

SILNIK TURBINOWY – ANALIZA TERMO-GAZODYNAMICZNA OBIEGU „SILNIKA IDEALNEGO”-BEZ STRAT

Dr inż. Robert JAKUBOWSKI

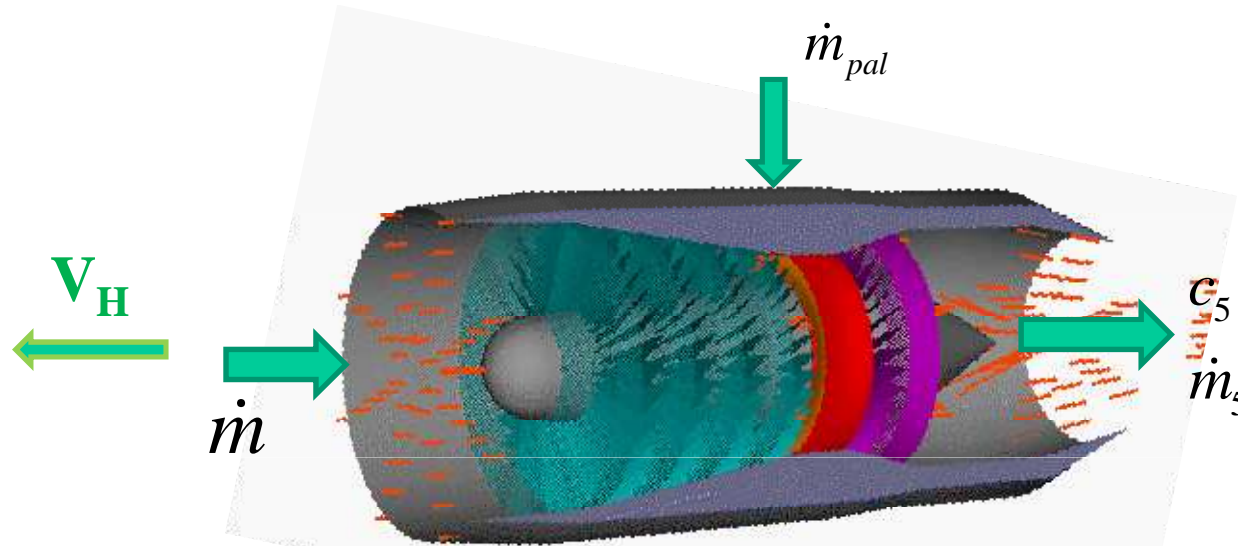
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa PRz

Pok. 215 bud L 33

E-mail robert.jakubowski@prz.edu.pl

WWW www.jakubowskirobert.sd.prz.edu.pl

Ciąg silnika odrzutowego



Ciąg silnika:

$$K = \dot{m}_5 c_5 - \dot{m} V_H \quad [N]$$

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt} \quad \text{- masowe natężenie przepływu powietrza na wlocie do silnika}$$

V_H - prędkość lotu

c_5 - prędkość strumienia gazów na wyjściu z dyszy wylotowej

Zużycie paliwa:

$$\dot{m}_{pal} \quad \left[\frac{kg}{s} \right]$$

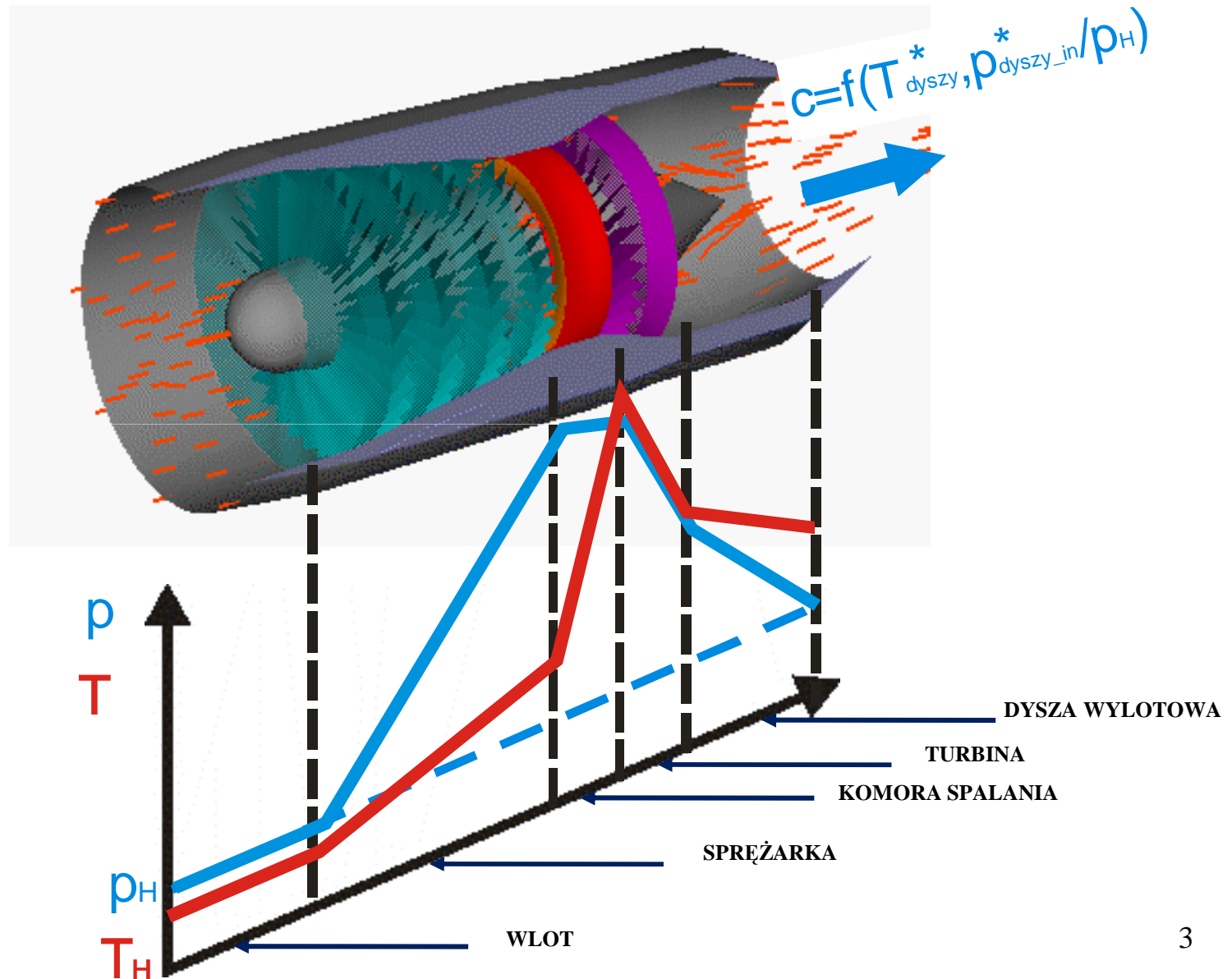
Ciąg jednostkowy:

$$k_j = K / \dot{m} \quad \left[\frac{Ns}{kg} \right]$$

Jednostkowe zużycie paliwa:

$$c_j = \dot{m}_{pal} / K \quad \left[\frac{kg}{Ns^2} \right]$$

Zasada działania silnika odrzutowego



Obliczenia i analiza silnika odrzutowego – silnik idealny

- Procesy wewnętrzne są opisane przemianami odwracalnymi,
- Model gazu jest opisany równaniami gazu doskonałego:

$$c_p, c_v, k = idem$$

Równanie Clapeyrona

$$pv = RT$$

$$k = \frac{c_p}{c_v}$$

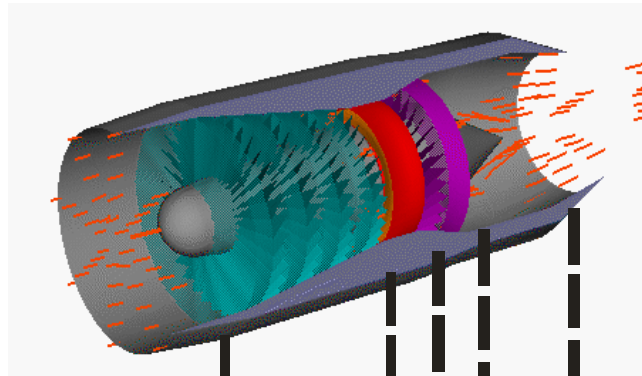
$$R = c_p - c_v$$

R [J/(kgK)] – indywidualna stała gazowa – zależy od składu gazu

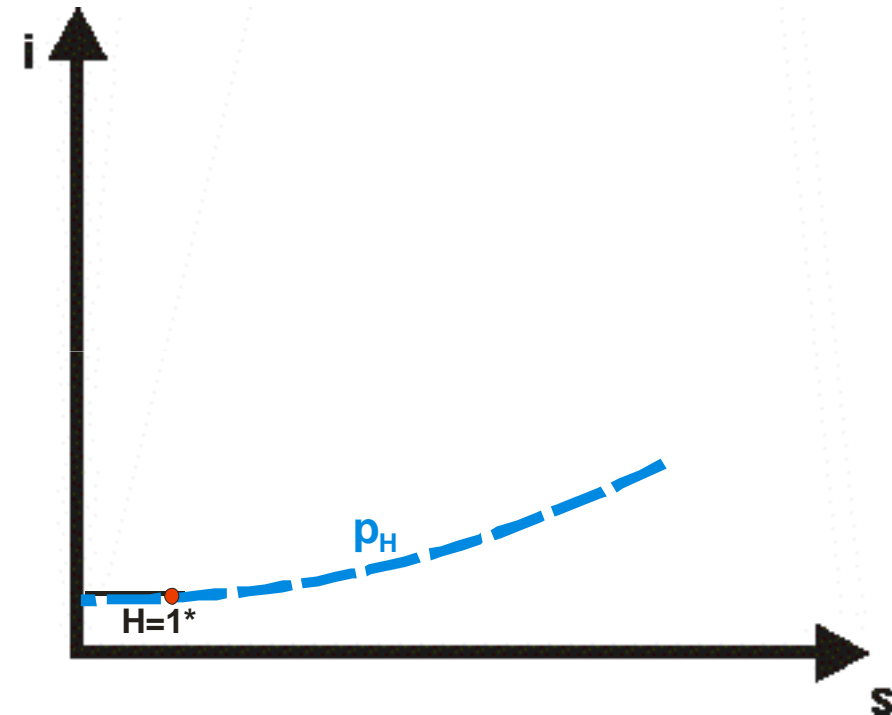
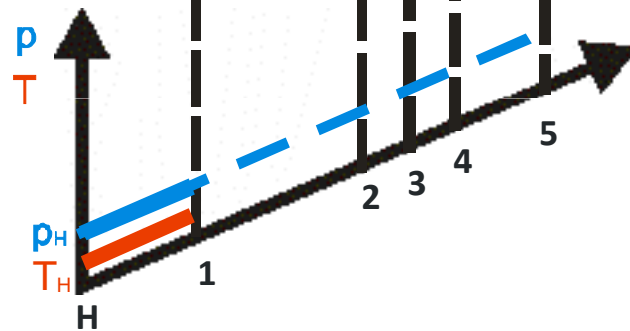
Dla powietrza

$R=287$ [J/(kgK)], $c_p=1005$ [J/(kgK)], $c_v=718$ [J/(kgK)], $k=1,4$

Silnik turbinowy a obieg Braytona



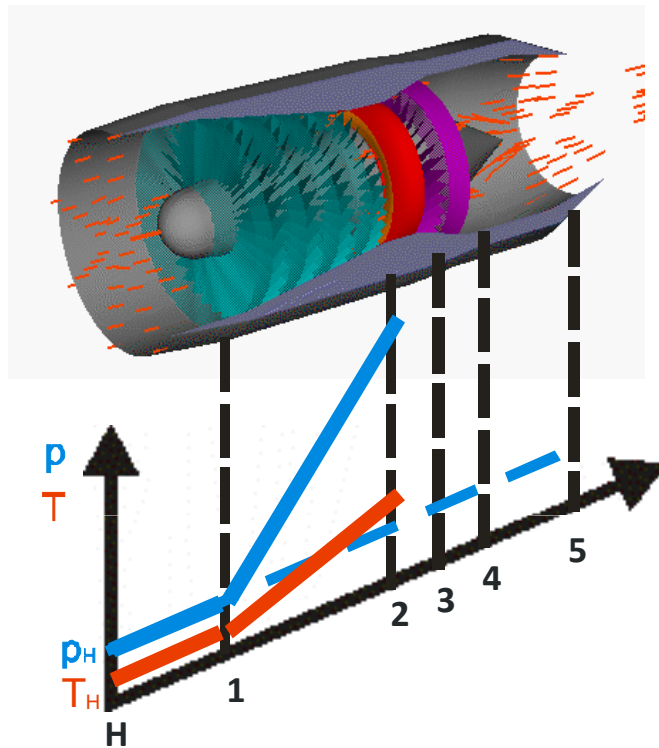
Prędkość lotu $V_H=0$



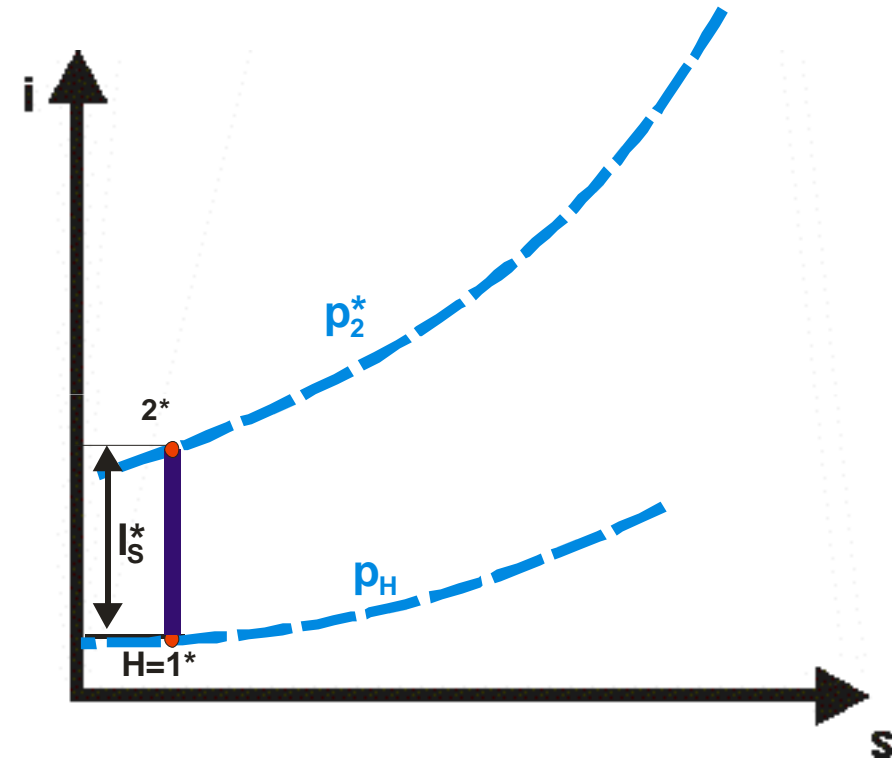
WLOT DO SILNIKA

Ciśnienie i temperatura całkowita na wejściu do wlotu jest równa ciśnieniu i temperaturze powietrza w otoczeniu. Wlot w silniku idealnym traktuje się jako urządzenie izentalpowe i bez strat ciśnienia, stąd w przekroju nr 1 (za wentylatorem) parametry strumienia są takie jak w otoczeniu.

Silnik turbinowy a obieg Braytona



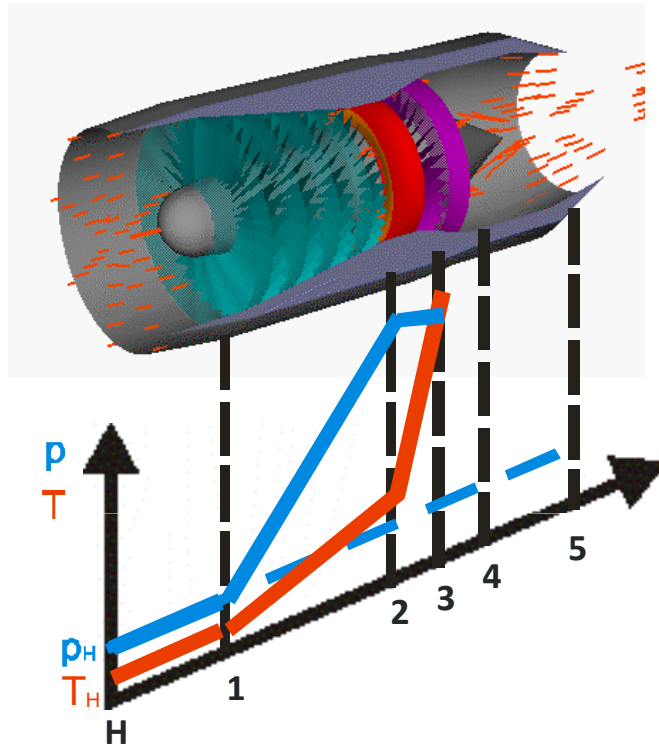
Prędkość lotu $V_H=0$



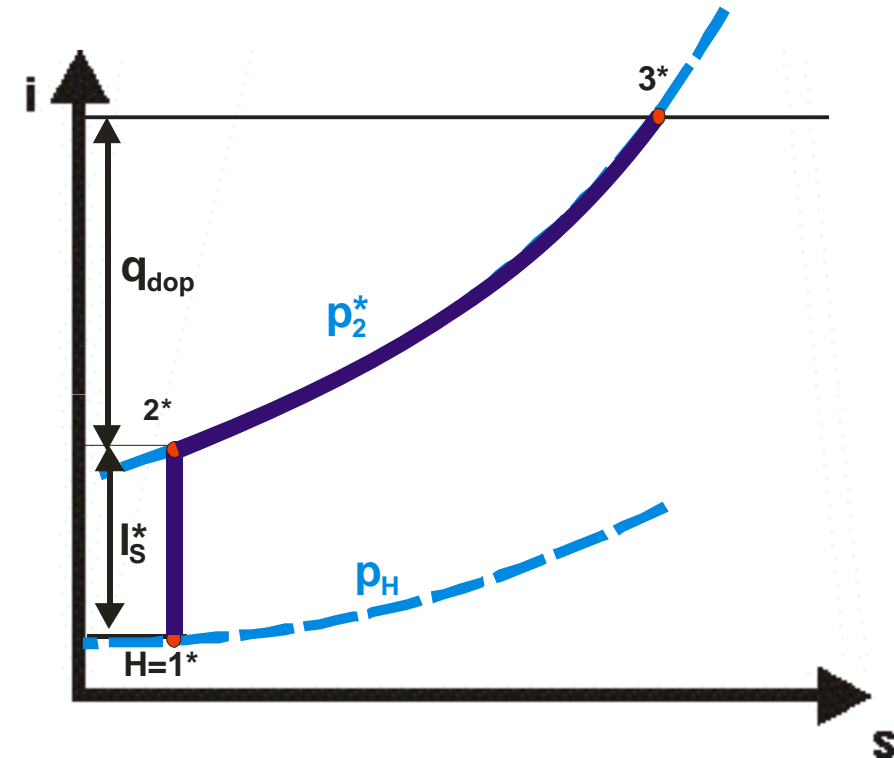
SPRĘŻARKA

Sprężanie w sprężarce idealnej traktuje się jako proces izentropowy, stąd pomiędzy zmianami temperatury ciśnienia i gęstości dla procesu sprężania słuszne są zależności opisane równaniami izentropy. Pracę sprężania l_s wyznacza się jako różnicę entalpii.

Silnik turbinowy a obieg Braytona



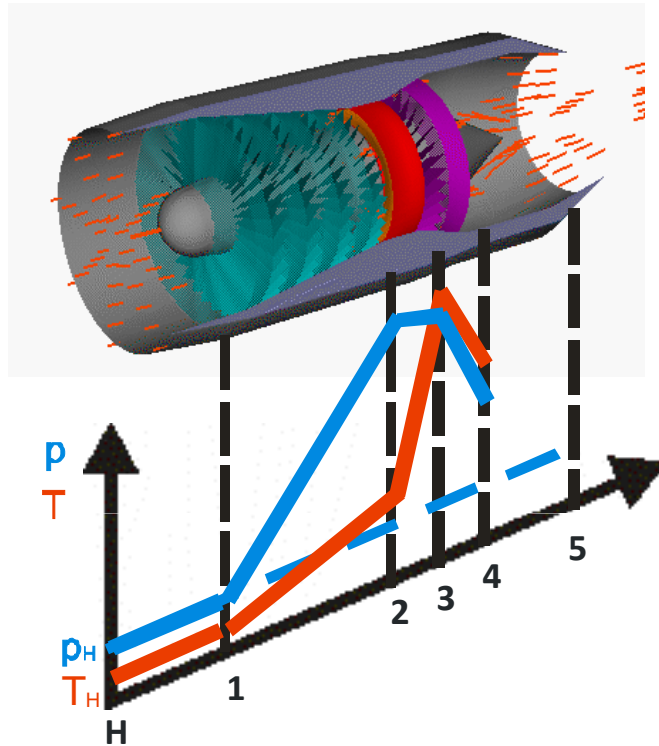
Prędkość lotu $V_H=0$



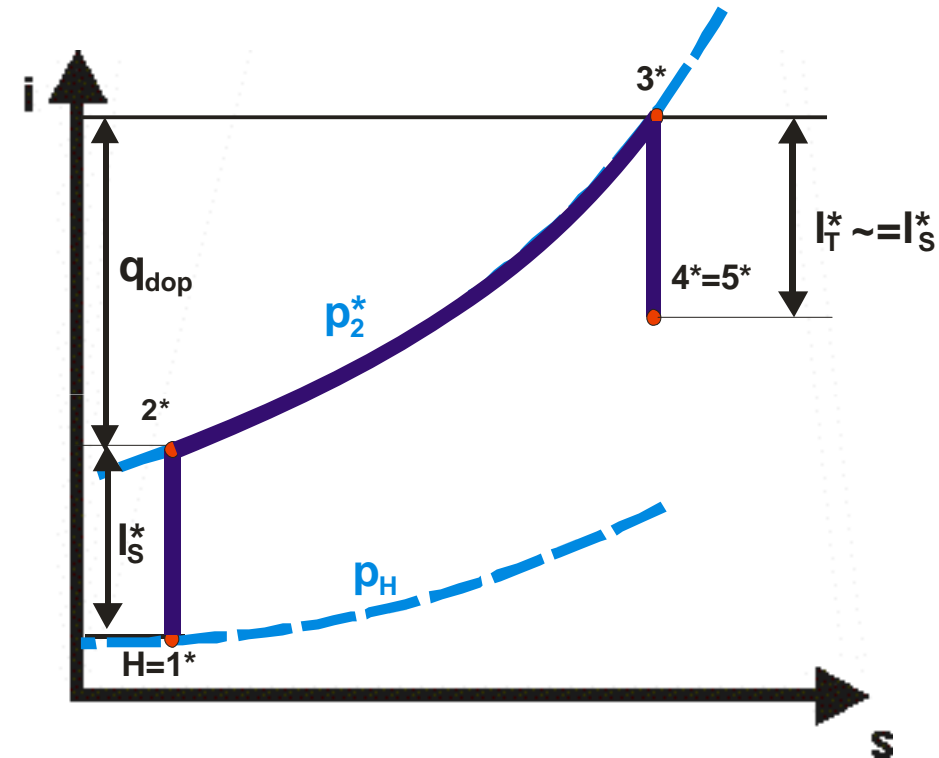
KOMORA SPALANIA

Spalanie w silniku idealnym utożsamiane jest z procesem izobarycznego doprowadzenia ciepła. Ilość ciepła doprowadzonego do strumienia gazu w tym procesie wyznaczana jest jako iloczyn względnego zużycia paliwa i jego wartości opałowej i jest równa zmianie entalpii w komorze spalania.

Silnik turbinowy a obieg Braytona



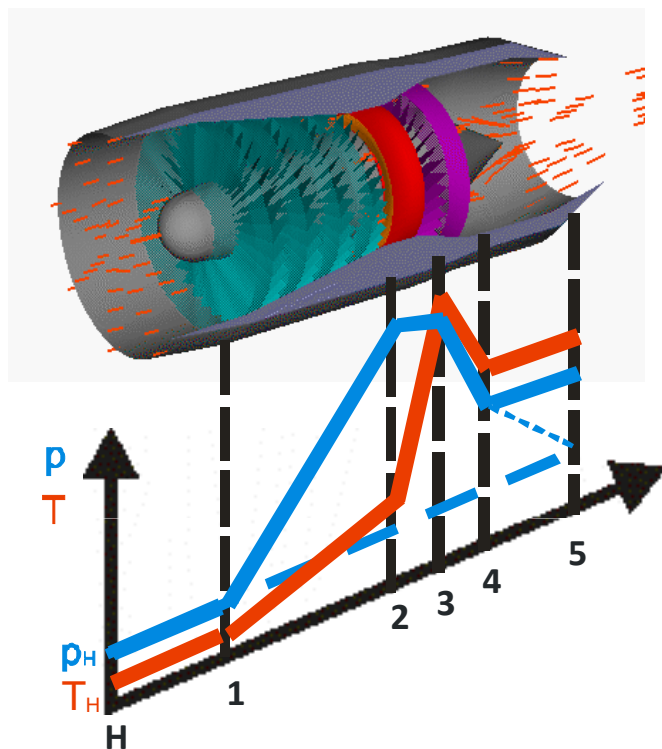
Prędkość lotu $V_H=0$



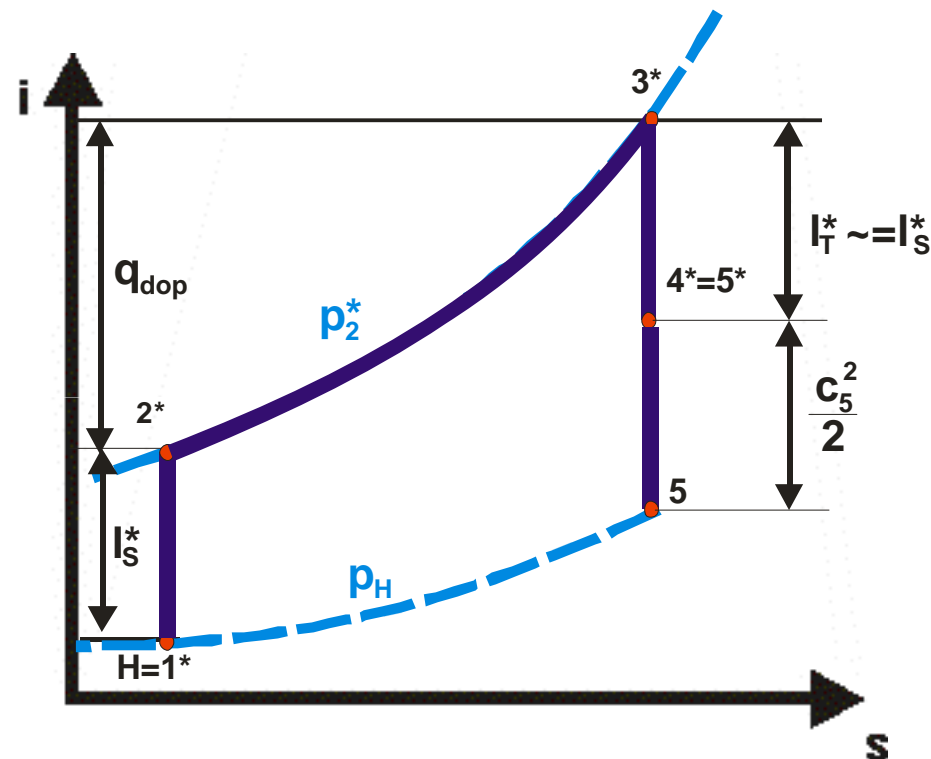
TURBINA

W turbinie idealnej proces rozprężania traktowany jest jako przemiana izentropowa. Praca turbiny, która jest różnicą entalpii na wejściu i wyjściu musi równoważyć pracę sprężarki stąd zapis $I_T=I_S$

Silnik turbinowy a obieg Braytona



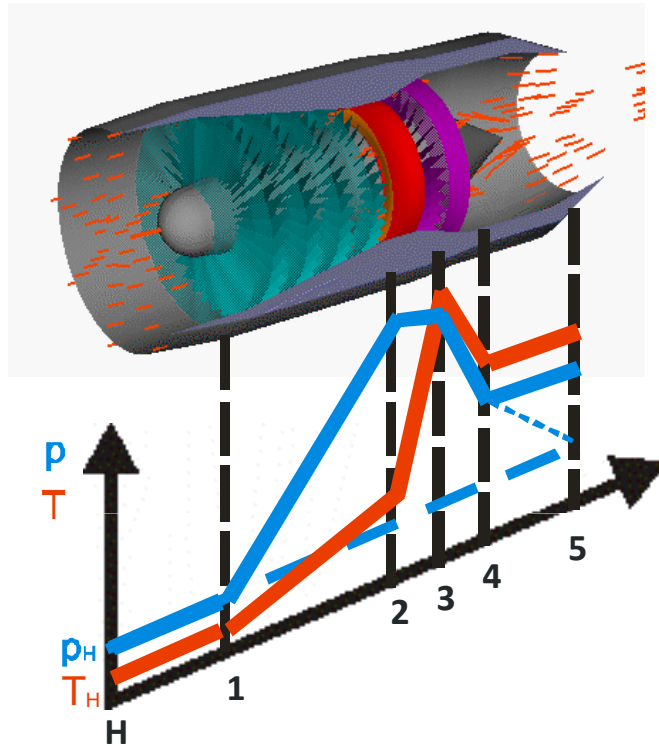
Prędkość lotu $V_H=0$



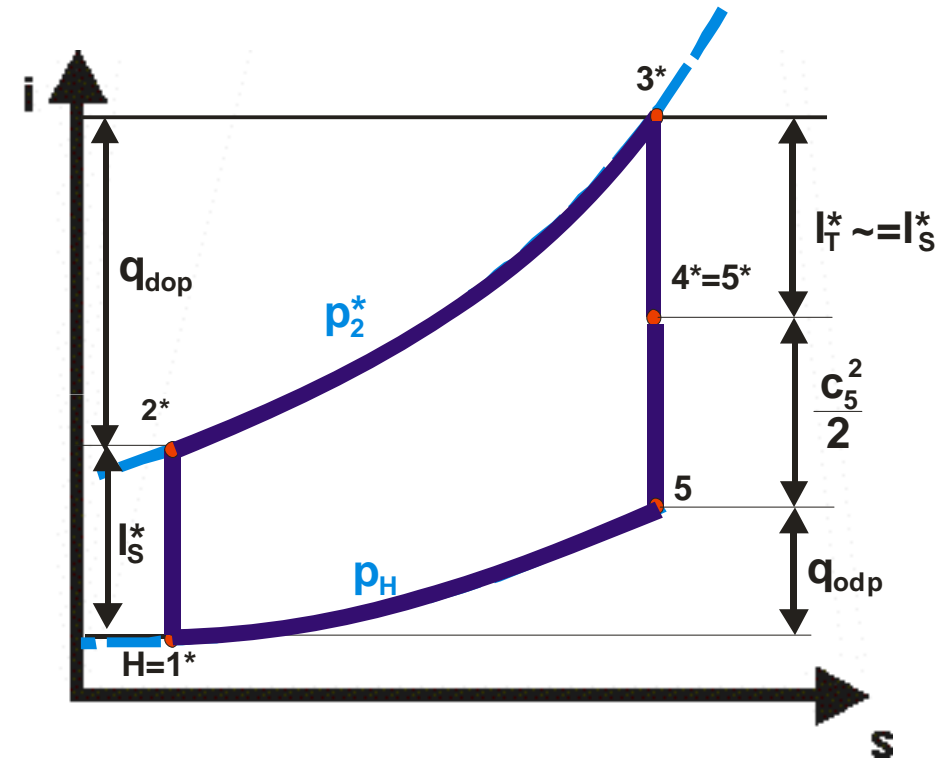
ROZPRĘŻANIE W DYSZY WYLOTOWEJ

Rozprężanie w dyszy wylotowej silnika zachodzi w skutek różnicy ciśnienia całkowitego na wejściu do dyszy i panującego w otoczeniu. Kosztem zamiany rodzaju energii w dyszy następuje przyrost prędkości kosztem energii statycznej. Proces ten w silniku idealnym jest opisany równaniami izentropy

Silnik turbinowy a obieg Braytona



Prędkość lotu $V_H=0$



ODPROWADZENIE CIEPŁA Z SILNIKA ZE SPALINAMI

Charakterystyka obiegu Braytona

Stopień podgrzania:

$$\Delta = \frac{T_3}{T_1}$$

Spręż całkowity:

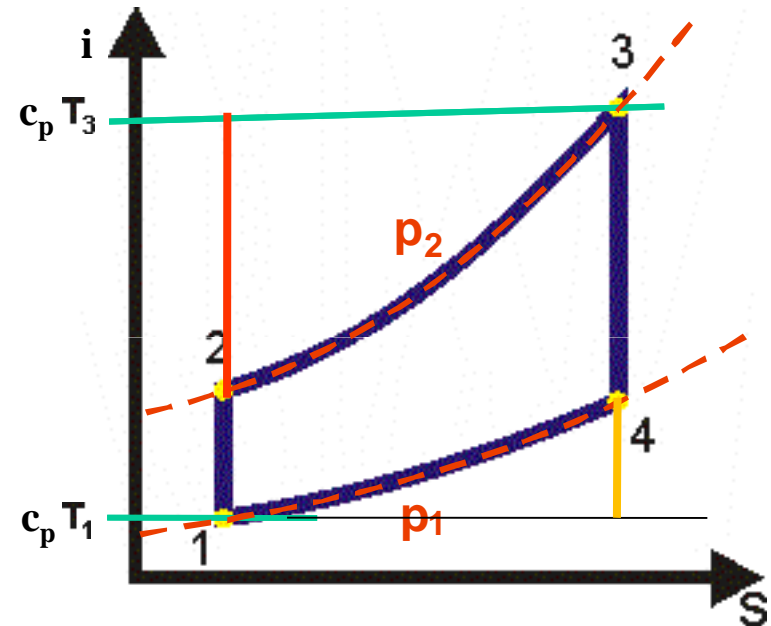
$$\pi = \frac{p_2}{p_1}$$

Praca właściwa obiegu Braytona:

$$l_{ob} = q_{dop} - q_{odp} = c_p T_1 \left(1 - \frac{1}{\pi^{\frac{k-1}{k}}} \right) \left(\Delta - \pi^{\frac{k-1}{k}} \right)$$

Sprawność obiegu Braytona:

$$\eta_{ob} = \frac{l_{ob}}{q_{dop}} = 1 - \frac{1}{\pi^{\frac{k-1}{k}}}$$



PRACA OBIEGU BRAYTONA zależy od sprężu i stopnia podgrzania obiegu

SPRAWNOŚĆ OBIEGU zależy tylko od sprężu i jest tym bliższa jedności im większy jest spręż obiegu

Parametry obiegu, a efektywność pracy silnika odrzutowego

Dla prędkości $V_H=0$

$$l_{ob} = \frac{c_5^2}{2} = \frac{1}{2} k_j^2$$

$$\eta_{ob} = \frac{c_5^2}{2\tau_{pal} W_u} = \frac{c_5}{2c_j W_u} = A \frac{1}{c_j}$$

Dla prędkości $V_H>0$

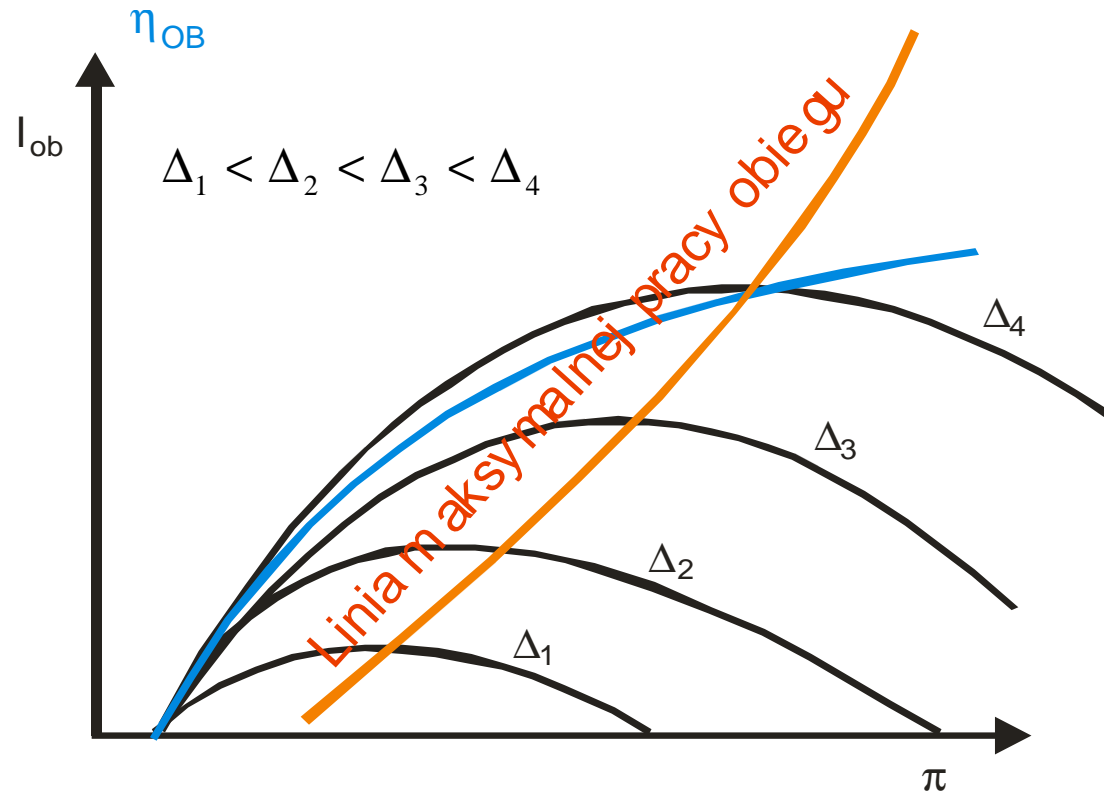
$$l_{ob} = \frac{c_5^2}{2} - \frac{V_H^2}{2} = \frac{1}{2} k_j (c_5 + V_H) = B k_j$$

$$\eta_{ob} = \frac{c_5^2 - V_H^2}{2\tau_{pal} W_u} = \frac{c_5 + V_H}{2c_j W_u} = C \frac{1}{c_j}$$

Ciąg jednostkowy zależy podobnie jak praca obiegu od parametrów pracy silnika.

Jednostkowe zużycie paliwa zmienia się odwrotnie niż sprawność obiegu od parametrów pracy silnika.

Optymalizacja obiegu Braytona



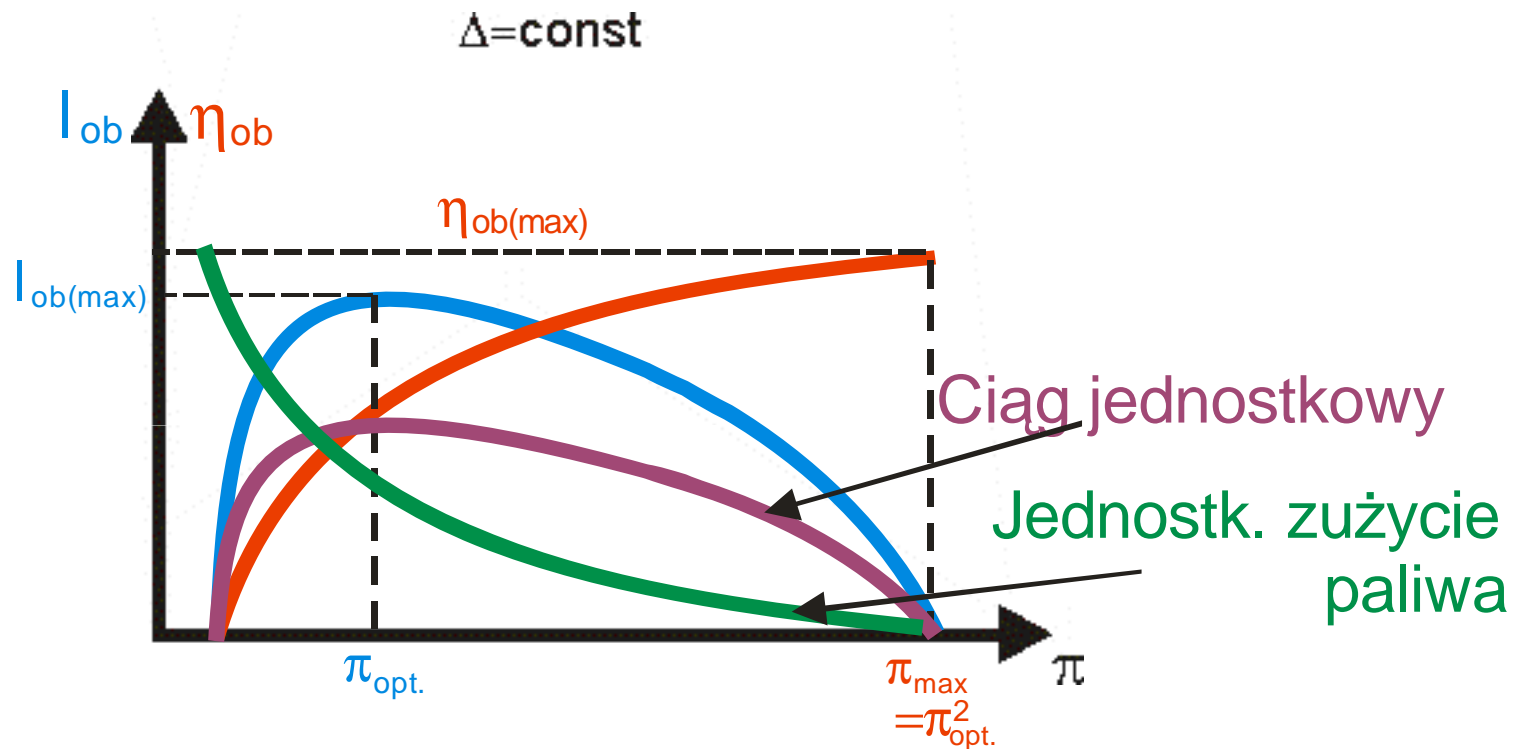
Maksymalna praca obiegu

$$\left. \frac{\partial l_{ob}}{\partial \pi_c} \right|_{\Delta=idiem} = 0 \Leftrightarrow c_p T_1 \left(\Delta \left(\pi^{\frac{k-1}{k}} \right)^{-2} - 1 \right) = 0$$

Spręż maksymalnej pracy obiegu

$$\pi_{opt} = \Delta^{\frac{k}{2(k-1)}}$$

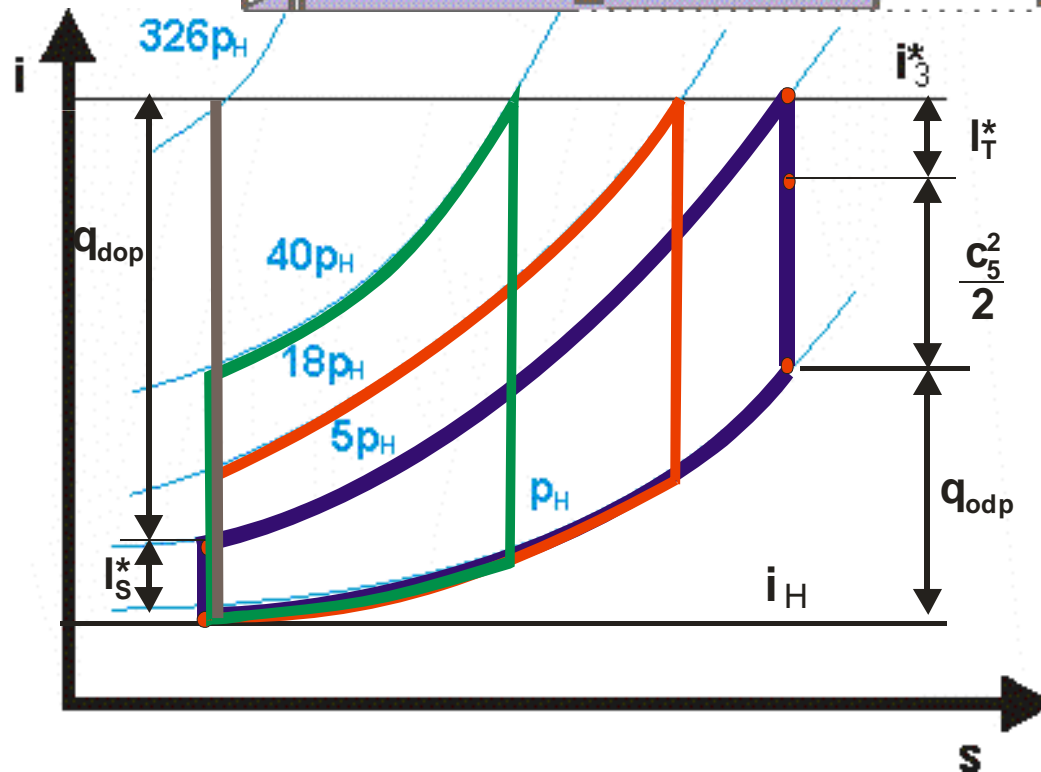
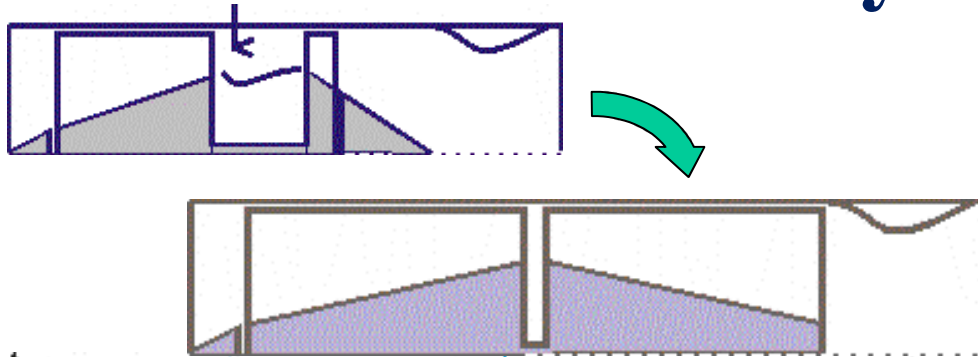
Charakterystyka obiegu Braytona i silnika odrzutowego



$$\pi_{opt} = \Delta^{\frac{k}{2(k-1)}}$$

Stopień podgrzania	Spręż optymalny	Spręż maksymalny
4	11,3	128
5	16,7	279,5
6	23	529

Przykładowe obliczenia obiegu Braytona

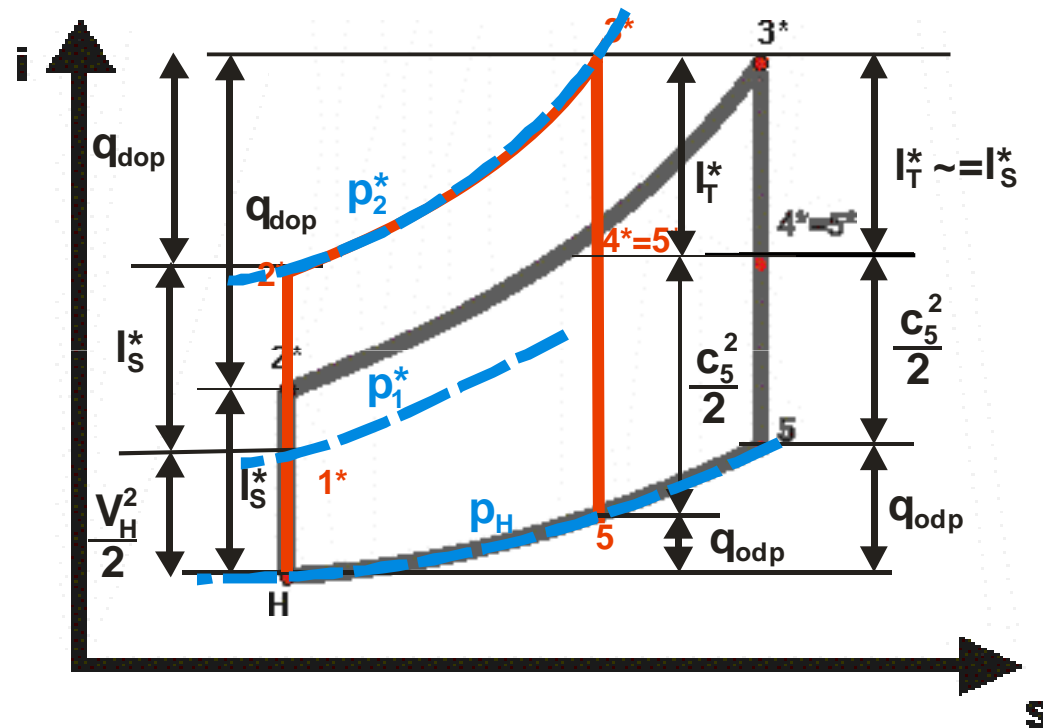


Ph [Pa]	Th [K]	T3 [K]	Δ	π
10^5	288	1500	5,21	5
10^5	288	1500	5,21	18
10^5	288	1500	5,21	40
10^5	288	1500	5,21	386

l_{ob} [kJ/kg]	η_{ob}	kj [Ns/kg]	Cj [kg/daNh]
385	0,37	878	0,997
475	0,56	974	0,726
441	0,60	940	0,603
0	0,81	0	0

Obieg silnika poruszającego się z prędkością V_H względem otoczenia

$V_H > 0$



$$\pi_c = \frac{p_2^*}{p_H} = \frac{p_1^*}{p_H} \frac{p_2^*}{p_1^*} = \pi_{DYN} \pi_s^*$$

$$\pi_{DYN} = f(V_H) \quad \begin{array}{l} \text{-spręż dynamiczny} \\ \text{we wlocie silnika} \end{array}$$

Praca obiegu turbinowego silnika odrzutowego:

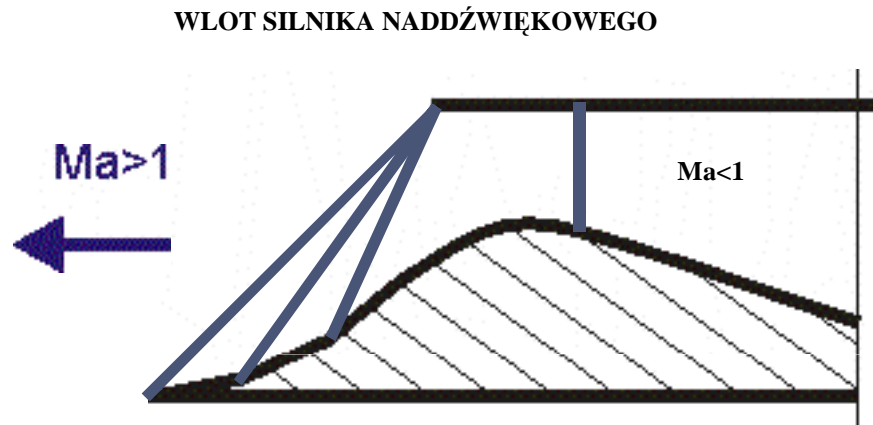
dla $V_H=0$

$$l_{ob} = q_{dop} - q_{odp} = c_5^2/2$$

dla $V_H>0$

$$l_{ob} = q_{dop} - q_{odp} = c_5^2/2 - V_H^2/2$$

Spręż dynamiczny silnika



Prędkość lotu Ma	Spręż dynamiczny
1	1,89
1,5	3,67
2	7,82
2,5	17,09
3	36,73

Spręż dynamiczny

$$\pi_{dyn} = \frac{p_H^*}{p_H} = \left(1 + \frac{k-1}{2} Ma_H^2 \right)^{\frac{k}{k-1}}$$

Przyrost temperatury

$$\frac{T_H^*}{T_H} = 1 + \frac{k-1}{2} Ma_H^2$$

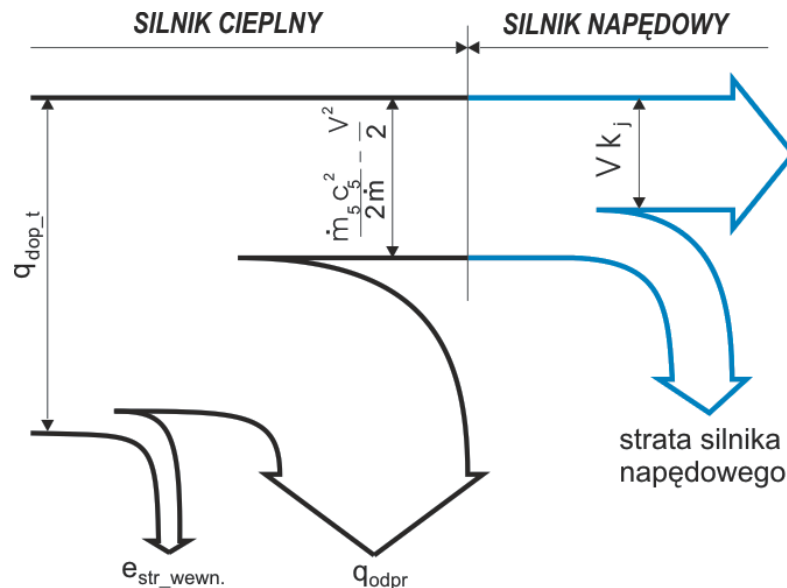
Parametry charakteryzujące pracę silnika

Energetyczne

- Sprawność cieplna:
$$\eta_c = \frac{l_{ob}}{q_{dop}} = \left(\frac{\dot{m}_5 c_5^2}{\dot{m} 2} - \frac{V^2}{2} \right) / \left(\frac{\dot{m}_{pal}}{\dot{m}} W_u \right)$$

- Sprawność napędowa:
$$\eta_k = \frac{k_j V_H}{l_{ob}} = k_j V_H / \left(\frac{\dot{m}_5 c_5^2}{\dot{m} 2} - \frac{V^2}{2} \right)$$

- Sprawność ogólna:
$$\eta_o = \frac{k_j V_H}{q_{dop}} = k_j V_H / \left(\frac{\dot{m}_{pal}}{\dot{m}} W_u \right)$$



$$q_{dop_t} = \frac{\dot{m}_{pal}}{\dot{m}} W_u = e_{str_wewn.} + \left(\frac{\dot{m}_5 c_5^2}{\dot{m} 2} - \frac{V^2}{2} \right) + q_{odpr}$$

Sprawności silnika

Sprawność cieplna

$$\eta_c = \frac{l_{ob}}{q_{dop}} = \left(\frac{\dot{m}_5 c_5^2}{\dot{m} 2} - \frac{V^2}{2} \right) / \left(\frac{\dot{m}_{pal}}{\dot{m}} W_u \right)$$

Dla $V_H=0$

$$\eta_c = \frac{c_5^2}{2}$$

Dla $V_H>0$

$$\eta_c = \frac{c_5^2}{2} - \frac{V^2}{2}$$

Sprawność napędowa

$$\eta_k = \frac{k_j V_H}{l_{ob}} = k_j V_H / \left(\frac{\dot{m}_5 c_5^2}{\dot{m} 2} - \frac{V^2}{2} \right)$$

$$\eta_k = 0$$

$$\eta_k = (c_5 V_H - V_H^2) / \left(\frac{c_5^2}{2} - \frac{V_H^2}{2} \right)$$

Sprawność ogólna

$$\eta_o = \frac{k_j V_H}{q_{dop}} = k_j V_H / \left(\frac{\dot{m}_{pal}}{\dot{m}} W_u \right)$$

$$\eta_o = 0$$

$$\eta_o = (c_5 V_H - V_H^2) / (\tau_{pal} W_u)$$

Dziękuję za uwagę