SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA
Strojnícka fakulta
Katedra tepelnej techniky
Nám. slobody 17, 812 31 Bratislava

PODKLADY KU SKÚŠKE Z TERMODYNAMIKY

(rovnice, diagramy, tabuľky)

Spracovali : Doc. Ing. Ernest Kabát, CSc.
Ing. Dušan Jurčovič
Ing. Kvetoslava Schätzlová

STAVOVÁ ROVNICA IDEÁLNEHO PLYNU

$pv = rT$ $\qquad pV = mrT$ $\qquad r = \dfrac{R}{M}$ $\qquad m = n\,M$

$pV_M = RT$ $\qquad pV = nRT$

p - absolútny tlak [Pa]
r - špec. plynová konšt. [J/kg K]
V - objem [m^3]
R - univerzálna plynová konštanta [J/kmol K]
V_M - objem kilomolu [m^3/kmol]
v - špec. objem [m^3/kg]
T - absolútna teplota [K]
m - hmotnosť [kg]
n - látkové množstvo [kmol]
M - mólová hmotnosť látky [kg/kmol]

ZMES IDEÁLNYCH PLYNOV

$p = \sum p_i$ $\qquad V = \sum V_i$

$\sigma_i = \dfrac{m_i}{m}$ ... hmotnostná koncentrácia

$\omega_i = \dfrac{V_i}{V}$ ... objemová koncentrácia

$M = \sum \omega_i\, M_i$ ... zdanlivá mólová hmotnosť [kg/kmol] zmesi

$r = \sum \sigma_i\, r_i$ ... špec. plynová konštanta zmesi plynov

$\omega_i = \dfrac{V_i}{V} = \dfrac{n_i}{n} = \sigma_i \dfrac{M}{M_i}$ ... prepočet hmotnostných koncentrácií na objemové

p_i, p ... parciálny tlak zložky resp. tlak zmesi.

ŠPECIFICKÁ TEPELNÁ KAPACITA

$c = \dfrac{q}{\Delta T}$ [J/kg K]

c_p ... špec. tepelná kapacita pri p = const
c_v ... špec. tepelná kapacita pri v = const
$c_p - c_v = r$ ... Mayerova rovnica
$\dfrac{c_p}{c_v} = \kappa$ ... Poissonova konštanta

$c_v = \dfrac{r}{\kappa - 1}$ $\qquad c_p = r\dfrac{\kappa}{\kappa - 1}$

Pre ideálne plyny *dokonalé* sú to konštanty.

Pre ideálne plyny *nedokonalé* sú funkciami teploty, napríklad mólová tepelná kapacita pri p = konšt $\bar{c}_p = a + bT + dT^2 + eT^3$

Stredná hodnota pre väčšie Δt

$$\left(\bar{c}\right)_{T_1}^{T_2} = \frac{1}{\Delta T}\int_{T_1}^{T_2} c_p dT = a + \frac{b}{2}\left(T_1 + T_2\right) + d\,\frac{\left(T_1 + T_2\right)^2}{3} + \frac{e}{4}\left(T_1 + T_2\right)^3$$

kon. a, b, d, e .. sú v tabuľke

Špecifická tepelná kapacita $c_p = \frac{\bar{c}_p}{M}$ $\bar{c}_p$ - mólová tepelná kapacita [kJ/kmol K]

PRVÝ ZÁKON TERMODYNAMIKY

1. FORMULÁCIA pre zavreté systémy

$dq = du + dw = du + pdv$ akákoľvek látka

$dq = c_v dT + dw = c_v dT + pdv$ ideálny plyn

$dQ = dU + d\,W = m(dq)$

q - špecifické teplo [J/kg]
Q - teplo [J]
w - špec. objemová práca [J/kg]
W - objemová práca [J]
u - špec. vnútorné energie [J/kg]
U - vnútorná energia [J]

2. FORMULÁCIA pre otvorené ustálené systémy bez zmeny kinetickej a potenciálnej energie

$dq = dh + dw_t = dh - vdp$ akákoľvek látka

$dq = c_p dT + dw_t = c_p dT - vdp$ ideálny plyn

$dQ = dH + dW_t = m(dq)$

h - špec. entalpia [J/kg]
H - entalpia [J]
w_t - špec. technická práca [J/kg]
W_t - technická práca [J]

Otvorené systémy - ustálené so zmenou kinetickej a potenciálnej energie

$$dq = dh + d\left(\frac{c^2}{2}\right) + gdz + dw_t$$

- neustálené

$$dq = dh + dw_t + d\left(\frac{c^2}{2}\right) + gdz + d(U_\sigma)$$

VRATNÉ PROCESY

Izobarický

v/T = konšt ... rovnica zmeny
$dq = dh = c_p dT$ ... šp. teplo
$dw = pdv$ ... šp. objemová práca

Izochorický

p/T = konšt ... rovnica zmeny
$dq = du = c_v dT$ ... šp. teplo
$dw_t = -v\,dp$ ... šp. technická práca

Izotermický

pv = konšt ... rovnica zmeny
$dq = pdv = -vdp$ ... šp. teplo a práca

$$q_{1,2} = rT\ln\frac{v_2}{v_1} = -rT\ln\frac{p_2}{p_1} = w_{1,2} = w_{t\,1,2}$$

$Q_{1,2} = m\,q_{1,2}$ ... teplo [J]

Adiabatický

$dq = 0$ $\quad q = 0$

pv^{κ} = konšt $\quad Tv^{\kappa-1}$ = konšt $\quad Tp^{\frac{1-\kappa}{\kappa}}$ = konst

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\kappa} \qquad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\kappa-1} \qquad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

$dw = -du = -c_v dT$

$$w_{1,2} = c_v\left(T_1 - T_2\right) = \frac{r\,T_1}{\kappa-1}\left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) = \frac{r\,T_1}{\kappa-1}\left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right] \quad \text{[J/kg]}$$

$dw_t = -dh = -c_p dT = \kappa\,dw$

Polytropický

pv^n = konšt $\quad Tv^{n-1}$ = konšt $\quad Tp^{\frac{1-n}{n}}$ = konst

$$w_{1,2} = \frac{r\,T_1}{n-1}\left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) = \frac{r\,T_1}{n-1}\left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right]$$

$w_{t_{1,2}} = n\,w_{1,2}$

$$dq = c_n dT = c_v\,\frac{n-\kappa}{n-1}dT$$

$$\frac{q_{1,2}}{w_{1,2}} = \frac{n-\kappa}{1-\kappa}$$

DRUHÝ ZÁKON TERMODYNAMIKY

Tepelné motory

$$\eta_t = \frac{w_c}{q_p} = \frac{q_p - |q_o|}{q_p} = 1 - \frac{|q_o|}{q_p}$$ termická účinnosť

w_c - šp. práca obehu (cyklu) [J/kg]
q_p - teplo do obehu prevedené zo zdroja [J/kg]
q_o - teplo z obehu odvedené do okolia [J/kg]

CARNOTOV OBEH

$$\eta_t = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{q_p - |q_o|}{q_p} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

T_1 - teplota zdroja energie s veľkou tepelnou kapacitou
T_2 - teplota odpadu energie s veľkou tepelnou kapacitou

CHLADIACE STROJE A TEPELNÉ ČERPADLÁ

$$\varepsilon_{CH} = \frac{q_{CH}}{|w_c|} = \frac{q_{CH}}{|q_T| - q_{CH}}$$ chladiaci faktor

q_{CH} - chladením privedené teplo [J/kg] pri teplote T_{CH}
q_T - odvádzané teplo z obehu pri teplote T_T (špecifický tepelný výkon)
w_c - dodávaná práca na získanie chladiaceho efektu

$$\varepsilon_{TC} = \frac{|q_T|}{|w_c|}$$ vykurovací faktor, súčiniteľ znásobenia tepelného čerpadla

Carnotove obehy:

$$\varepsilon_{CH} = \frac{T_{CH}}{T_T - T_{CH}} \qquad \varepsilon_{TC} = \frac{T_T}{T_T - T_{CH}} \qquad \varepsilon_{TC} = \varepsilon_{CH} + 1$$

ENTRÓPIE A ROVNICE ZMIEN ENTRÓPIE

$$ds = \frac{dq}{T}$$ ... difer. šp. entrópia [J/kg K] (vratné procesy)

$$dS = \frac{dQ}{T}$$ ... diferenciálna entrópia [J/K]

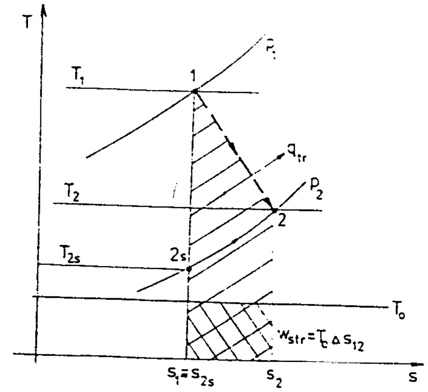
$$ds \rangle \frac{dq}{T}$$ ... diferenciálna šp. entrópia pri nevratných procesoch

$$ds = \frac{c_v dT}{T} + \frac{pdv}{T} = c_v \frac{dT}{T} + r\frac{dv}{v}$$

$$s_2 - s_1 = c_v \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + r \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)$$

$$ds = \frac{c_p dT}{T} - \frac{v dp}{T} = c_p \frac{dT}{T} - r\frac{dp}{p}$$

$$s_2 - s_1 = c_v \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) + r \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$$



Zmena entrópie pri nevratnej adiabatickej zmene z bodu 1 do 2

$$s_2 - s_1 = \Delta s_{1,2} = c_p \left[\ln\frac{T_2}{T_1} + \frac{\kappa - 1}{\kappa}\ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)\right]$$

Exergetická strata pri tomto procese

$e_{xstr} = w_{str} = T_o \Delta s_{1,2}$

Princíp vzrastu entrópie $\quad S_{gen} = \Delta S_{cel} = \Delta S_{int} + \Delta S_{ext} = \Delta S_{syst} + \Delta S_{ok} \geq 0$

ΔS_{cel} - celková zmena entrópie pri intrakcii systému s okolím

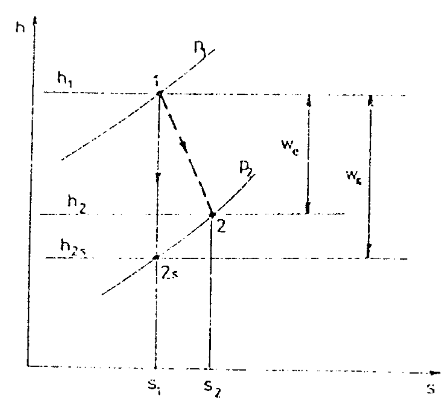
TERMODYNAMICKÁ ÚČINNOSŤ

Turbína adiabatická

$$\eta_T = \frac{w_e}{w_s} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}}$$

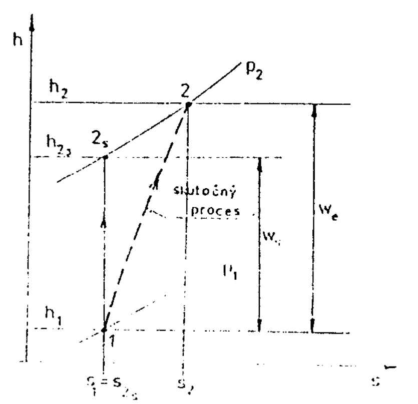
w_e - skutočná práca turbíny

w_s - práca izoentropickej turbíny



Kompresor adiabatický

$$\eta_K = \frac{w_s}{w_e} = \frac{h_1 - h_{2s}}{h_1 - h_2}$$

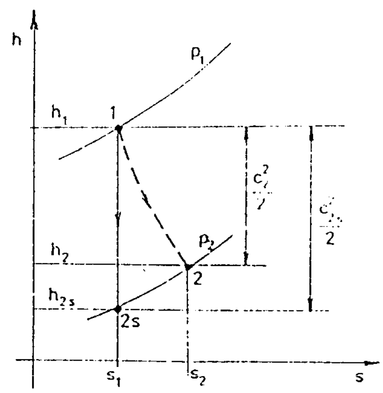


Dýza adiabatická

$$\eta_D = \frac{e_{kin\ skut}}{e_{kin\ izoentr}} = \frac{c_2^2}{c_{2s}^2} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}}$$

$$e_{kin\ skut} = \frac{m\,c_2^2}{2}$$

$$e_{kin\ izoentr} = \frac{m\,c_{2s}^2}{2}$$

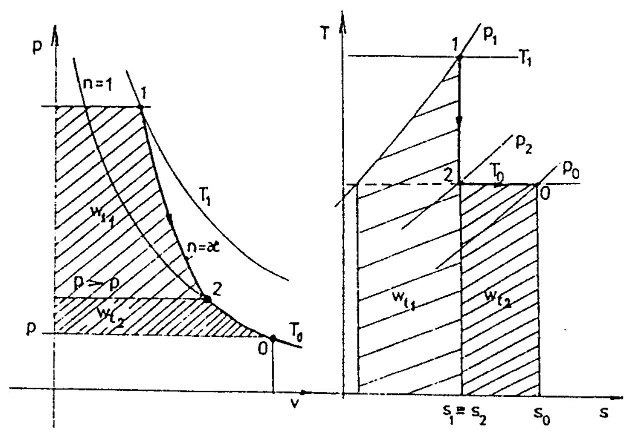


EXERGIA ENERGIE

Ex = Eω

Ex je exergia (max. časť energie E, schopná premeny na prácu pri danom okolí)

ω - súčiniteľ práceschopnosti



Exergia tepla

$$Ex_Q = Q\omega_Q = Q\left(1 - \frac{T_o}{T}\right) = Q - Q\left(\frac{T_o}{T}\right) = Q - B_Q$$

T_o - teplota okolia [K]

T - teplota zdroja tepla [K]

B_Q - anergia tepla (tá časť tepla, ktorá sa na prácu pri danom okolí premeniť nedá)

EXERGIA PRÚDU LÁTKY

$e_x = h - T_o s + \frac{c^2}{2} + gz$ $\qquad$ $e_{x_o} = h_o - T_o s_o + 0 + 0 = 0$

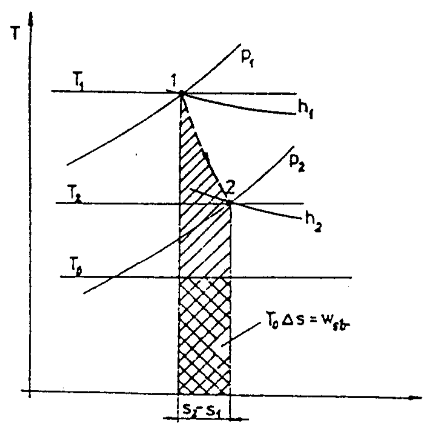
$e_{x_h} = h - h_o - T_o (s-s_o) + \frac{c^2}{2} + gz$ $\qquad$ exergia entalpie

EXERGETICKÁ ÚČINNOSŤ PROCESU

$$\eta_{e_x} = \frac{w_{uz}}{w_{rev_{max}}}$$

$w_{uz} = w_{skut}$ užitočná (skutočná práca)

$w_{rev_{max}}$ maximálna práca získaná medzi tými istými stavmi ako skutočná, ale vykonaná vratne



príklad: nevratná adiab. Turbína

$w_{uz} = h_1 - h_2$

$w_{rev} = e_{x_1} - e_{x_2} = h_1 - h_2 - T_o (s_1 - s_2)$

pri zanedbaní kin. a pot. Energie

EXERGETICKÁ ÚČINNOSŤ OBEHU

$$\eta_{e_x} = \frac{w_{uz}}{Ex_{Q_p}}$$

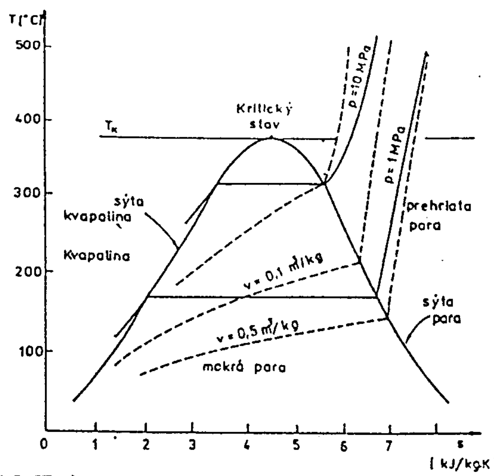
Ex_{Q_p} - exergia dodaná (privedená) do obehu teplom

pri T = konšt $\qquad$ $Ex_Q = \left(1 - \frac{T_o}{T}\right) Q$ $\qquad$ $\eta_{e_x} = \eta_t \left(\frac{1}{1 - \frac{T_o}{T}} \right)$

EXERGETICKÁ ÚČINNOSŤ TEPELNÉHO ČERPADLA

$$\eta_{e_x} = \frac{Ex_Q}{w_{uz}} = \frac{w_{rev}}{w_{uz}} = \frac{\left(1-\frac{T_o}{T}\right)Q}{w_{uz}} = \varepsilon_{TC}\left(1-\frac{T_o}{T}\right)$$

VÝPOČTOVÉ VZŤAHY PRE PARY (VODNÉ)



Ľavá medzná krivka do (4 MPa)

entalpia $h' = c_K\, t$ — c_K špec. tep. kapacita vody (4,2 kJ/kg K), t - teplota [°C]

pre vyššie tlaky - tabuľky sýtych kvapalín a pár

entrópie $s' = c_K \ln\left(\frac{T}{T_o}\right)$ — T - teplota [K]

T_o - 273,16 K (ref. bod; trojný bod)

pre vyššie tlaky - tabuľky

Pravá medzná krivka - tabuľky

Prehriata para a podchladená kvapalina - tabuľky

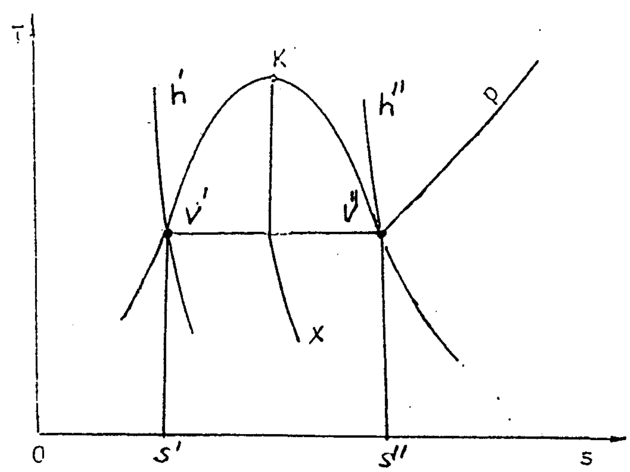
Mokré pary

$$v = v' + x(v'' - v')$$

$$h = h' + x(h'' - h') = h' + x\, l_v$$

$$s = s' + x(s'' - s') = s' + \frac{x\, l_v}{T_s}$$

$$x = \frac{m''}{m' + m''}$$



x - pomerná suchosť pary
m' - hmotnosť sýtej kvapaliny
m'' - hmotnosť sýtej pary
T_s - teplota varu (nasýtenia)
l_v - výparné teplo

ZMENY STAVU PÁR

p = konšt

$$q_{1,2} = h_2 - h_1 \qquad Q_{1,2} = m\, q_{1,2}$$
$$w_{1,2} = p\,(v_2 - v_1) \qquad W_{1,2} = m\, w_{1,2}$$

v = konšt

$$q_{1,2} = u_2 - u_1 = h_2 - h_1 - (p_2 v_2 - p_1 v_1)$$
$$w_{t_{1,2}} = -v(p_2 - p_1)$$

T = konšt

$$q_{1,2} = T(s_2 - s_1) \qquad w_{t_{1,2}} = T(s_2 - s_1) - (h_2 - h_1)$$
$$w_{1,2} = T(s_2 - s_1) - (u_2 - u_1)$$

dQ =0

$$w_{1,2} = u_2 - u_1$$
$$w_{t_{1,2}} = h_2 - h_1$$

Tabuľky prílohy
Diagramy T-s, h-s prílohy

REÁLNE PLYNY

Väzbu medzi stavovými veličinami u reálnych plynov je možné určiť zo stredných rovníc reálnych plynov rôznych autorov. Najstaršia je rovnica Van der Waalsova

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = r\,T$$

do ktorej konštanty a,b môžme dosadiť z priložených tabuliek. Jedna z rovníc virialneho tvaru je Beothelotova upravená rovnica

$$pv = rT + pB_{(T)}$$

kde

$$B_{(T)} = \frac{9}{128}\frac{r\,T_K}{p_K}\left[1 - 6\left(\frac{T_K}{T}\right)^2\right]$$

Ďalšou možnosťou je určenie pomocou súčiniteľa stlačiteľnosti Z

$$pv = Z\,r\,T$$

Z je možné určiť pomocou redukovaných veličín stavu (p_r, v_r', T_r) a zákona korešpondujúcich stavov

$$p_r = \frac{p}{p_K} \qquad T_r = \frac{T}{T_K} \qquad v_r' = \frac{v}{\dfrac{r\,T_K}{p_K}}$$

veličiny označené indexom k sú v kritickom bode.
Odčítanie Z je potom z univerzálneho diagramu súčiniteľa Z - príloha

JOULE THOMSOV SÚČINITEĽ

Je možné určiť z diferenciálnej rovnice entalpie $dh = c_p dT + \left[v - T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p\right] dp$ pre h = konšt

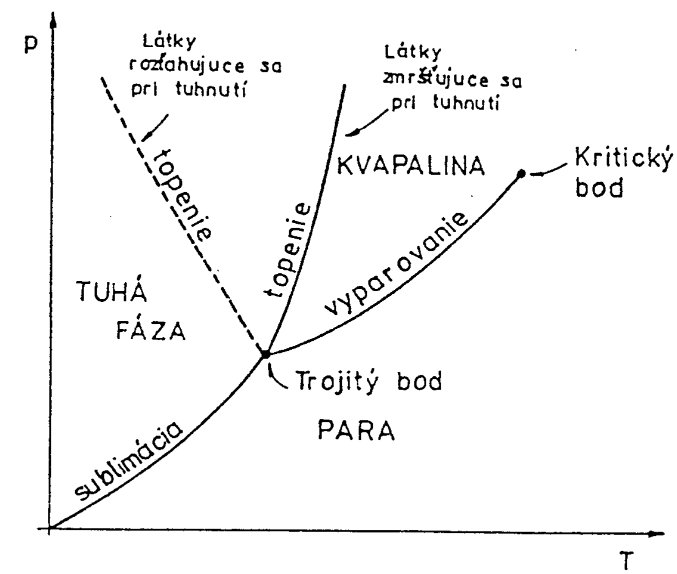
$$K_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_h = \frac{1}{c_p}\left[T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - v\right] \leq \geq 0$$

Clapeyron-Clausiusova rovnica pre var

Z tretieho Maxwellovho vzťahu $\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v = \left(\frac{\partial s}{\partial v}\right)_T$ je možné počas procesu zmeny fázy kedy tlak je iba funkciou teploty varu $p_s = f(T_s)$ určiť sklon dotyčnice ku krivke napätia v diagrame p-T. Táto tangenta nie je závislá od špecifického objemu a počas integrácie je konštanta.

Dostaneme

$$s'' - s' = \left(\frac{dp}{dT}\right)_{sýt} (v'' - v')$$



Počas fázovej premeny zostáva i tlak konštantný a platí dh = Tds čiže

$$h'' - h' = T(s'' - s') = l_v$$

a teda

$$\left(\frac{dp}{dT}\right)_{sýt} = \frac{l_v}{T(v'' - v')}$$

Pre nízke tlaky kedy $v'' \langle\langle v'$ je možné dosadiť aj z rovnice stavu ideálnych plynov bude

$$\left(\frac{dp}{dT}\right)_{sýt} = \frac{p\, l_v}{r\, T^2}$$

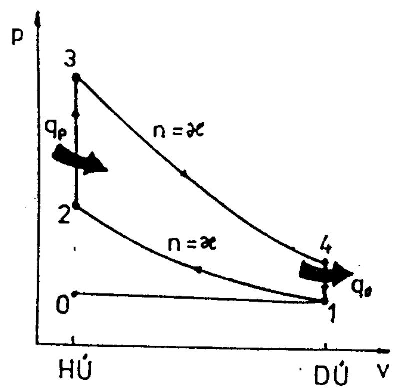
TEPELNÉ MOTORY

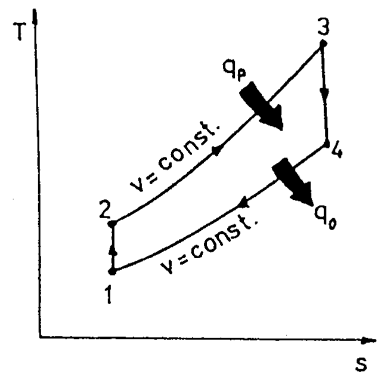
Ottov obeh

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} = 1 - \frac{q_o}{q_p} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

ε - kompresný pomer; $\varepsilon = \dfrac{v_1}{v_2}$

$\kappa = \dfrac{c_p}{c_v}$ zmesi vzduch-benzínové pary $\kappa \doteq 1,4$





Dieselov obeh

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}}\left[\frac{\varphi^{\kappa}-1}{\varphi-1}\right]\frac{1}{\kappa} = \frac{w_c}{q_p} = 1 - \frac{q_o}{q_p}$$

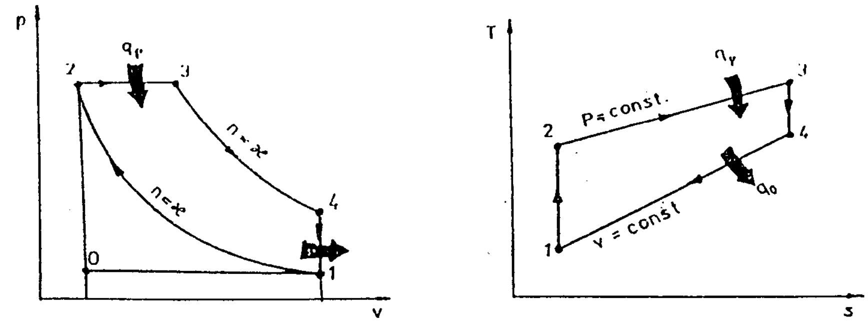
$q_p = c_p\,(T_3 - T_2)$

$q_o = c_p\,(T_4 - T_1)$

$w_c = q_p - |q_o|$

φ - stupeň plnenia $\qquad \varphi = \dfrac{v_3}{v_2}$

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\kappa}\frac{T_1}{T_2}\left[\frac{\frac{T_4}{T_1} - 1}{\frac{T_3}{T_2} - 1}\right]$$



Braytonov obeh

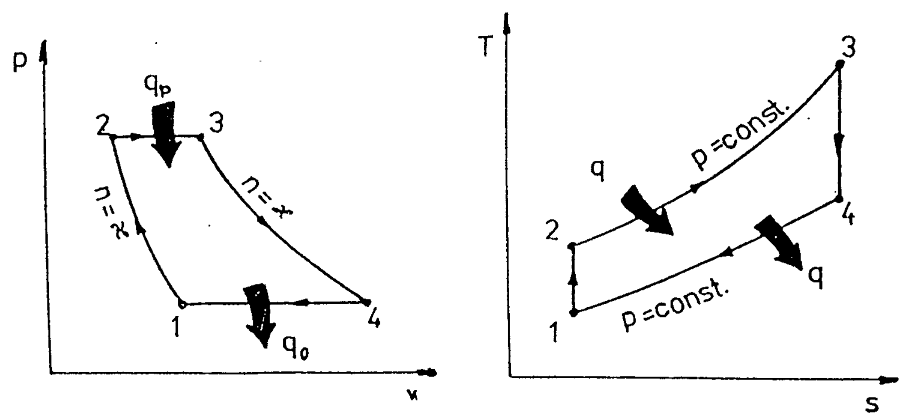
$$\eta_t = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{\pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}$$

π - tlakový pomer na kompresore $\quad \pi = \dfrac{p_2}{p_1}$

Braytonov obeh s maximálnou prácou cyklu pri obmedzenej maximálnej teplote cyklu

$$\eta_t = \tau^{\frac{\kappa}{2(\kappa-1)}}$$

$\tau = \dfrac{T_{max}}{T_{min}} = \dfrac{T_3}{T_1}$ max. hodnota pomeru teplôt

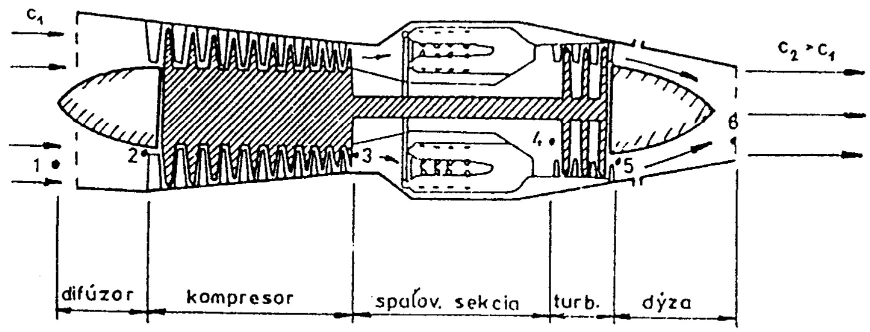


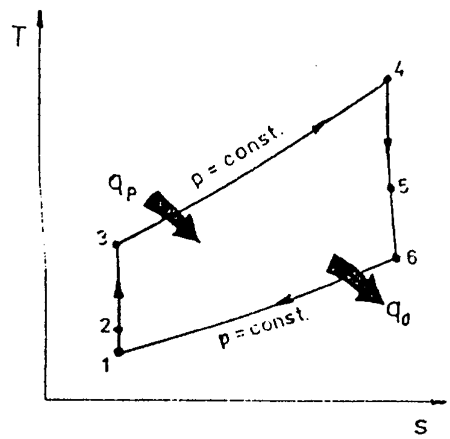
Braytonov obeh s regeneráciou

$$\eta_{t,R} = 1 - \frac{T_1}{T_3}\pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 1 - \frac{\pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}{\tau} = 1 - \frac{T_1}{T_4}$$

Podmienka pre regenerácie $T_4 > T_2$

Braytonov obeh prúdové motory





Ťah motora $F = (\dot{m}\,c)_{vyst} - (\dot{m}\,c)_{vstup} \doteq \dot{m}(c_2 - c_1)$ [N]

c_1 - rýchlosť na vstupe do motora

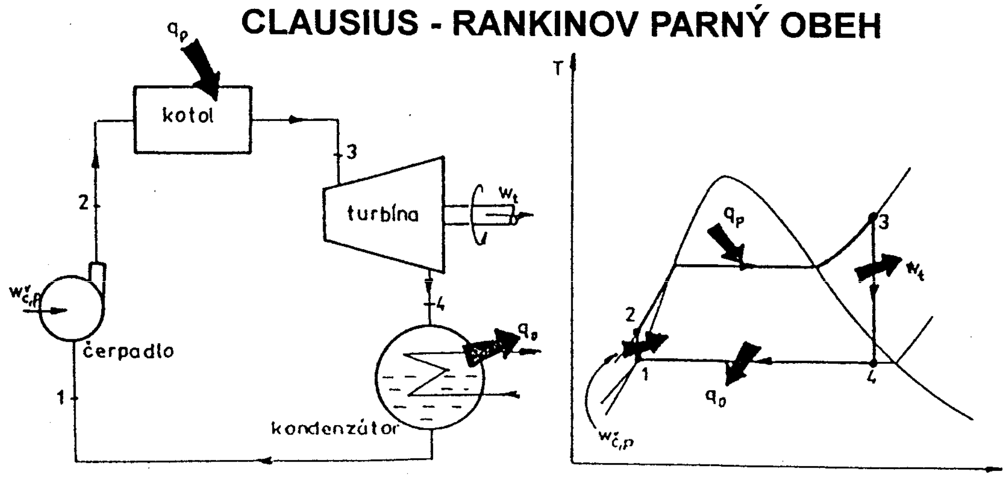
c_2 - rýchlosť na výstupe z motora

Výkon pohonu $\dot{W}_p = P_p = F\,c_L$

c_L - rýchlosť letu stroja $(c_L \doteq c_1)$

$$\eta_p = \frac{P_p}{Q_p}$$ je rovné účinnosti Braytonovho obehu

CLAUSIUS - RANKINOV PARNÝ OBEH



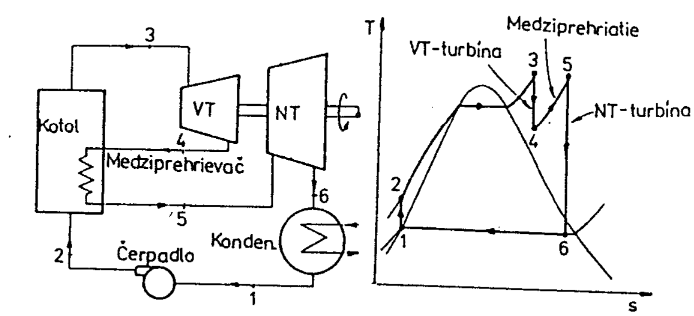
$$\eta_t = \frac{w_{uz}}{q_p} = 1 - \frac{|q_o|}{q_p} = \frac{w_T - w_c}{q_p} = \frac{h_3 - h_4 - (h_2 - h_1)}{h_3 - h_2}$$

$w_{uz} = w_T - w_c$

w_{uz} - užitočná práca cyklu
q_p - privedené teplo
q_o - odvodené teplo
w_c - technická práca čerpadla
w_T - technická práca turbíny

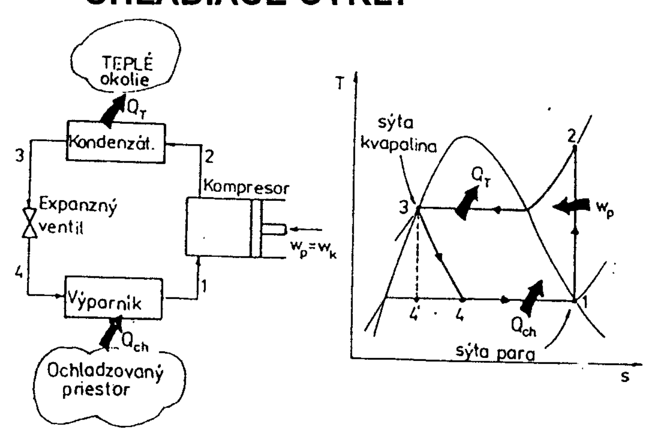
$$|w_c| = |-vdp| = v(p_2 - p_1) = h_2 - h_1$$

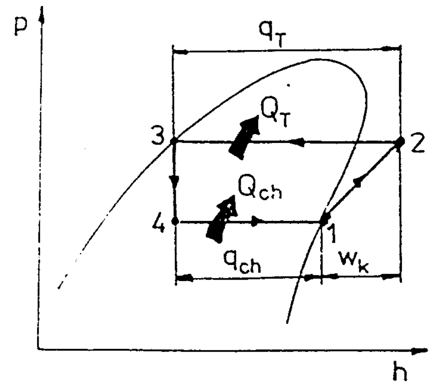
C - R OBEH S MEDZIPREHRIATIM



$$q_p = q_{p_1} + q_{p_2} = (h_3 - h_2) + (h_5 - h_4)$$
$$w_{uz} = w_{T_1} + w_{T_2} = (h_3 - h_4) + (h_5 - h_6)$$
$$\eta_T = \frac{w_{uz}}{q_p}$$

CHLADIACE CYKLY





$$\varepsilon_{CH} = \frac{q_{CH}}{w_K} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad ; \quad \varepsilon_{TC} = \frac{q_T}{w_K} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1}$$

w_K - je technická praca kompresora [J/kg]
q_{CH} - je hmotnostná chladivosť [J/kg]

Pre chladenie v kondenzátore platí

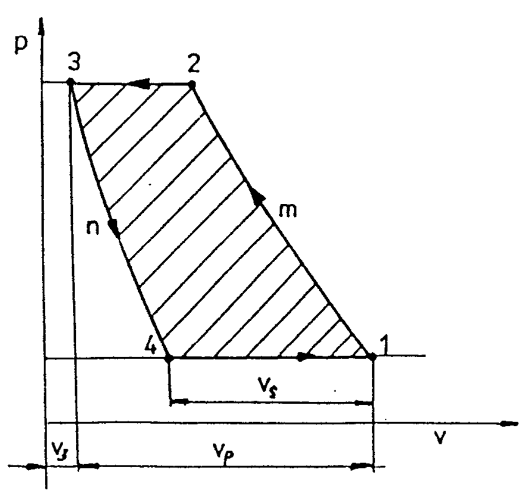
$$q_{kond} = q_T = h_2 - h_3$$

Výkony dostaneme ak špecifické hodnoty vynásobíme hmotnostným tokom chladiva $\dot{m}_{CH}$ [kg/s].

KOMPRESORY

1. Pre výpočty požadovaných prác na pohon kompresora platia vzťahy zo state **Zmeny stavu ideálnych plynov!**

2. **Objemová účinnosť kompresora**



$$\eta_o = \frac{V_s}{V_p} = \frac{V_1 - V_4}{V_1 - V_3} = 1 - \varepsilon_o \left(\pi^{\frac{1}{n}} - 1 \right)$$

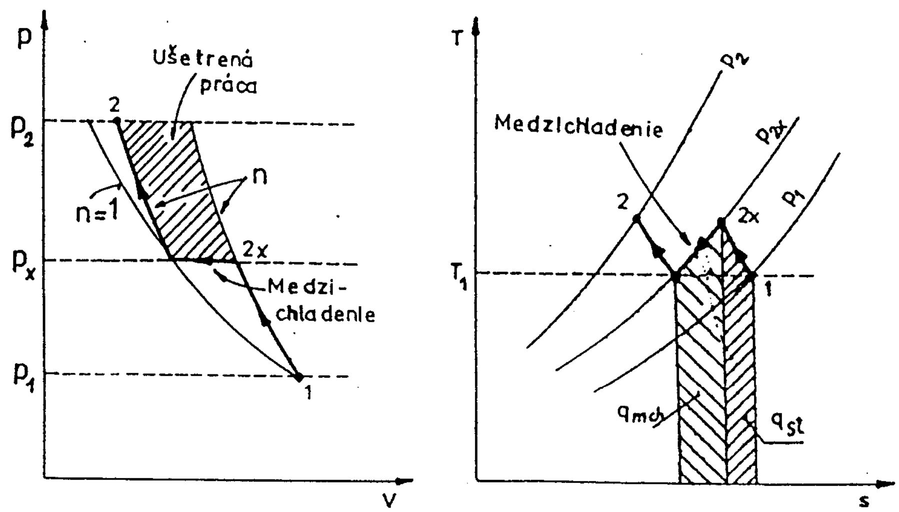
π - je pomer tlakov na kompresore
ε_o - pomerná veľkosť škodlivého priestoru

$$\varepsilon_o = \frac{V_3}{V_p}$$

Pre $\eta_o = 0$ dosiahne kompresor π_{max}

$$\pi_{max} = \left(1 + \frac{1}{\varepsilon_o} \right)^n$$

3. Viacstupňová kompresia



Delenie kompresného pomeru

$$\pi_{opt} = \sqrt[k]{\frac{p_{max}}{p_{sacie}}} = \text{konst}$$

k - počet stupňov

Potom každý stupeň má rovnaký príkon a chladiaci výkon

$$P_K = \dot{m}\, k\, w_K$$

$$w_K = \frac{\kappa}{\kappa - 1} r\, T_1 \left[1 - \pi^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right]$$ pre adiabatický kompresor

n = κ pre polytropický kompresor

Teplo potrebné odoberať v medzichladičoch a dochladzovači

$$\dot{Q} = \dot{m}\, k\, c_p \left(T_2 - T_1\right)$$

T_2 - je teplota plynu po kompresii

Teplo potrebné na chladenie valcov

$$\dot{Q} = \dot{m}\, k\, c_n \left(T_2 - T_1\right)$$ pre polytropický kompresor

$$c_n = c_v \frac{n - \kappa}{n - 1}$$

$$\dot{Q} = \dot{W} = \dot{W}_t$$ pre izotermické kompresory

VLHKÝ VZDUCH

Zmes ideálnych plynov - suchý vzduch + vodná para, prehriata alebo sýta.

$p = p_p + p_v$ [Pa] tlak zmesi

p_p - parciálny tlak pary [Pa]
p_v - parciálny tlak vzduchu [Pa]

Relatívna vlhkosť vzduchu φ [%]

$$\varphi = \frac{m_p}{m_p''} = \frac{\rho_p}{\rho_p''} \doteq \frac{p_p}{p_p''}$$

m_p - hmotnosť pary v kg pri danom stave
m_p'' - hmotnosť pary maximálna pri danom stave (para je sýta) v kg
$''$ - v stave nasýtenia

$$m_p = \frac{p_p\, V}{r_p\, T} \qquad m_v = \frac{p_v\, V}{r_v\, T}$$

Špecifická vlhkosť vzduchu x [kg_p/kg_v]

$$x = \frac{m_p}{m_v} = \frac{r_v}{r_p}\frac{p_p}{p_v} = 0{,}622\,\frac{p_p}{p_v} = 0{,}622\,\frac{p_p}{p - p_p} = 0{,}622\,\frac{\varphi\, p_p''}{p - \varphi\, p_p''}$$

$r_v = 287$ J/kg K
$r_p = 461{,}9$ J/kg K

Entalpia vlhkého vzduchu

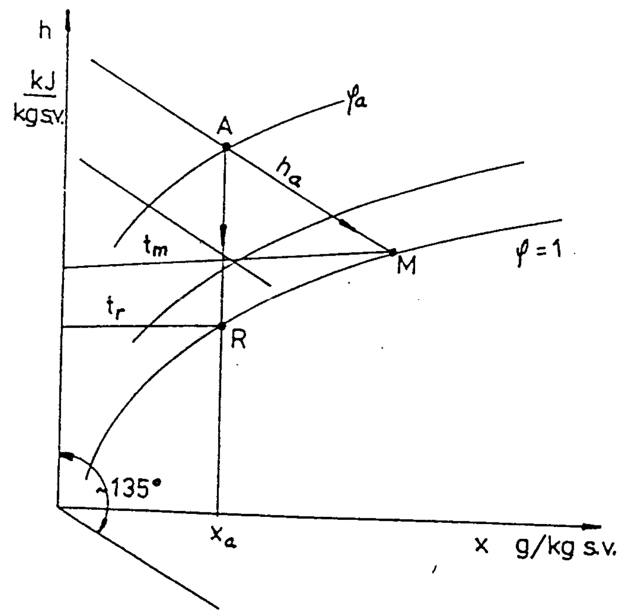
$$h = c_{p_v} t + x\left(c_{p_p} t + l_{v_o}\right) = h_v + x\, h_p$$

$c_{p_v} = 1{,}010$ kJ/kg K $\quad$ $c_{p_p} = 1{,}872$ kJ/kg K $\quad$ $l_{v_o} = 2500$ kJ/kg K

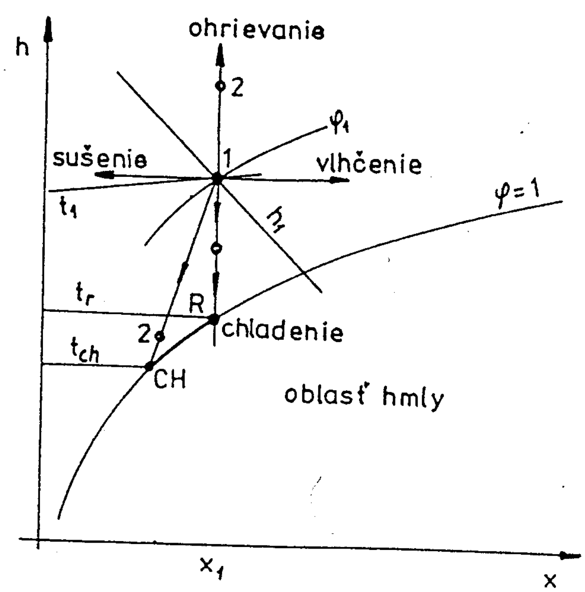
h_v a h_p je len funkciou teploty

DIAGRAM h-x VLHKÉHO VZDUCHU (príloha)

Určovanie teplôt mokrého teplomera (T_l) a rosného bodu (t_R) v h-x diagrame



Základné procesy je možné tiež zakresliť do h-x diagramu.



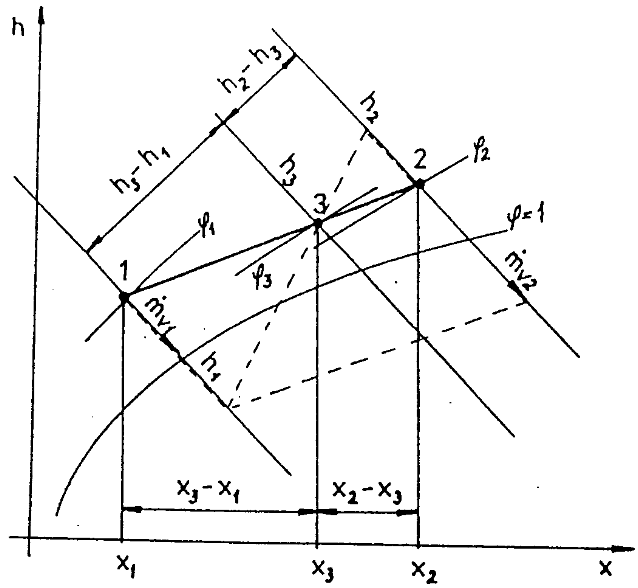
ohrev vlhkého vzduchu pri p = konst z t_1 na t_2 (x = konst)

$$\dot{Q}_{1,2} = \dot{m}_v (h_2 - h_1) \qquad [J/s; W]$$

Vlhčenie vlhkého vzduchu zo stavu 1 na 2 parou

$$\dot{m}_p = \dot{m}_v (x_2 - x_1) \qquad [kg/s]$$

MIEŠANIE DVOCH VLHKÝCH VZDUŠNÍN



Prestup tepla z okolia je obyčajne malý, a preto zmiešavací proces považujeme za adiabatický. Pre zmiešavací proces môžeme napísať rovnice zachovania hmotnosti a rovnicu zachovania energie v tvare

hmotnosť suchého vzduchu

$$\dot{m}_{v_1} + m_{v_2} = \dot{m}_{v_3}$$

hmotnosť vodnej pary

$$x_1\,\dot{m}_{v_1} + x_2\,\dot{m}_{v_2} = x_3\,\dot{m}_{v_3}$$

rovnica zachovania energie

$$\dot{m}_{v_1} h_1 + \dot{m}_{v_2} h_2 = \dot{m}_{v_3} h_3$$

Elimináciou $\dot{m}_{v_3}$ z uvedených vzťahov dostaneme

$$\frac{\dot{m}_{v_1}}{\dot{m}_{v_2}} = \frac{x_2 - x_3}{x_3 - x_1} = \frac{h_2 - h_3}{h_3 - h_1}$$

PRÚDENIE TEKUTÍN STLAČITEĽNÝCH

Rovnica kontinuity $\dot{m} = \rho\, c\, A = \frac{c\, A}{v}$

$\dot{m}$ - prietoková hmotnosť [kg/s]
ρ - hustota [kg/m^3]
v - špecifický objem [m^3/kg]
A - prierez [m^2]
c - rýchlosť [m/s]

Rovnica energetická (totožná s I. ZTD pre ustálený TDS).

$$dq = dh + d\left(\frac{c^2}{2}\right) + g\,dz + dw_t$$

Rýchlosť zvuku

$$a = \sqrt{\kappa\, p\, v} = \sqrt{\kappa\, r\, T} \qquad [\text{m/s}]$$

Adiabaticky zabrzdené veličiny stavu (celkové)

$h_o = h + \frac{c^2}{2}$ entalpia

$T_o = T + \frac{c^2}{2c_p}$ teplota

$p_o = p\left(\frac{T_o}{T}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}$ tlak

$$\frac{T_o}{T} = 1 + \left(\frac{\kappa - 1}{2}\right) M^2$$

$M = \frac{c}{a}$ je Machovo číslo

$$\frac{p_o}{p} = \left[1 + \frac{\kappa - 1}{2} M^2\right]^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}$$

Veličiny v kritickom (minimálnom) priereze pri M =1

	Jednoatómové plyny $\kappa = 1{,}667$	**Vzduch** $\kappa = 1{,}4$	**Horúce spaľ. plyny** $\kappa = 1{,}33$	**Prehriata para** $\kappa = 1{,}3$
$\frac{p^*}{p_o}$	0,4871	0,5283	0,5404	0,5457
$\frac{T^*}{T_o}$	0,7499	0,8333	0,8584	0,8696
$\frac{\rho^*}{\rho_o}$	0,6495	0,6340	0,6295	0,6276

VÝSTUPNÉ RÝCHLOSTI Z DÝZY

$$c_e = \sqrt{2(h_o - h_e)} = \sqrt{2c_r(T_o - T_e)} = \sqrt{2\frac{\kappa}{\kappa - 1} r\, T_o\left(1 - \frac{T_e}{T_o}\right)}$$

$$\frac{T_e}{T_o} = \left(\frac{p_e}{p_o}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

Obmedzenie výtokovej rýchlosti z dýzy je iba v prípade, že dýza je konvergentná (zužujúca sa). Pri tejeto dýze je výtoková rýchlosť obmedzená rýchlosťou zvuku na výstupe t.j. pri

$$\frac{p_e}{p_o} \le \left(\frac{2}{\kappa + 1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \le 0{,}528 \qquad (\text{pre } \kappa = 1{,}4)$$

$$\frac{T_e}{T_o} = 0{,}833 \qquad (\text{pre } \kappa = 1{,}4)$$

V prípade kritického výtoku môže sa výtoková rýchlosť vypočítať z rovnice

$$c_K = \sqrt{\kappa\, r\, T_K} = \sqrt{2\frac{\kappa}{\kappa + 1} r\, T_o}$$

V prípade, že do dýzy už vstupuje plyn rýchlosťou c_1 používame rovnicu

$$c_e = \sqrt{2(h_1 - h_e) + c_1^2} = \sqrt{2c_p(T_1 - T_e) + c_1^2}$$

h_1 je termodynamická entalpia prúdu
T_1 - termodynamická teplota prúdu

Medzi veličinami adiabatického zabrzdenia T_o, h_o a termodynamickými veličinami h, T platia známe vzťahy

$$h_o = h + \frac{c^2}{2}$$

$$T_o = T + \frac{c^2}{2c_p}$$

HMOTNOSTNÝ TOK DÝZOU (HUSTOTA HMOTNOSTNÉHO TOKU)

Určuje sa prakticky z rovnice kontinuity

$$\dot{m} = \rho\, A\, c = \frac{A\, c}{v} \ [\mathrm{kg/s}] \qquad \frac{\dot{m}}{A} = \rho c \ \text{ hustota hmot. toku)} \ \left[\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m^2 s}}\right]$$

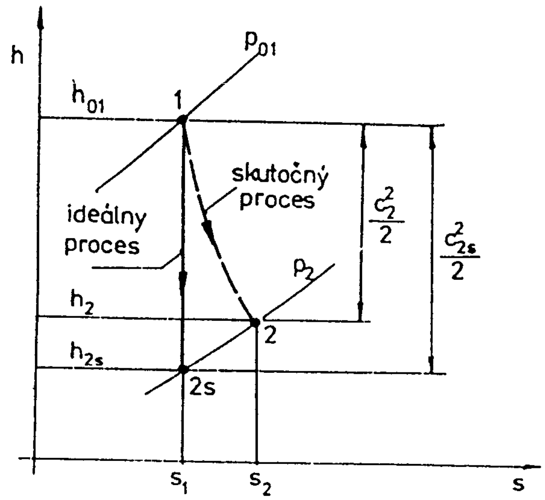
A - prierez v m^2
v - špec. objem [m^3/kg]
ρ - hustota [kg/m^3]
c - rýchlosť [m/s]
Všetky veličiny v danom mieste dýzy.

DĹŽKA DÝZY ROZŠIRUJÚCEJ SA

$$l = \frac{d_2 - d_{min}}{2tg\left(\frac{\alpha}{2}\right)}$$

SKUTOČNÉ PRÚDENIE PLYNOV

1. Dýzy



$$\eta_D = \frac{\frac{c_2^2}{2}}{\frac{c_{2,s}^2}{2}} = \frac{c_2^2}{c_{2,s}^2} = \frac{h_{01} - h_2}{h_{01} - h_{2,s}}$$ účinnosť dýzy

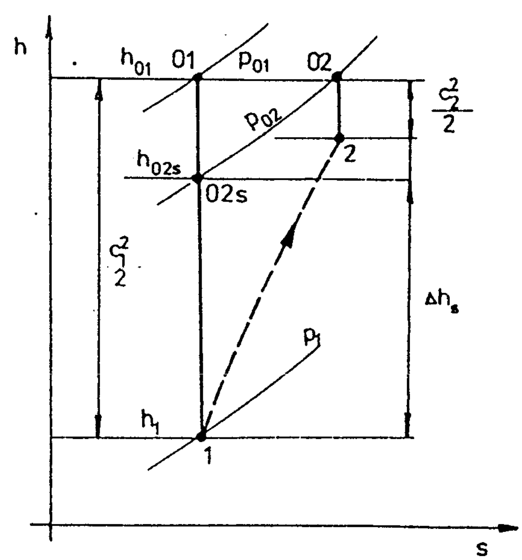
c_2 - skutočná rýchlosť výtoku
$c_{2,s}$ - výtoková rýchlosť z izoentropickej dýzy

$$\varphi = \frac{c_2}{c_{2,s}}$$

$$\xi = \frac{\Delta h_s - \Delta h}{\Delta h_s} = 1 - \frac{\Delta h}{\Delta h_s}$$

$$\eta_D = 1 - \xi = \varphi^2$$

2. Difúzory



$$\eta_{dif} = \frac{\Delta h_s}{\frac{c_1^2}{2}} = \frac{h_{o2s} - h_1}{h_{o1} - h_1}$$

Δh_s - skutočná kinetická energia schopná premeny na vzrast tlaku

$\frac{c_1^2}{2}$ - maximálna kinetická energia použiteľná na vzrast tlaku

Ak výstupná rýchlosť z difúzora je zanedbateľná $p_{o2} = p_2$ a pre difúzor s ideálnym plynom platí

$$\eta_{dif} = \frac{T_{o2} - T_1}{T_2 - T_1} = \frac{\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1}{\frac{\kappa - 1}{2} M_1^2}$$

© Vydala **Katedra tepelnej techniky** ako podklady ku skúške.
Spracovali: Doc. Ing. Ernest Kabát, CSc.
Ing. Dušan Jurčovič
Ing. Kvetoslava Schätzlová

Počet výtlačkov: 40 ks
Bratislava, 1997