



FAKULTA STROJNÍ
ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY
V PLZNI

KATEDRA ENERGETICKÝCH
STROJŮ A ZAŘÍZENÍ

PLYNOVÉ TURBÍNY A TURBOKOMPRESORY

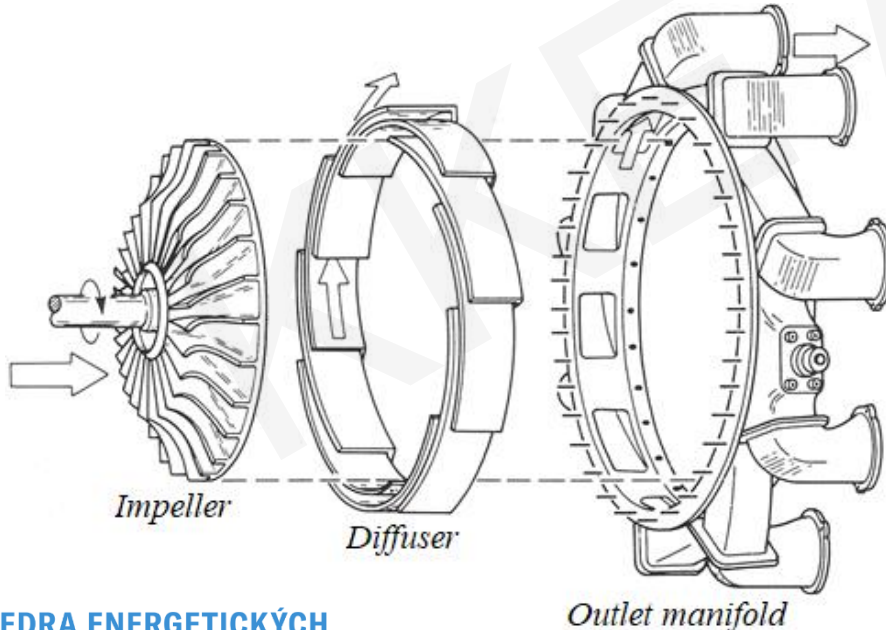
Ing. Marek Klimko, Ph.D.

Datum: 21. 10. 2021

- Radiální (odstředivé) kompresory
 - Základní popis jednotlivých částí RK
 - „Slip factor“
 - Termodynamická analýza RK
 - Řešený příklad

Radiální kompresory

- V kompresoru obecně dochází k proměně kinetické energie na tlakovou
- Pracovní médium vstupuje do OK většinou axiálně → v OK změni směr na radiální
- Velká obvodová rychlosti OK → odstředivá síla → částečné stlačení již v OK
- V difuzoru RK dochází ke snížení rychlosti a finálnímu stlačení pracovní látky

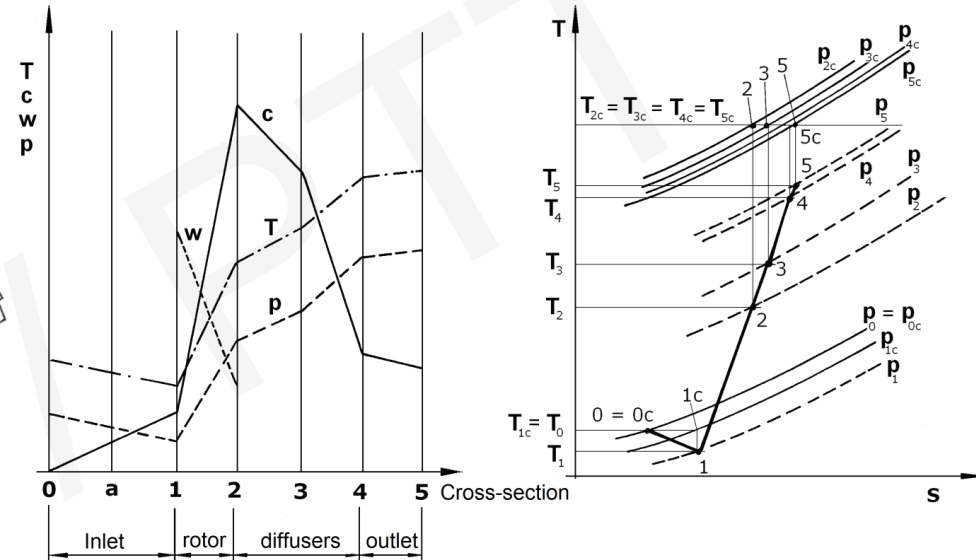
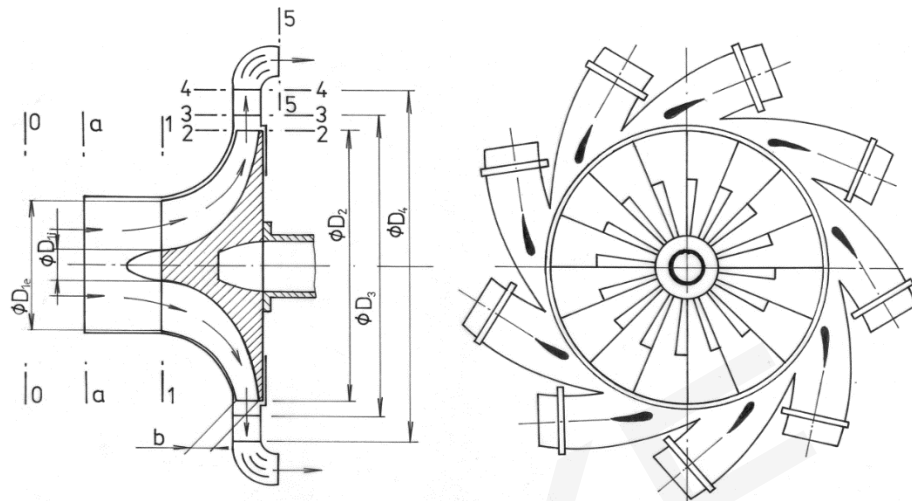


Radiální kompresory

- **Základní výkonové parametry RK:**
 - Účinnost, celkový stupeň stlačení, hmotnostní průtok pracovní látky
- **Výhody / nevýhody použití RK:**
 - Vysoký stupeň stlačení na jednom stupni
 - Stabilní provoz v širokém rozsahu provozních režimů
 - Malá axiální délka
 - Omezený hmotnostní průtok pracovní látky

Radiální kompresory

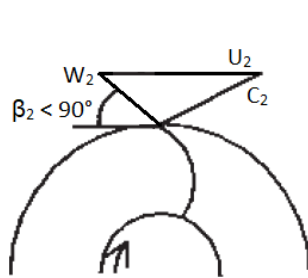
Princip činnosti a základní části RK:



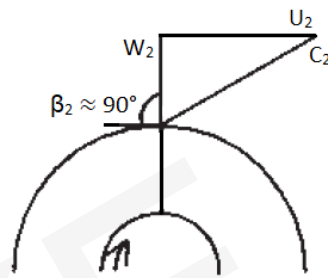
- Vstupní soustava (0-1)
- Oběžné kolo (1-2)
- Difuzory (2-4)
- Výstupní soustava (4-5)

Radiální kompresory (rozdělení)

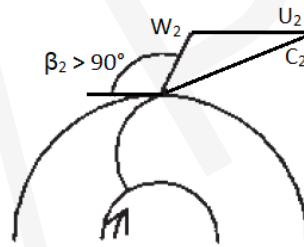
- Směr vstupu pracovní látky:
 - Axiální, diagonální, jednostranný, oboustranný
- Tvar lopatek OK:



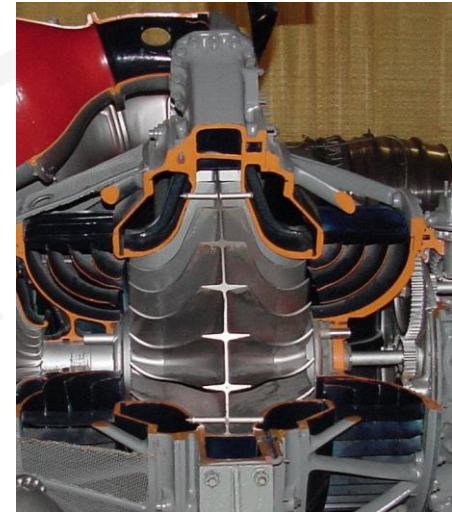
Dozadu zahnuté
(průmyslové k.)



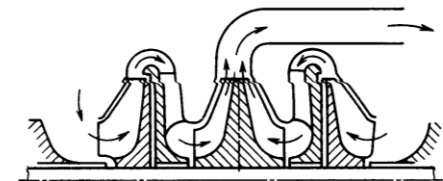
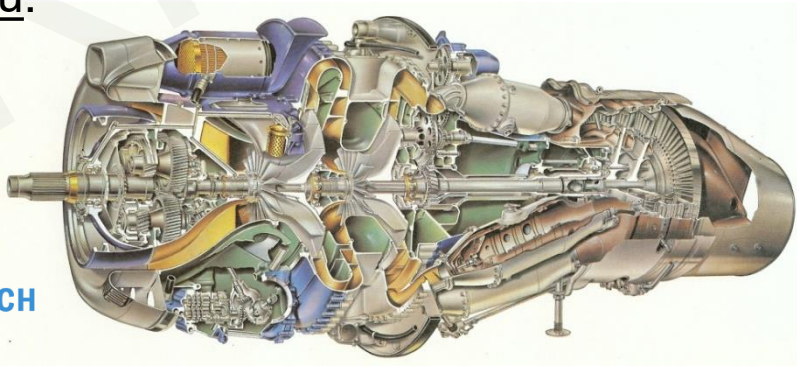
Přímé
(k. s vysokým π)



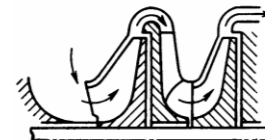
Dopředu zahnuté
(ventilátory)



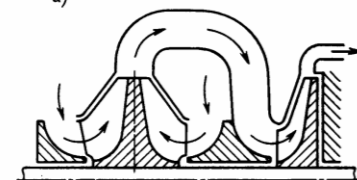
- Počet stupňů:



a)



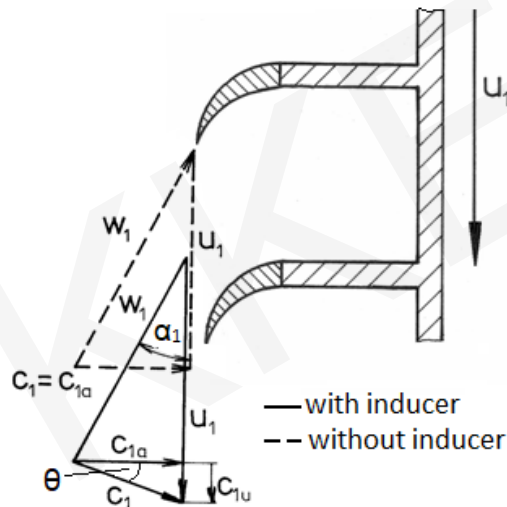
b)



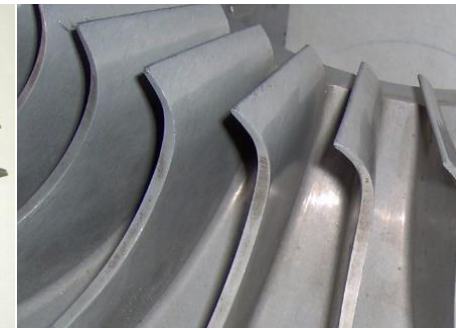
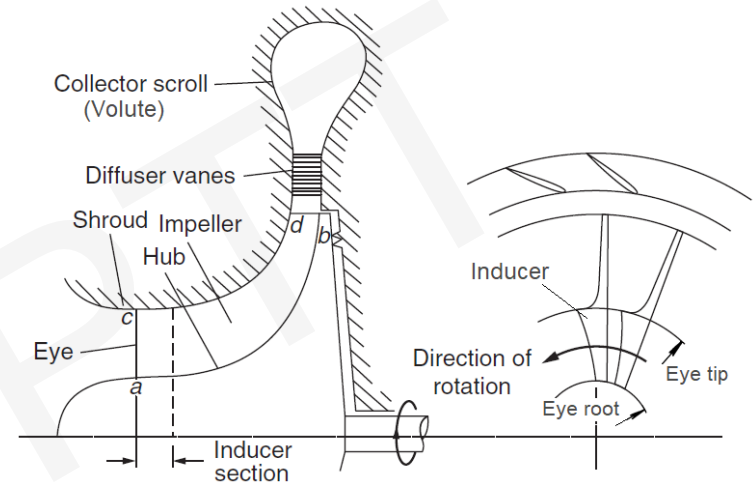
c)

Radiální kompresory

- Záběrník („rotující usměrňovací lopatky“):
 - Zajišťuje plynulý vstup vzduchu do OK
 - Zabraňuje vzniku rázových vln
 - Snižuje tlakový poměr (lze vyřešit vhodným prostorovým tvarováním)



Θ – „prewhirl angle“



Radiální kompresory

- „Slip factor“ (Skluz)

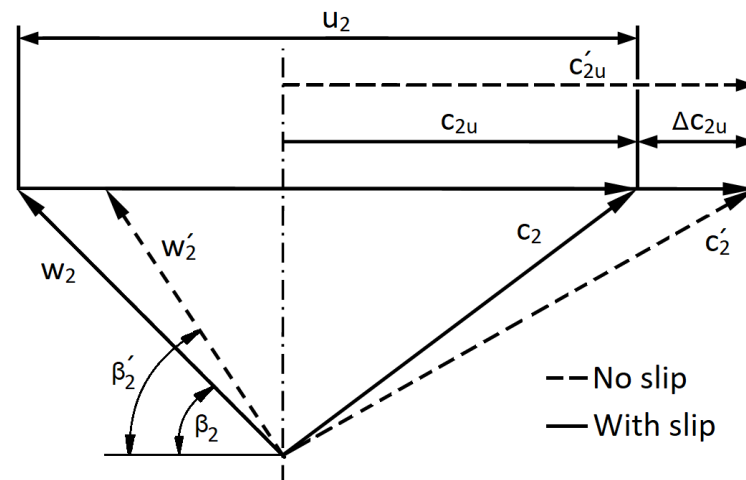
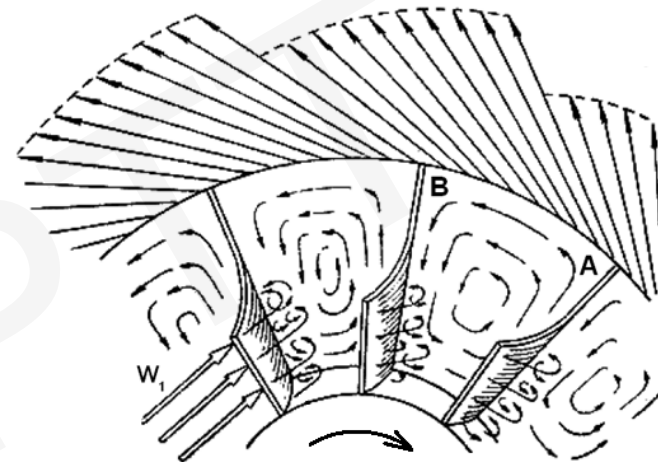
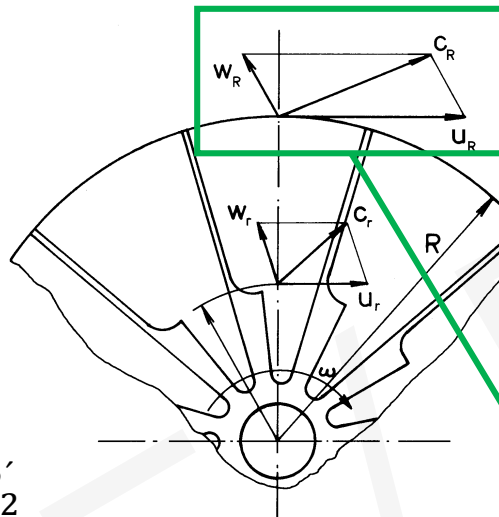
$$\mu = \frac{c_{2u}}{c'_{2u}} = 1 - \frac{\Delta c_{2u}}{c'_{2u}}$$



$$\mu^{Stodola} = 1 - \frac{\pi}{z} \cdot \frac{\sin \beta'_2}{1 - \epsilon \cdot \cot \beta'_2}$$

$$\mu^{Stanitz} = 1 - \frac{0,63\pi}{z \cdot (1 - \epsilon \cot \beta'_2)}, \quad \epsilon = \frac{w'_2}{u_2}$$

$$\mu^{Balje} = \left(1 + \frac{2\pi}{z \cdot e^{\frac{2}{3}}} \right)^{-1}, \quad e = \frac{D_{OK}^{\check{s}}}{D_Z^{\check{s}}}$$



Radiální kompresory

- Termodynamická analýza

- Rotalpie** $\rightarrow I = h_c - \frac{u^2}{2} = h + \frac{w^2}{2} - \frac{u^2}{2}$

- „ I “ je podél proudnice konstantní

$$a^K = u_2 \cdot c_{2u} - u_1 \cdot c_{1u} \rightarrow \Delta h_c = \Delta(u \cdot c_u) \rightarrow I = h_c - u \cdot c_u$$

$$I = h + \frac{1}{2}(c_r^2 + c_u^2 + c_a^2 - 2u \cdot c_u) - 3D \text{ tvar} \quad \left| \text{PS: } \frac{u^2}{2} - \frac{u^2}{2} \right.$$

$$I = h + \frac{1}{2} \underbrace{(u^2 - 2u \cdot c_u + c_u^2)}_{\substack{(u-c_u)^2 \\ w_u}} + \frac{1}{2}(c_r^2 + c_a^2 - u^2)$$

$$I = h + \underbrace{\frac{1}{2}w_u^2 + \frac{1}{2}c_r^2 + \frac{1}{2}c_a^2}_{(w_r=c_r; w_a=c_a) \rightarrow w^2} - \frac{1}{2}u^2 \rightarrow I = h + \frac{1}{2}(w^2 - u^2)$$

$$I_1 = I_2 \rightarrow h_2 - h_1 = \frac{1}{2}(u_2^2 - u_1^2) + \frac{1}{2}(w_1^2 - w_2^2)$$

Radiální kompresory

- Difuzor
 - „Standardní“ účinnost difuzoru

$$\eta_D = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$

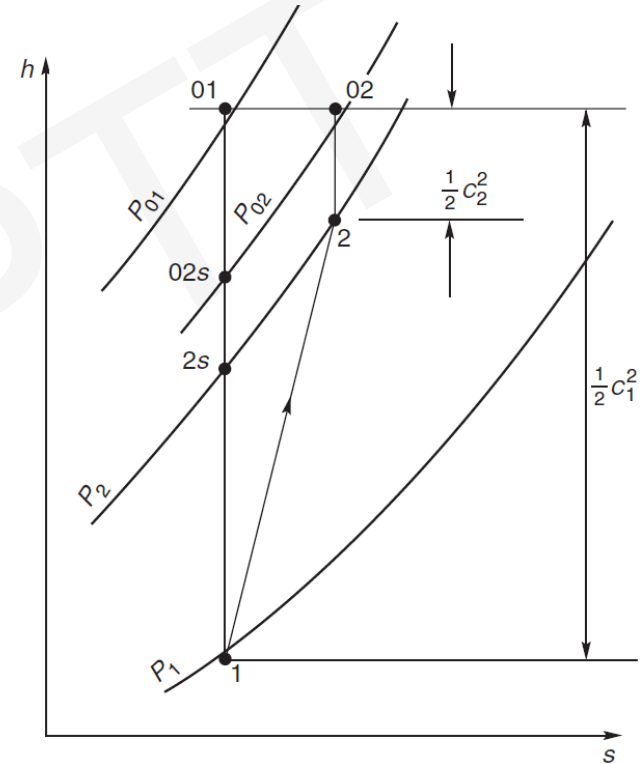
$$h_{2s} - h_1 = \frac{1}{2}(c_1^2 - c_{2s}^2); \quad h_2 - h_1 = \frac{1}{2}(c_1^2 - c_2^2)$$

$$\eta_D = \frac{c_1^2 - c_{2s}^2}{c_1^2 - c_2^2}$$

- Součinitel zachování celkové tlaku („Total pressure recovery factor“)

$$\eta_D = \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1} = \frac{\frac{T_{2s}}{T_1} - 1}{\frac{T_2}{T_1} - 1}; \quad \frac{T_{2s}}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

$$\Delta s = R \ln \left(\frac{p_{01}}{p_{02}} \right); \quad dh = c_p dT \rightarrow \Delta s = c_p \ln \left(\frac{T_2}{T_{2s}} \right) \rightarrow \frac{T_2}{T_{2s}} = \left(\frac{p_{01}}{p_{02}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$



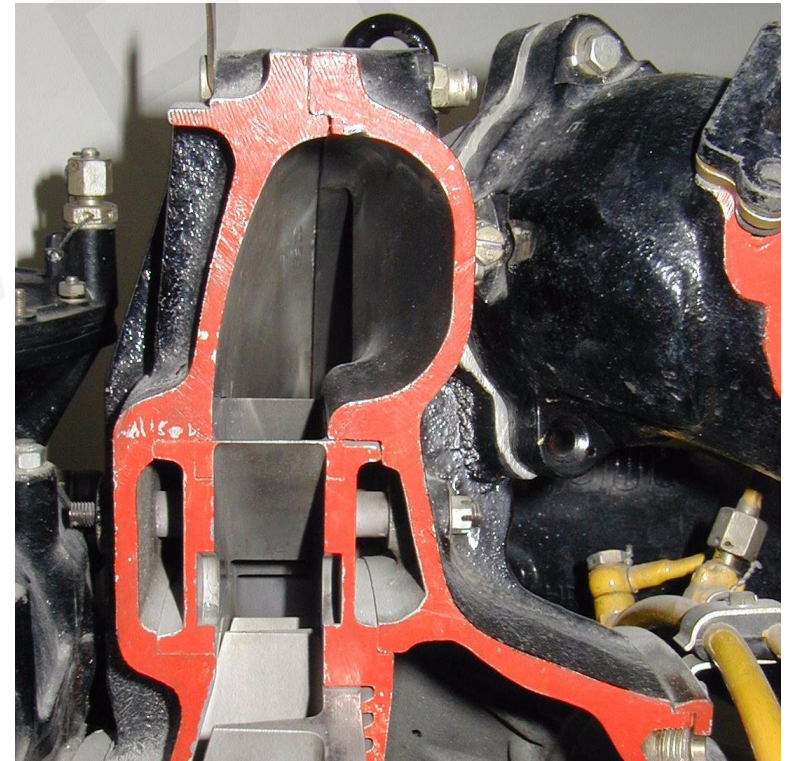
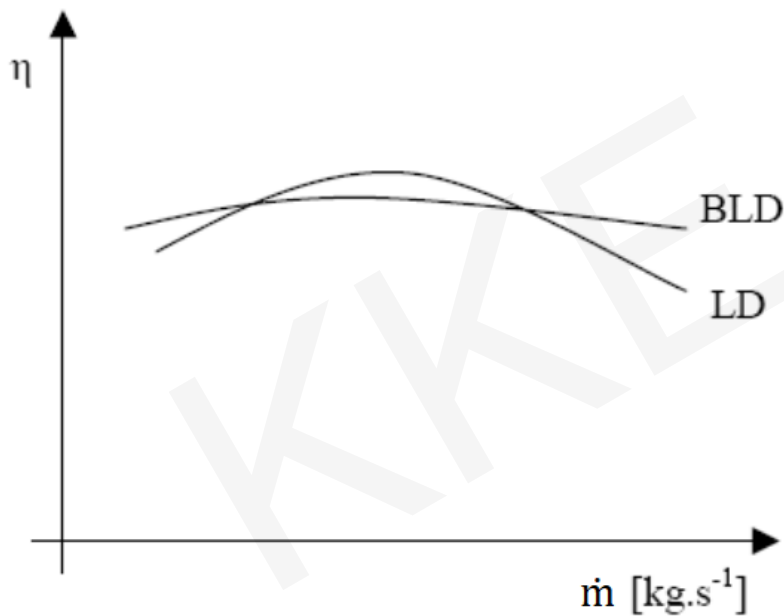
$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{T_2}{T_{2s}} \right) \left(\frac{T_{2s}}{T_1} \right) = \left[\left(\frac{p_{01}}{p_{02}} \right) \left(\frac{p_2}{p_1} \right) \right]^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

$$\eta_D = \frac{\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1}{\left[\left(\frac{p_{01}}{p_{02}} \right) \left(\frac{p_2}{p_1} \right) \right]^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1}$$

- **Bezlopatkový difuzor (BLD)** je tvořen pouze rozšiřujícím se kanálem za OK
 - Snížení absolutní rychlosti z OK (někdy nadzvuková)
 - Ustálení proudění za OK
 - Pohyb částic po logaritmické spirále
 - Dlouhá trajektorie částic pracovní látky → velké rozměry a hmotnost BLD

Radiální kompresory

- **Lopátkový difuzor (LD)** je doplněn o lopatky
 - Ustálení proudění je díky lopatkám efektivnější → zkrácení trajektorie →
→ menší rozměry a hmotnost



- **Výstupní soustava RK**

- Zajišťuje propojení mezi pláštěm RK a spalovací komorou
- Usměrnjuje a zpomaluje proud stlačeného vzduchu
- Většina spalovacích komor vyžaduje axiální směr proudu → nutné zařazení usměrňovacích lopatek v rámci výstupní soustavy RK



Radiální kompresory

- Zjednodušený návrhový výpočet RK (postup)
- ZADANÉ PARAMETRY
 - Průtokové množství vzduchu, celkový stupeň stlačení a celková účinnost RK

OK

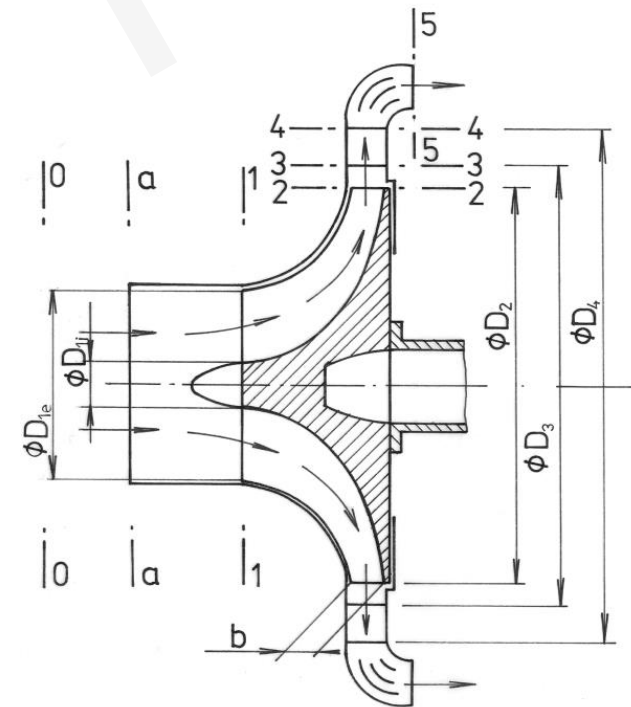
1. Definice parametrů standardní atmosféry (p_0, T_0)
2. Celkový tlak a teplota na vstupu do RK

$$p_{0c} = p_0 \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} Ma^2 \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}$$

$$T_{0c} = T_0 \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} Ma^2 \right) ; \quad Ma = \frac{c_0}{20,05 \sqrt{T_0}}$$

3. Celkový tlak a celková teplota na vstupu do OK

$$p_{1c} = \sigma_v p_{0c} ; \sigma_v = 0,97 \div 0,99 ; T_{1c} = T_{0c}$$



Radiální kompresory

4. Výpočet adiabatické práce kompresoru

$$W_{ad,K} = c_p T_{1c} \left(\pi_{Kc}^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} - 1 \right)$$

5. Výpočet obvodové rychlosti na výstupu z OK

- Vstup vzduchu do OK bez rozvíření $c_{1u} = 0$; $c_{1a} = c_1$
- Odhad součinitele skluzu
- Odhad součinitele třecí práce disku ($\alpha = 0,03 \div 0,05$)

$$u_2 = \sqrt{\frac{W_{ad,K}}{\eta_{Kc}(\mu + \alpha)}}$$

- V případě $c_{1u} \neq 0 \rightarrow u_2 = \sqrt{\frac{W_{ad,K}}{\eta_{Kc}(\mu + \alpha) + u_1 c_{1u}}}$

Radiální kompresory

6. Stanovení absolutní rychlosti na vstupu do OK

- Odhad $c_{2r}/u = 0,25 \div 0,35 \rightarrow c_{1a} = c_1 = c_{2r}$

7. Parametry na vstupu do OK na středním průměru

- $c_1 = c_{1s}$

$$T_1 = T_{1c} - \frac{c_{1s}^2}{2 c_p}, c_{1s} = c_1; \quad p_1 = p_{1c} \left(\frac{T_1}{T_{1c}} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}; \quad \rho_1 = \frac{p_1}{R T_1}$$

8. Vnější průměr na vstupu do OK

$$D_{1e} = \sqrt{\frac{4 Q_v}{\pi c_{1as} \rho_1 (1 - v^2)}}; \quad v = \frac{D_{1i}}{D_{1e}} = 0,3 \div 0,6$$

9. Střední průměr na vstupu do OK

$$D_{1s} = D_{1e} \sqrt{\frac{1 + v^2}{2}}$$

Radiální kompresory

10. Stanovení průměru na výstupu z OK

- Odhad $D_{1e}/D_2 = 0,45 \div 0,65 \rightarrow D_2$

11. Výpočet otáček

$$n = \frac{60u_2}{\pi D_2}$$

12. Výpočet vstupních obvodových složek rychlostí

$$u_{1i} = \frac{\pi D_{1i} n}{60} ; \quad u_{1s} = \frac{\pi D_{1s} n}{60} ; \quad u_{1e} = \frac{\pi D_{1e} n}{60}$$

13. Výpočet vstupních relativních a absolutních rychlostí

- $c_{1ai} = c_{1as} = c_{1ae} = c_{1a} = c_1$

$$w_{1i} = \sqrt{u_{1i}^2 + c_{1ai}^2} ; \quad w_{1s} = \sqrt{u_{1s}^2 + c_{1as}^2} ; \quad w_{1e} = \sqrt{u_{1e}^2 + c_{1ae}^2}$$

$$c_{1i} = \sqrt{w_{1i}^2 - u_{1i}^2} ; c_{1s} = \sqrt{w_{1s}^2 - u_{1s}^2} ; c_{1e} = \sqrt{w_{1e}^2 - u_{1e}^2}$$

14. Statická teplota na vstupu do OK

$$T_{1i} = T_{0c} - \frac{c_{1i}^2}{2 c_p} ; T_{1s} = T_{0c} - \frac{c_{1s}^2}{2 c_p} ; T_{1e} = T_{0c} - \frac{c_{1e}^2}{2 c_p}$$

15. Machovo číslo relativního proudu vzduchu na vstupu do OK

$$Ma_{w1i} = \frac{w_{1i}}{20.05 \sqrt{T_{1i}}} ; Ma_{w1s} = \frac{w_{1i}}{20.05 \sqrt{T_{1s}}} ; Ma_{w1e} = \frac{w_{1i}}{20.05 \sqrt{T_{1s}}}$$

16. Úhel náběhu proudu

$$\tan \alpha_{1i} = \frac{c_{1ai}}{u_{1i} - c_{1ui}} \rightarrow \alpha_{1i} ; \tan \alpha_{1s} = \frac{c_{1as}}{u_{1s} - c_{1us}} \rightarrow \alpha_{1s} ; \tan \alpha_{1e} = \frac{c_{1ae}}{u_{1e} - c_{1ue}} \rightarrow \alpha_{1e}$$

Radiální kompresory

17. Volba počtu lopatek

$$z_k = \frac{2 \pi \sin \frac{\alpha_{1s} + 90^\circ}{2}}{k \ln \frac{D_2}{D_{1e}}}$$

18. Kontrola volby součinitele skluzu

- Kontrola dle korelačních vztahů pro odhad součinitele skluzu (odchylka do max. 1%)

19. Celková, statická teplota, celková rychlost a Machovo číslo za OK

$$T_{2c} = T_{1c} + \frac{1}{c_p} [u_2^2 (\mu + \alpha) - u_{1s} c_{1us}] ; \quad c_2 = \sqrt{c_{2u}^2 + c_{2r}^2} ; \quad c_{2u} = \mu \cdot u_2$$

$$T_2 = T_{2c} - \frac{c_2^2}{2 c_p} ; \quad Ma_{c2} = \frac{c_2}{20.05 \sqrt{T_2}}$$

Radiální kompresory

20. Výpočet ztrát v OK (součet dílčích ztrát práce W_l)

- Ztráty při průtoku vzduchu záběrníkem

$$W_{l1} = \zeta_1 \frac{w_{1s}^2}{2}; \zeta_1 \approx 0,25$$

- Ztráty třením a vířením odtrženého proudu

$$W_{l2} = \zeta_2 \frac{c_{1a}^2}{2}; \zeta_2 \approx 0,13$$

- Ztráty tření disku OK

$$W_{l3} = \alpha \cdot u_2^2; \alpha \approx 0,04$$

21. Stanovení polytropického exponentu stlačení

- Předpoklad: není odváděné žádné teplo

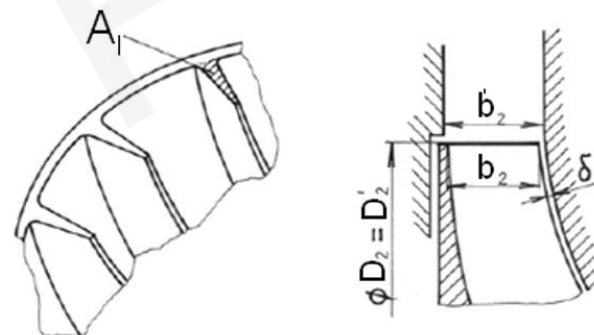
$$\frac{n_1}{n_1 - 1} = \frac{\kappa}{\kappa - 1} - \frac{W_l}{R(T_2 - T_1)}$$

22. Statický tlak a hustota na výstupu z OK

$$p_2 = p_1 \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{n_1}{n_1-1}} ; \rho_2 = \frac{p_2}{R T_2}$$

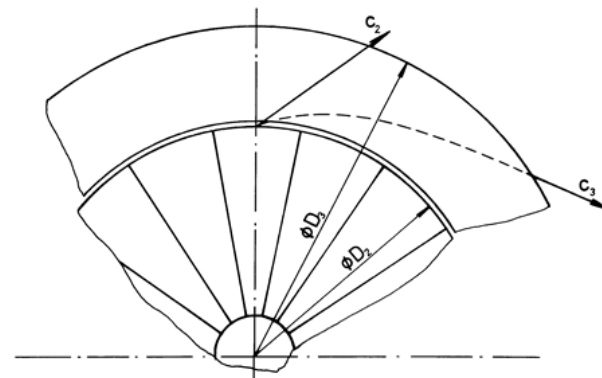
23. Odhad šířky OK

$$b_2 = \frac{\dot{m}}{c_{2r} \rho_2 \pi D_2 \tau_l} ; \tau_l = 1 - \frac{z_k t}{\pi D_2}$$



BLD

- Nedochází k odvodu tepla do okolí
- $T_{2c} = T_{3c} = T_{4c} = konst.$
- $c_{2u} = c'_{2u}$



Radiální kompresory

1. Šírka vstupního kanálu BLD

- Šírku BLD je vhodné zvýšit o $0,6 \div 0,8 \text{ mm}$ vzhledem ke koncové šířce OK

$$b'_2 = b_2 + (0,6 \div 0,8) \cdot 10^{-3}$$

2. Vstupní radiální složka absolutní rychlosti do BLD

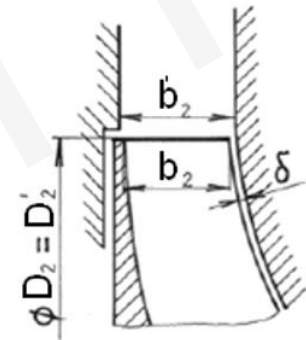
$$c'_{2r} = c_{2r} \tau_l \frac{b_2}{b'_2}$$

3. Střední úhel proudu na vstupu do BLD

$$\tan \alpha'_2 = \frac{c'_{2r}}{c'_{2u}} \rightarrow \alpha'_2$$

4. Odhad výstupního průměru BLD

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



Radiální kompresory

5. Střední výstupní úhel proudu z BLD

$$\tan \alpha_3 = \tan \alpha'_2 + \frac{\zeta_{tr}}{b_3} (r_3 - r_2) \rightarrow \alpha_3 ; \zeta_{tr} = (0,75 \div 1) \cdot 10^{-2}$$

6. Absolutní rychlost na výstupu z BLD

$$c_{3r} = c'_{2r} \frac{D'_2 \rho_2}{D_3 \rho_3} ; \frac{\rho_3}{\rho_2} = 1,08$$

$$c_3 = \frac{c_{3r}}{\sin \alpha_3}$$

7. Statická teplota vzduchu na výstupu z BLD

$$T_3 = T_{2c} - \frac{c_3^2}{2 c_p}$$

8. Třecí práce

$$W_{r,BLD} = \frac{\zeta_{tr}}{4 b_3} \frac{(c'_2 + c_3)^2}{\sin \alpha_{str}} (r_3 - r_2) ; \alpha_{str} = \frac{\alpha_3 + \alpha'_2}{2}$$

Radiální kompresory

9. Polytropický exponent stlačení v BLD

- Stavové veličiny na vstupu do BLD se nemění:

$$(p_2 = p'_2) \wedge (\rho_2 = \rho'_2) \wedge (T_2 = T'_2)$$

$$\frac{n_2}{n_2 - 1} = \frac{\kappa}{\kappa - 1} - \frac{W_{r,BLD}}{R(T_3 - T_2)}$$

10. Hustota a statický tlak na výstupu z BLD

$$\rho_3 = \rho_2 \left(\frac{T_3}{T_2} \right)^{\frac{1}{n_2 - 1}} ; \quad p_3 = p_2 \left(\frac{T_3}{T_2} \right)^{\frac{n_2}{n_2 - 1}}$$

11. Machovo číslo na výstupu z BLD

$$Ma_{c3} = \frac{c_3}{20.05 \sqrt{T_3}}$$

Radiální kompresory

LD

1. Výstupní úhel proudů z LD

$$\alpha_4 = \alpha_3 + (12 \div 20^\circ)$$

2. Výstupní úhel lopatky

$$\alpha_{4K} = \alpha_4 + (2 \div 4^\circ)$$

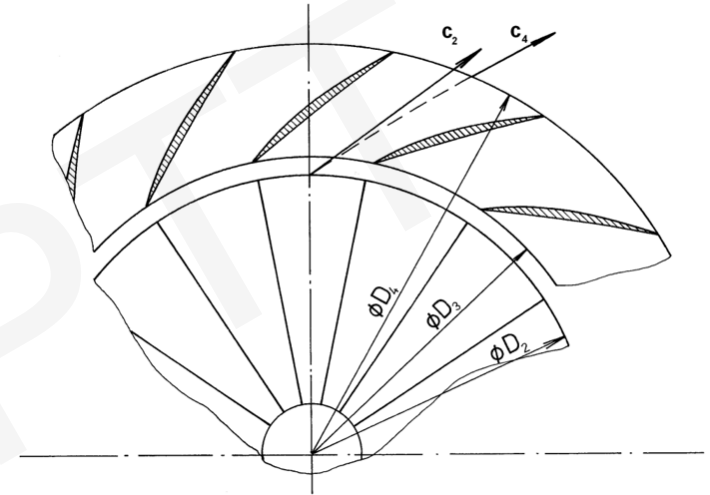
3. Volba poměru průměrů D_4/D_3

- Volí se v rozsahu $D_4/D_3 = 1,25 \div 1,35$
- Poměr ploch $A_4/A_3 \sim 2,5$

$$\frac{A_4}{A_3} \cong \frac{D_4 \sin \alpha_{4K}}{D_3 \sin \alpha_{3K}} \rightarrow D_4$$

4. Délka střední křivky lopatky

$$l = \frac{r_4^2 - r_3^2}{\sqrt{r_4^2 + r_3^2 - 2r_3r_4 \cos(\alpha_{3K} + \alpha_{4K})}}$$



5. Volba výstupní rychlosti z LD

$$\frac{c_4}{c_3} = 0,24 \div 0,35 \rightarrow c_4$$

6. Výstupní statická teplota

$$T_4 = T_{2c} - \frac{c_4^2}{2 c_p}$$

7. Třecí práce v LD

$$W_{r,LD} = \zeta_{LD} \frac{c_3^2 + c_4^2}{2} ; \zeta_{VD} = f(\theta, Ma_{c3})$$

$$2\theta = 2 \tan^{-1} \left[\frac{(A_r - 1) \cdot s_1}{2l} \right] ; A_r = \frac{s_2}{s_1} \rightarrow \theta \text{ (úhel rozevření kanálu)}$$

$$s_1 = \sqrt{\frac{4D_3 b_3 \sin \alpha_{3K}}{Z_{LD}}} ; s_2 = \sqrt{\frac{4D_4 b_4 \sin \alpha_{4K}}{Z_{LD}}}$$

Radiální kompresory

- z_{LD} - počet lopatek LD (neměl by být dělitelný počtem lopatek OK)
- Hodnota ζ_{LD} se pro stanovený úhel rozevření kanálu a Machovo číslo určí:

θ	4°	6°	8°	10°
Ma_{c_3}				
0,3	0,145	0,155	0,17	0,2
0,5	0,14	0,145	0,159	0,18
0,7	0,135	0,14	0,16	0,19
0,9	0,141	0,2	0,22	0,23
0,95		0,24		

8. Polytropický exponent

$$\frac{n_3}{n_3 - 1} = \frac{\kappa}{\kappa - 1} - \frac{W_r}{R(T_4 - T_3)}$$

9. Hustota a statický tlak vzduchu na výstupu z LD

$$\rho_4 = \rho_3 \left(\frac{T_4}{T_3} \right)^{\frac{1}{n_3 - 1}} ; \quad p_4 = p_3 \left(\frac{T_4}{T_3} \right)^{\frac{n_3}{n_3 - 1}}$$

Radiální kompresory

1. Volba středního průměru na výstupu

$$D_5 \approx D_4 + 2 b_4$$

2. Obvodová složka absolutní výstupní rychlosti

$$c_{5u} = c_{4u} \frac{D_4}{D_5}; c_{4u} = c_4 \sin \alpha_4$$

3. Výstupní absolutní rychlost

- Volí se v rozsahu $100 \div 120 \text{ m s}^{-1}$

4. Hustota a statická teplota a tlak vzduchu

$$T_5 = T_{2c} - \frac{c_5^2}{2 c_p}; \rho_5 = \rho_4 \left(\frac{T_5}{T_4} \right)^{\frac{1}{n_4-1}}; p_5 = p_4 \left(\frac{T_5}{T_4} \right)^{\frac{n_4}{n_4-1}}$$

Radiální kompresory

5. Určení průtočné plochy v řezu „5-5“

$$A_5 = \frac{Q_v}{\rho_5 c_{5a}} ; c_{5a} = \sqrt{c_5^2 - c_{5u}^2}$$

6. Rozměry výstupní soustavy

$$D_{5i} = D_5 - \frac{A_5}{\pi D_5} ; D_{5e} = 2D_5 - D_{5i}$$

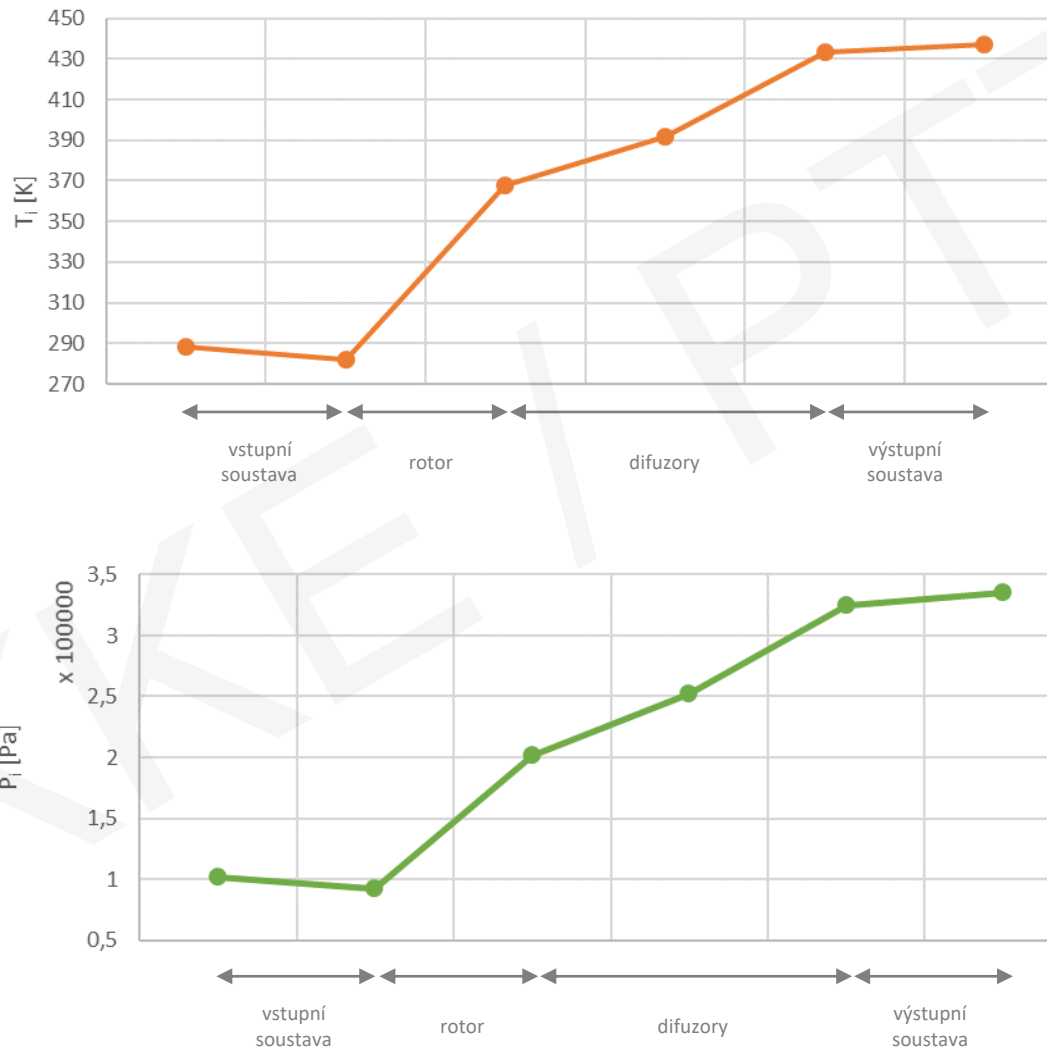
7. Celkový výstupní tlak

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

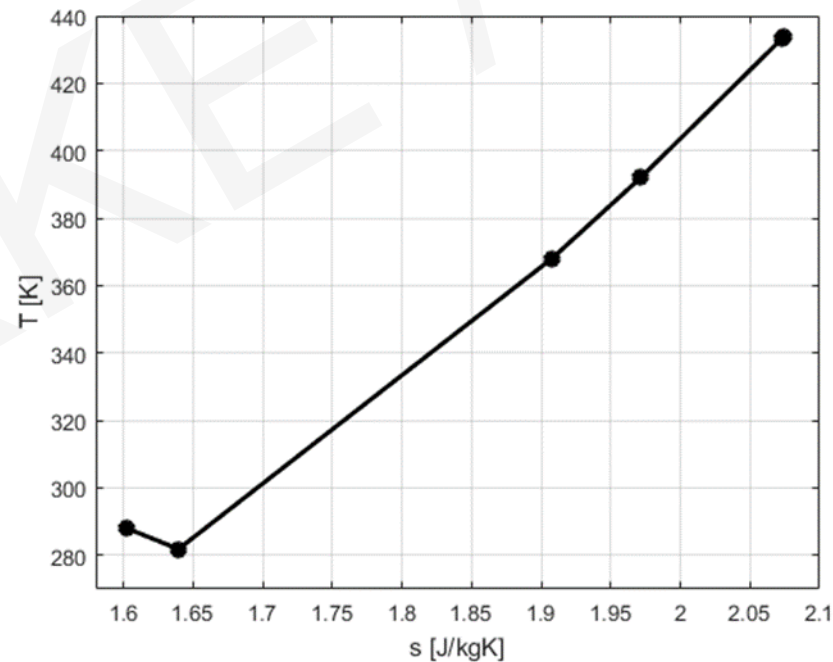
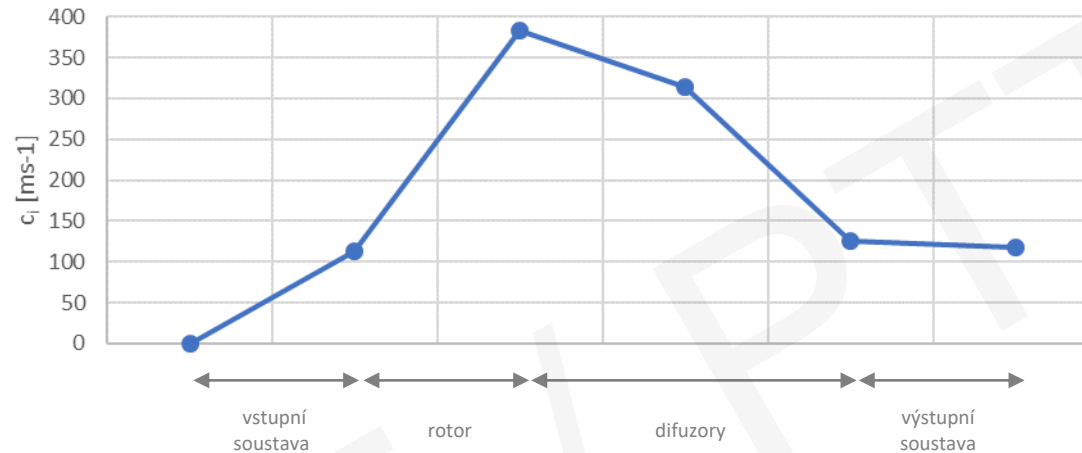
8. Celkový stupeň stlačení, celková účinnost a příkon RK

$$\pi_{Kc} = \frac{p_{5c}}{p_{1c}} ; \eta_{Kc} = \frac{\pi_{Kc}^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}{\frac{T_{2c}}{T_{1c}} - 1} ; P_K = \frac{\dot{m} W_{K,ad,c}}{\eta_{ad} \eta_m}$$

Radiální kompresory



Radiální kompresory



Řešený příklad - Cvičení č. 3

Vzduch o celkové teplotě 22°C vstupuje do oběžného kola (OK) radiálního kompresoru v axiálním směru. Hmotnostní průtok vzduchu kompresorem je 2 kg/s . OK tvoří 17 radiálních lopatek ($\beta'_2 = 0$) a otáčí se rychlostí 15000 ot/min . Celkový stupeň stlačení kompresoru je 4,2 a celková účinnost 83%. Hustota vzduchu na výstupu z OK je 2 kg/m^3 a axiální šířka OK před difuzorem je 11 mm . Vlastnosti pracovní látky odpovídají ideálnímu plynu. Pro odhad součinitele skluzu (μ) využijte korelaci dle Stanitze.

Vypočítejte:

- a) výstupní poloměr z OK (r_2),
- b) výstupní absolutní Machovo číslo na výstupu z OK (Ma_{c_2}).



FAKULTA STROJNÍ
ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY
V PLZNI

KATEDRA ENERGETICKÝCH
STROJŮ A ZAŘÍZENÍ

Děkuji za pozornost