa sklzu μ

$$\mu = \frac{1}{1 + \frac{2\pi}{3 \cdot z_k} \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{D_{1s}}{D_2}\right)^2}} [1]$$

$$\mu = \frac{1}{1 + \frac{2\pi}{3 \cdot 28} \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{0,265}{0,545}\right)^2}}$$

$$\mu = 0,91$$

19. Celková teplota vzduchu za obežným kolesom T_{2c}

$$T_{2c} = T_{1c} + \frac{1}{c_p} \cdot [u_2^2 \cdot (\mu + \alpha) - u_{1s} \cdot c_{1us}] [K]$$

$$T_{2c} = 288 + \frac{1}{1005} \cdot [442,13^2 \cdot (0,91 + 0,04) - 214 \cdot 0]$$

$$T_{2c} = 472,78 \text{ K}$$

20. Absolútna rýchlosť na výstupe z obežného kola radiálneho kompresora

$$c_2 = \sqrt{c_{2u}^2 + c_{2r}^2} [m \cdot s^{-1}]$$

$$c_2 = \sqrt{402,34^2 + 123,80^2}$$

$$c_2 = 420,96 \text{ m.s}^{-1}$$

kde:

$$c_{2r} = c_{1a} [\text{m.s}^{-1}],$$

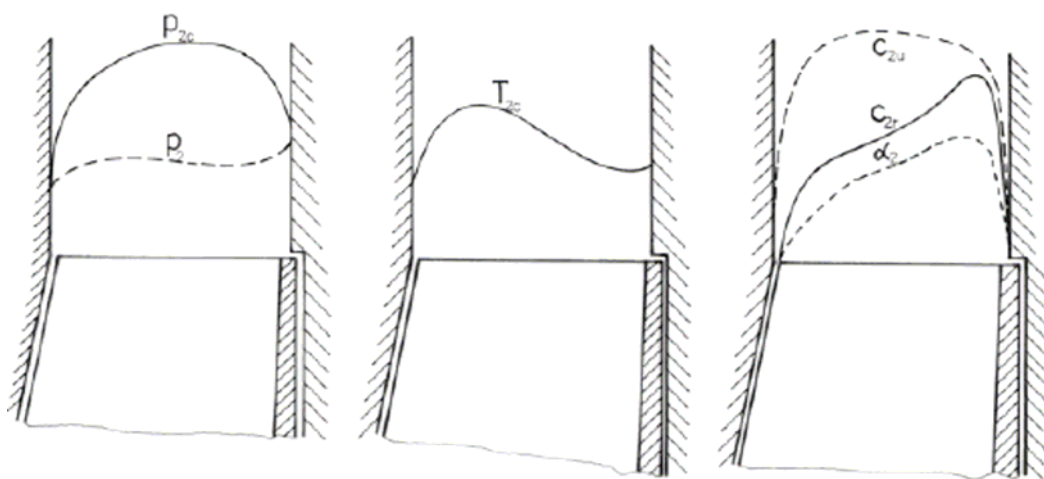
$$c_{2u} = \mu \cdot u_2$$

$$c_{2u} = 0,91 \cdot 442,13$$

$$c_{2u} = 402,34 \text{ m.s}^{-1}$$



Obr. 9 Rez výstupnej sústavy odstredivého kompresora motora M-701



Obr. 10 Priebeh zmeny parametrov vzduchu na výstupe z obežného kola odstredivého kompresora

21. Statická teplota na výstupe z obežného kola odstredivého kompresora

$$T_2 = T_{2c} - \frac{c_2^2}{2 \cdot c_p} [K]$$

$$T_2 = 472,78 - \frac{420,96^2}{2 \cdot 1005}$$

$$T_2 = 384,62 \text{ K}$$

22. Machové číslo na výstupe z obežného kola odstredivého kompresora

$$M_{c2} = \frac{c_2}{20,05 \cdot \sqrt{T_2}} [1]$$

$$M_{c2} = \frac{420,96}{20,05 \cdot \sqrt{384,62}}$$

$$M_{c2} = 1,07$$

23. Určenie celkových strát pri prietoku vzduchu obežným kolesom odstredivého kompresora

$$W_{r1} = \xi_1 \cdot \frac{W_{1s}^2}{2} [J \cdot kg^{-1}]$$

$$W_{r1} = 0,25 \cdot \frac{247,23^2}{2}$$

$$W_{r1} = 7640,33 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$W_{r2} = \xi_2 \cdot \frac{c_{1a}^2}{2} [J \cdot kg^{-1}]$$

$$W_{r2} = 0,13 \cdot \frac{123,80^2}{2}$$

$$W_{r2} = 996,22 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$W_{r3} = \alpha \cdot u_2^2 [J \cdot kg^{-1}]$$

$$W_{r3} = 0,04 \cdot 442,13^2$$

$$W_{r3} = 7819,16 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

kde:

$$\xi_1 = 0,1 \div 0,3$$

$$\xi_2 = 0,1 \div 0,2$$

$$\Sigma W_r = W_{r1} + W_{r2} + W_{r3}$$

$$\Sigma W_r = 7640,33 + 996,22 + 7819,16$$

$$\Sigma W_r = 16455,71 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

24. Stanovenie polytropického exponentu stlačenia v obežnom kolese n_1

Predpoklad:

nie je odvádzané žiadne teplo z obežného kola odstredivého kompresora.

$$\frac{n_1}{n_1 - 1} = \frac{\kappa}{\kappa - 1} - \frac{\sum W_r}{R \cdot (T_2 - T_1)} [1]$$

$$\frac{n_1}{n_1 - 1} = \frac{1,4}{1,4 - 1} - \frac{16455,71}{287,1 \cdot (384,62 - 280,37)}$$

$$n_1 = 1,51$$

25. Statický tlak na výstupe z obežného kola odstredivého kompresora:

$$p_2 = p_1 \cdot \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{n_1}{n_1 - 1}} [Pa]$$

$$p_2 = 90369,57 \cdot \left(\frac{384,62}{280,37} \right)^{\frac{1,51}{1,51 - 1}}$$

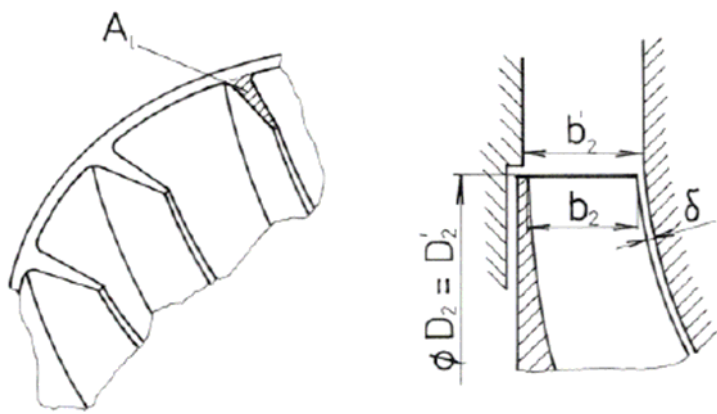
$$p_2 = 230\,372,78 \text{ Pa}$$

26. Špecifická hmotnosť vzduchu na výstupe z obežného kola odstredivého kompresora

$$\rho_2 = \frac{p_2}{R \cdot T_2} [kg \cdot m^{-3}]$$

$$\rho_2 = \frac{230372,78}{287,1 \cdot 384,62}$$

$$\rho_2 = 2,09 [kg \cdot m^{-3}]$$



Obr. 11 Plocha výstupe z obežného kola odstredivého kompresora LTKM zastávaná lopatkami

27. Stanovenie šírky obežného kola na výstupe

$$b_2 = \frac{Q_v}{c_{2r} \cdot \rho_2 \cdot \pi \cdot D_2 \cdot \tau_1} [m]$$

$$b_2 = \frac{12}{123,80 \cdot 2,09 \cdot \pi \cdot 0,545 \cdot 0,97}$$

$$b_2 = 279,25 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

$$\tau_1 = 1 - \frac{z_k \cdot t}{\pi \cdot D_2} [1]$$

$$\tau_1 = 1 - \frac{28 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot 0,545}$$

$$\tau_1 = 0,97$$

Doporučenie:

Voliteľ pre $D_2 < 200$ mm: $t = 1,2$ až $1,5$ mm;

Voliteľ pre $D_2 < 250$ mm: $t = 1,8$ až $2,0$ mm;

Voliteľ pre $D_2 > 250$ mm: $t = 2$ mm.

Záverečné zhodnotenie šírky b_2 .

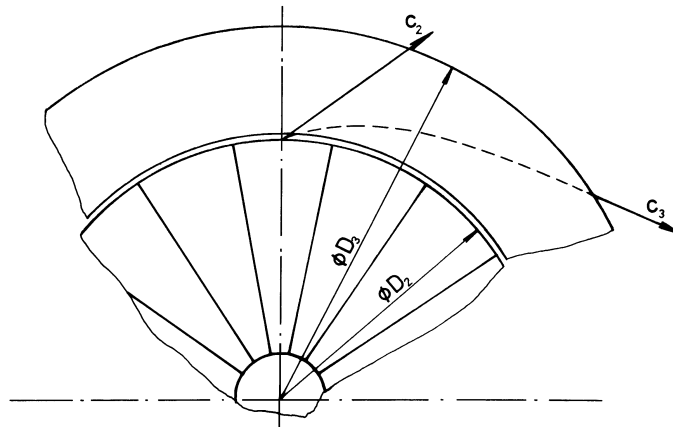
ZÁVER K VÝPOČTU OBEŽNÉHO KOLESA

Uvedený výpočet obežného kola odstredivého kompresora je približný. Uvažujú sa len stredné hodnoty rýchlostí a jednotlivých stavových veličín v jednotlivých rezoch, aj keď sú v skutočnosti značne premenlivé. Nie je kontrolovaná voľba súčiniteľa α pri stratách W_3 .

Po návrhu hlavných rozmerov obežného kola by nasledovalo profilovanie lopatiek, určenie priebehu plôch v medzilopatkovom kanále, prípadne detailný výpočet priebehu parametrov a rýchlostí v obežnom kolese. Tieto výpočty sú značne náročné a nie sú predmetom tohto výpočtového cvičenia.

II. VÝPOČET DIFÚZOROV

1. VÝPOČET BEZLOPATKOVÉHO DIFÚZORA Odstredivého KOMPRESORA



Obr. 12 Principiálna schéma bezlopatkového difúzora odstredivého kompresora

Predpoklad:

- nedochádza k odvodu tepla do atmosféry;
- celkové teploty $T_{2c} = T_{3c} = T_{4c} = \text{konšt.}$

28. Určenie vstupnej rýchlosti do bezlopatkového difúzora

Doporučenie:

Je vhodné zväčšiť šírku bezlopatkového difúzora (BLD) vzhľadom ku koncovej šírke obežného kolesa o 0,6 až 0,8 mm.

$$b_2' = b_2 + (0,6 \text{ až } 0,8) \text{ [mm]}$$

$$b_2' = 27,90 + 0,7$$

$$\mathbf{b_2' = 28,60 \text{ mm}}$$

Predpoklad:

$$c_{2u}' = c_{2u} \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$$

$$c_{2r}' = c_{2r} \cdot \tau_1 \cdot \frac{b_2}{b_2'} \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$$

$$c_{2r}' = 123,80 \cdot 0,97 \cdot \frac{27,9 \cdot 10^{-3}}{28 \cdot 10^{-3}}$$

$$\mathbf{c_{2r}' = 117,15 \text{ m. s}^{-1}}$$

29. Stanovenie stredného uhlu na vstupe do bezlopatkového difúzora

$$\mathbf{tg \alpha_2' = \frac{c_{2r}'}{c_{2u}'} \Rightarrow \alpha_2' [^\circ]}$$

$$\operatorname{tg} \alpha'_2 = \frac{117,15}{402,34} \Rightarrow \alpha'_2 = 16,23^\circ$$

30. Voľba dĺžky bezlopatkového difúzora

$$\frac{D_3}{D_2} = 1,05 \div 1,15$$

$$D_3 = 0,545 \cdot 1,1$$

$$\mathbf{D_3 = 0,6 \text{ m}}$$

31. Výpočet stredného uhla na výstupe z bezlopatkového difúzora

Predpoklad:

$$b_{4-} = b_3 = b_2'$$

$$\operatorname{tg} \alpha_3 = \operatorname{tg} \alpha'_2 + \frac{\xi_{ir}}{b_3} (r_3 - r_2) \Rightarrow \alpha_3 [^\circ]$$

$$\operatorname{tg} \alpha_3 = \operatorname{tg} 16,23 + \frac{0,88 \cdot 10^{-2}}{28,6 \cdot 10^{-3}} (0,3 - 27,25 \cdot 10^{-2}) \Rightarrow \alpha_3 = 16,67^\circ$$

32. Statická teplota vzduchu na výstupe z bezlopatkového difúzora

$$T_3 = \frac{T_{3c}}{1 + \frac{\kappa - 1}{2} \cdot M_3^2} [K]$$

$$T_3 = \frac{472,78}{1 + \frac{1,4 - 1}{2} \cdot 0,88^2}$$

$$\mathbf{T_3 = 409,38 \text{ K}}$$

kde: $M_3 \leq 0,9$

33. Absolútna rýchlosť na výstupe z bezlopatkového difúzora

$$c_{3r} = c_{2r}' \cdot \frac{D_2'}{D_3} \cdot \frac{\rho_2}{\rho_3} [m \cdot s^{-1}]$$

$$c_{3r} = 117,14 \cdot \frac{0,545}{0,6} \cdot \frac{2,09}{2,26}$$

$$\mathbf{c_{3r} = 98,40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}$$

$$\frac{\rho_3}{\rho_2} = 1,08$$

$$c_3 = M_3 \sqrt{\kappa \cdot R \cdot T_3} [m \cdot s^{-1}]$$

$$\rho_3 = 1,08 \cdot 2,09$$

$$c_3 = 0,88 \sqrt{1,4 \cdot 287 \cdot 1,409,38}$$

$$\rho_3 = 2,26 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$\mathbf{c_3 = 356,97 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}$$

34. Trecia práca v bezlopatkovom difúzore

$$W_r = \frac{\xi_{str}}{4 \cdot b_3} \cdot \frac{(c_2' + c_3')^2}{\sin \alpha_{str}} \cdot (r_3 - r_2) [J \cdot kg^{-1}]$$

$$\alpha_{str} = \frac{\alpha_3 + \alpha_2'}{2} \Rightarrow \frac{16,67 + 16,23}{2} \Rightarrow 16,45^\circ$$

$$W_r = \frac{0,88 \cdot 10^{-2}}{4 \cdot 28,6 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{(420,96 + 356,97)^2}{\sin 16,45} \cdot (0,3 - 27,25 \cdot 10^{-2})$$

$$W_r = 4520,75 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

35. Polytropický exponent stlačenia v bezlopatkovom difúzore n_2

Predpoklad:

- stavové veličiny na vstupe do bezlopatkového difúzora sa nemenia,
- $p_2 = p_2'$,
- $\rho_2 = \rho_2'$,
- $T_2 = T_2'$,

$$\frac{n_2}{n_2 - 1} = \frac{\kappa}{\kappa - 1} - \frac{W_r}{R \cdot (T_3 - T_2)} [1]$$

$$\frac{n_2}{n_2 - 1} = \frac{1,4}{1,4 - 1} - \frac{4520,75}{287,1 \cdot (409,38 - 384,62)}$$

$$n_2 = 1,54$$

36. Špecifická hmotnosť na výstupe z bezlopatkového difúzora

$$\rho_3 = \rho_2 \cdot \left(\frac{T_3}{T_2} \right)^{\frac{1}{n_2 - 1}} [kg \cdot m^{-3}]$$

$$\rho_3 = 2,09 \cdot \left(\frac{409,38}{384,62} \right)^{\frac{1}{1,54 - 1}}$$

$$\rho_3 = 2,35 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

37. Statický tlak na výstupe z bezlopatkového difúzora

$$p_3 = p_2 \cdot \left(\frac{T_3}{T_2} \right)^{\frac{n_2}{n_2 - 1}} [Pa]$$

$$p_3 = 230372,78 \cdot \left(\frac{409,38}{384,62} \right)^{\frac{1,54}{1,54 - 1}}$$

$$p_3 = 275\,233,57 \text{ Pa}$$

38. Kontrola veľkosti Machového čísla na výstupe z bezlopatkového difúzora

$$M_{c3} = \frac{c_3}{20,05 \cdot \sqrt{T_3}} [1]$$

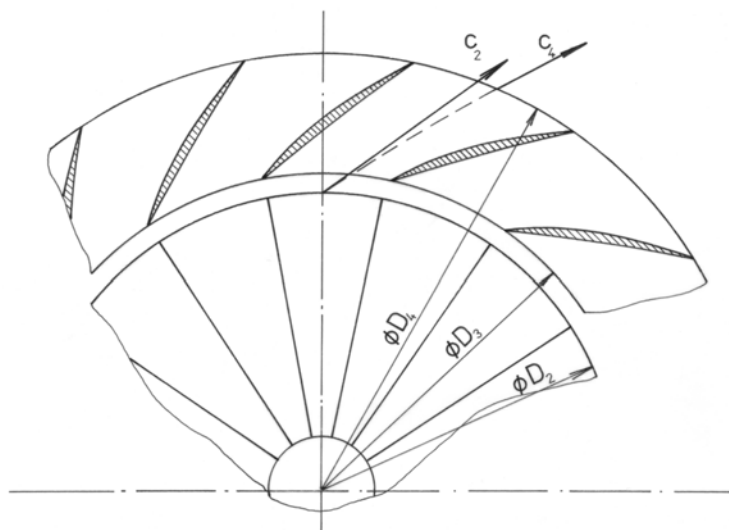
$$M_{c3} = \frac{356,97}{20,05 \cdot \sqrt{409,38}}$$

$$M_{c3} = 0,88$$

2. VÝPOČET LOPATKOVÉHO DIFÚZORA ODS TRE DIVÉHO KOMPRESORA



Obr. 13 Lopatkový difúzor odstredivého kompresora motora M-701



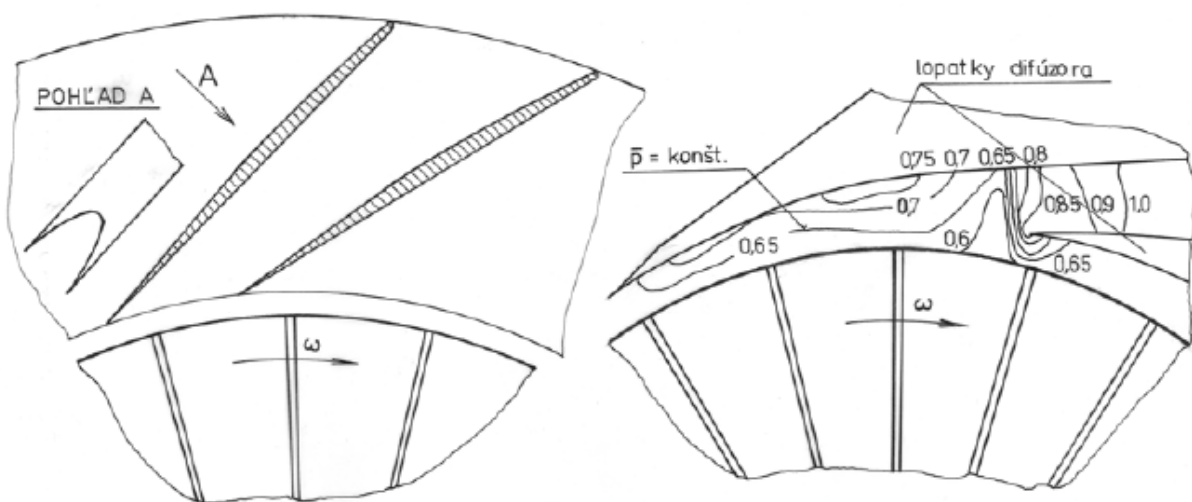
Obr. 14 Principiálna schéma lopatkového difúzora odstredivého kompresora

Predpoklad:

- stredná výstupná absolútna rýchlosť na výstupe z bezlopatkového difúzora c_3 vstupuje do lopatkového difúzora pod uhlom α_3 .
- uhol strednej krivky lopatky, od obvodového smeru, na priemere D_3 je: $\alpha_{3k} = \alpha_3 + i$, uhol nábehu i býva v rozsahu $\pm 1^\circ$,
- je uvažovaná konštantná šírka lopatkového difúzora $b_3 = b_4$.

39. Voľba výstupného uhlu prúdu vzduchu z lopatkového difúzora

$$\alpha_4 = \alpha_3 + (12 \text{ až } 20^\circ)$$



Obr. 15 Rozloženie tlakových polí na vstupe do lopatkového difúzora odstredivého kompresora LTKM

40. Stanovenie uhlu lopatky na výstupe z lopatkového difúzora

$$\alpha_{4k} = \alpha_4 + (2 \text{ až } 4^\circ)$$

$$\alpha_{4k} = 32,67 + 3$$

$$\alpha_{4k} = 35,67^\circ$$

41. Voľba pomeru priemerov D_4/D_3

$$\frac{D_4}{D_3} = 1,2 \Rightarrow D_4 = 1,2 \cdot 0,6$$

$$D_4 = 0,72 \text{ m}$$

Kontrola pomeru plôch A_4/A_3 :

Ich pomer by mal byť približne 2,5.

$$\frac{A_4}{A_3} = \frac{D_4}{D_3} \cdot \frac{\sin \alpha_{4k}}{\sin \alpha_{3k}} \Rightarrow \frac{0,72}{0,6} \cdot \frac{\sin 35,67}{\sin 15,67} \Rightarrow 2,59$$

42. Určenie dĺžky strednej krivky lopatky

$$l = \frac{r_4^2 - r_3^2}{\sqrt{r_4^2 + r_3^2 - 2 \cdot r_3 \cdot r_4 \cdot \cos(\alpha_{3k} + \alpha_{4k})}} [m]$$

$$l = \frac{0,3597^2 - 0,29975^2}{\sqrt{0,3597^2 + 0,29975^2 - 2 \cdot 0,29975 \cdot 0,3597 \cdot \cos(15,67 + 35,67)}}$$

$$l = 0,14m$$

43. Určenie uhla rozvretia kanála lopatkového difúzora

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{d_4 - d_3}{2 \cdot l} \Rightarrow \theta [^\circ]$$

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{0,04 - 0,025}{2 \cdot 0,14}$$

$$\theta = 6,13^\circ$$

$$d_4 = \sqrt{\frac{4 \cdot D_4 \cdot b_4 \cdot \sin \alpha_{4k}}{z_{ld}}} [m]$$

$$d_3 = \sqrt{\frac{4 \cdot D_3 \cdot b_3 \cdot \sin \alpha_{3k}}{z_{ld}}} [m]$$

$$d_4 = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,72 \cdot 0,0286 \cdot \sin 35,67}{30}}$$

$$d_3 = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,6 \cdot 0,0286 \cdot \sin 15,67}{30}}$$

$$d_4 = 0,04 m$$

$$d_3 = 0,025 m$$

Počet lopatiek difúzora z_{ld} som zvolil 30.

Pre stanovený uhol θ a Machove číslo M_{c3} sa z tabuľky č.1 určí súčiniteľ strát ξ_{LD} .

Tabuľka č. 1

θ	4°	6°	8°	10°
M_{c3}				
0,3	0,145	0,155	0,170	0,200
0,5	0,140	0,145	0,159	0,180
0,7	0,135	0,140	0,160	0,19
0,9	0,141	0,200	0,220	0,230
0,95		0,240		

44. Voľba výstupnej rýchlosti z lopatkového difúzora odstredivého kompresora

Doporučenie:

Doporučuje sa voliť výstupnú absolútnu rýchlosť vzduchu z empirického vzťahu:

$$\frac{c_4}{c_3} = 0,35$$

$$c_4 = 0,35 \cdot 356,97$$

$$c_4 = 124,94 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

45. Výpočet statickej teploty vzduchu na výstupe z lopatkového difúzora odstredivého kompresora

$$T_4 = T_{2c} - \frac{c_4^2}{2 \cdot c_p} [\text{K}]$$

$$T_4 = 472,78 - \frac{124,94^2}{2 \cdot 1005}$$

$$T_4 = 465,01 \text{ K}$$

46. Stanovenie trecej práce v lopatkovom difúzore odstredivého kompresora

$$W_{r,ld} = \xi_{ld} \cdot \frac{c_3^2 + c_4^2}{2} [\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

$$W_{r,ld} = 0,16 \cdot \frac{356,97^2 + 124,94^2}{2}$$

$$W_{r,ld} = 11\,443 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

47. Určenie polytropického exponentu stlačenia v lopatkového difúzora odstredivého kompresora

$$\frac{n_3}{n_3 - 1} = \frac{\kappa}{\kappa - 1} - \frac{W_{r,ld}}{R \cdot (T_4 - T_3)} [1]$$

$$\frac{n_3}{n_3 - 1} = \frac{1,4}{1,4 - 1} - \frac{11443}{287,1 \cdot (465,01 - 409,38)}$$

$$n_3 = 1,56$$

48. Stanovenie špecifickej hmotnosti vzduchu na výstupe z lopatkového difúzora odstredivého kompresora

$$\rho_4 = \rho_3 \cdot \left(\frac{T_4}{T_3} \right)^{\frac{1}{n_3 - 1}} [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$$

$$\rho_4 = 2,35 \cdot \left(\frac{465,01}{409,38} \right)^{\frac{1}{1,56 - 1}}$$

$$\rho_4 = 2,95 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

49. Statický tlak na výstupe z lopatkového difúzora

$$p_4 = p_3 \cdot \left(\frac{T_4}{T_3} \right)^{\frac{n_3}{n_3 - 1}} [\text{Pa}]$$

$$p_4 = 275233,57 \cdot \left(\frac{465,01}{409,38} \right)^{\frac{1,56}{1,56-1}}$$

$$p_4 = 392\,510,04 \text{ Pa}$$

50. Kontrola voľby výstupnej absolútnej rýchlosti c_4 na výstupe z lopatkového difúzora odstredivého kompresora

$$c_4 = \frac{Q_v}{\rho_4 \cdot \sin \alpha_4 \cdot \pi \cdot D_4 \cdot b_4 \cdot \tau_2} \left[m \cdot s^{-1} \right]$$

$$c_4 = \frac{12}{2,95 \cdot \sin 32,67 \cdot \pi \cdot 0,72 \cdot 0,0286 \cdot 0,96}$$

$$c_4 = 121,34 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\tau_2 = 1 - \frac{z_{ld} \cdot t}{\pi \cdot D_4} [1]$$

$$\tau_2 = 1 - \frac{30 \cdot 0,003}{\pi \cdot 0,72}$$

$$\tau_2 = 0,96$$

Záver k difúzorom

Podobne ako v obežnom kolese je aj bezlopatkový difúzor a lopatkový difúzor počítané veľmi približne s uvažovaním istých stredných rýchlostí a parametrov prúdu vzduchu. Uvažovaná konštantná šírka obidvoch častí difúzora je konštantná šírka bezlopatkového difúzora a lopatkového difúzora sa v praxi používa najčastejšie. Lopatky lopatkového difúzora, ktorých tvar je vo výpočte minimálne rešpektovaný, môžu mať rôzny tvar. V praxi je veľmi dôležité dôkladná kontrola difúzornosti medzi lopatkového kanálu.

III. VÝSTUPNÁ SÚSTAVA

VÝPOČET VÝSTUPNEJ SÚSTAVY

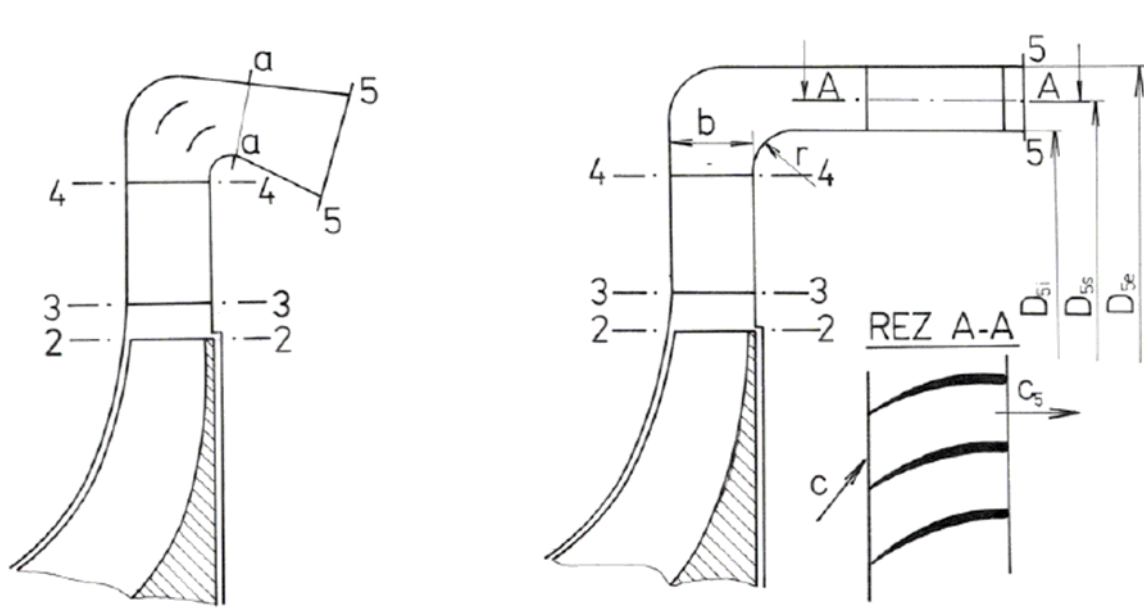


Obr. 16 Výstupná sústava radiálneho kompresora motora M-701

Predpoklad:

Výstupná sústava odstredivého (radiálneho) kompresora LTKM bude riešená pre dva typy výstupných sústav:

- a) kolenovú výstupnú sústavu,
- b) prstencovú výstupnú sústavu.



Obr. 17 Prstencová výstupná sústava odstredivého kompresora LTKM

b) Prstencová výstupná sústava

Prstencová výstupná sústava sa najčastejšie používa u jednorúrovňových LTKM, ktoré majú za

odstredivým (radiálnym) kompresorom umiestnenú prstencovú, zmiešanú alebo združenú spaľovaciu komoru. Keďže výstupná rýchlosť vzduchu z lopatkového difúzora má radiálnu aj obvodovú zložku (c_{4r} , c_{4u}), potom po ohnutí prúdu vo výstupnej sústave stále zostáva ešte určitá zložka rýchlosti v obvodovom smere, pretože $c_{u.r} = c_{4u}.r_4$. Väčšina spaľovacích komôr vyžaduje vstup vzduchu v osovom smere, a preto je potrebné vložiť do koncovej časti výstupnej sústavy usmerňovacie lopatky, aby $c_{5u} = 0$.

51. Voľba stredného priemeru na výstupe D_5 :

$$D_5 \approx D_4 + 2.b_4 [m]$$

$$D_5 \approx 0,72 + 2.0,0286$$

$$D_5 = 0,78 \text{ m}$$

52. Stanovenie obvodovej zložky absolútnej rýchlosti c_{5u} :

Predpoklad:

Predpokladá sa rovnosť momentov hybností prúdu vzduchu vzhľadom k ose otáčania pri prechode z priemeru D_4 na D_5 .

$$c_{5u} = c_{4u} \cdot \frac{D_4}{D_5} [m.s^{-1}]$$

$$c_{5u} = 67,44 \cdot \frac{0,72}{0,78}$$

$$c_{5u} = 62,25 \text{ m. s}^{-1}$$

$$c_{4u} = c_4 \cdot \sin \alpha_4 [m.s^{-1}]$$

$$c_{4u} = 124,94 \cdot \sin 32,67$$

$$c_{4u} = 67,44 \text{ m.s}^{-1}$$

53. Voľba výstupnej rýchlosti c_5

Výstupná rýchlosť c_5 sa volí v rozsahu $c_5 = 100$ až 120 m.s^{-1} .

$$c_5 = 120 \text{ m.s}^{-1}$$

54. Stanovenie stavových parametrov na výstupe z odstredivého kompresora

$$T_5 = T_{2c} - \frac{c_5^2}{2.c_p} [K]$$

$$T_5 = 472,78 - \frac{120^2}{2.1005}$$

$$T_5 = 465,62 \text{ K}$$

$$\rho_5 = \rho_4 \cdot \left(\frac{T_5}{T_4} \right)^{\frac{1}{n_4-1}} [kg.m^{-3}]$$

$$\rho_5 = 2,95 \cdot \left(\frac{465,62}{465,01} \right)^{\frac{1}{1,7-1}}$$

$$\rho_5 = 2,96 \text{ m.s}^{-1}$$

$$p_5 = p_4 \cdot \left(\frac{T_5}{T_4} \right)^{\frac{n_4}{n_4-1}} [\text{Pa}]$$

$$p_5 = 392510,04 \cdot \left(\frac{465,62}{465,01} \right)^{\frac{1,7}{1,7-1}}$$

$$p_5 = 393761,67 \text{ Pa}$$

55. Určenie prietokovej plochy v reze „5 – 5“

$$A_5 = \frac{Q_v}{\rho_5 \cdot c_{5a}} [\text{m}^2]$$

$$A_5 = \frac{12}{2,96 \cdot 102,6}$$

$$A_5 = 0,038 \text{ m}^2$$

$$c_{5a} = \sqrt{c_5^2 - c_{5u}^2} [\text{m.s}^{-1}]$$

$$c_{5a} = \sqrt{120^2 - 62,25^2}$$

$$c_{5a} = 102,6 \text{ m.s}^{-1}$$

56. Určenie rozmerov výstupnej sústavy

$$D_{5i} = D_5 - \frac{A_5}{\pi \cdot D_5} [m]$$

$$D_{5i} = 0,78 - \frac{0,038}{\pi \cdot 0,78}$$

$$D_{5i} = 0,76 \text{ m}$$

$$D_{5e} = 2 \cdot D_5 - D_{5i} [m]$$

$$D_{5e} = 2 \cdot 0,78 - 0,76$$

$$D_{5e} = 0,8 \text{ m}$$

57. Určenie celkového tlaku na výstupe z odstredivého kompresora

$$p_{5c} = p_5 \cdot \left(\frac{T_{2c}}{T_5} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} [\text{Pa}]$$

$$p_{5c} = 393761,67 \left(\frac{472,78}{465,62} \right)^{\frac{1,4}{1,4-1}}$$

$$p_{5c} = 415\,364,7 \text{ Pa}$$

58. Kontrola stupňa stlačenia odstredivého kompresora

$$\pi_{Kc} = \frac{p_{5c}}{p_{1c}} [1]$$

$$\pi_{Kc} = \frac{415364,7}{99274}$$

$$\pi_{Kc} = 4,18$$

59. Kontrola celkovej účinnosti odstredivého kompresora

$$\eta_{Kc} = \frac{\pi_{Kc}^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1}{\frac{T_{2c}}{T_{1c}} - 1} [1]$$

$$\eta_{Kc} = \frac{4,18^{\frac{1,4-1}{1,4}} - 1}{\frac{288}{288} - 1}$$

$$\eta_{Kc} = 0,79$$

Záver:

Vypočítané hodnoty sú pomerne presné, keďže medzi vypočítanými a zadanými hodnotami celkového stlačenia a celkovej účinnosti sú len malé odchýlky. S veľkou pravdepodobnosťou tieto odchýlky boli zapríčinené zaokruhľovaním výsledkov.