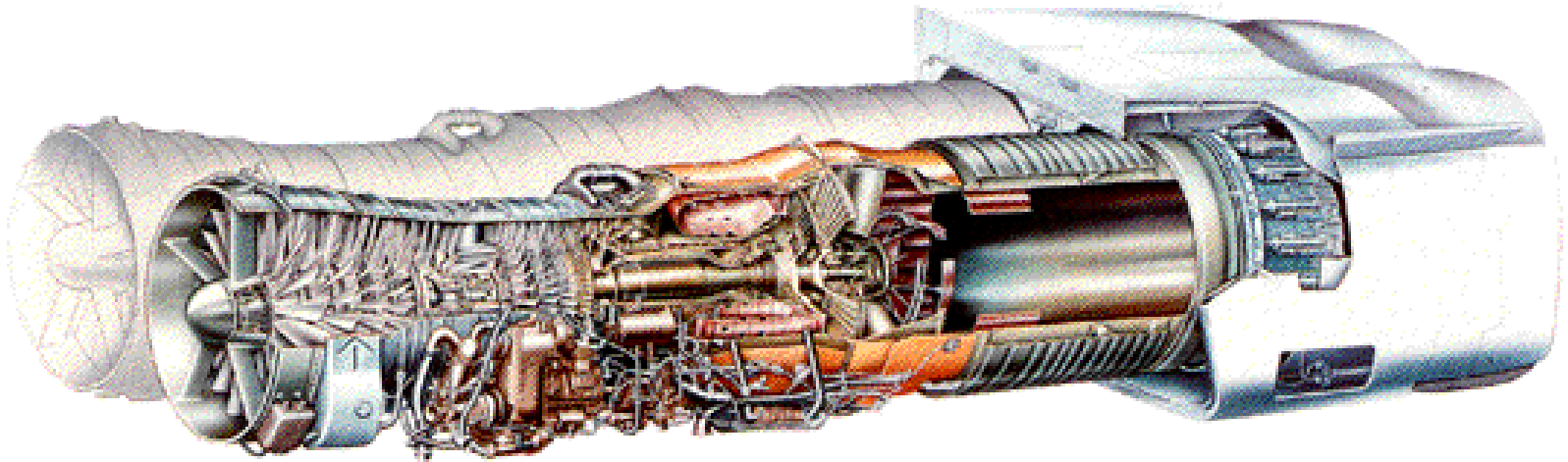


Jednoprzepływowy silnik odrzutowy z dopalaczem

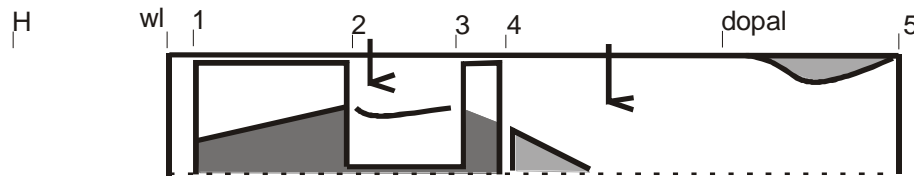


dr inż. Robert JAKUBOWSKI

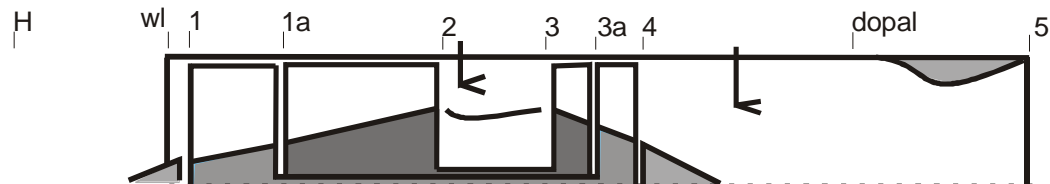
Włączenie dopalacza pozwala na zwiększenie ciągu silnika o ok. 30-50% przy ponad 2-u krotnym wzroście jednostkowego zużycia paliwa

Silnik	K [kN] (bez dopalacza)	K [kN] (z dopalaczem)	c_j [kg/(daNh)] (bez dopalacza)	c_j [kg/(daNh)] (z dopalaczem)
J85-GE-13	12,16	18,14	1,05	2,264
J76-GE-19	52,8	79,6	0,857	2,004
GE4/J5P	229,08	305,15	1,060	1,897
J58-P-4	110,8	151,0	0,816	1,937
Olympus 201R	75,5	106,9	0,816	1,835
Olympus 593	135	170	0,714	1,208

Schemat silnika jednoprzepływowego z dopalaczem



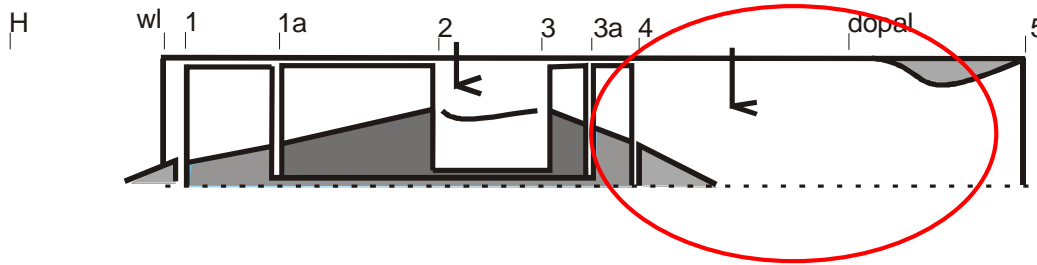
Jednowirnikowy jednoprzepływowy turbinowy silnik odrzutowy z dopalaczem



Dwuwirnikowy jednoprzepływowy turbinowy silnik odrzutowy z dopalaczem

Konstrukcja dwuwirnikowa silnika jednoprzepływowego pozwala na zastosowanie wyższych spręży w silniku, a przy tym zachowanie jego statecznej pracy w szerokim zakresie zmian prędkości obrotowych wirników bez konieczności stosowania dodatkowej mechanizacji sprężarki (upust, regulowane kierownice sprężarki)

Analiza pacy dopalacza



Dopalacz należy traktować jako dodatkową komorę spalania do której wpływają gazy z turbiny, dostarczane jest paliwo i następuje zwiększenie energii

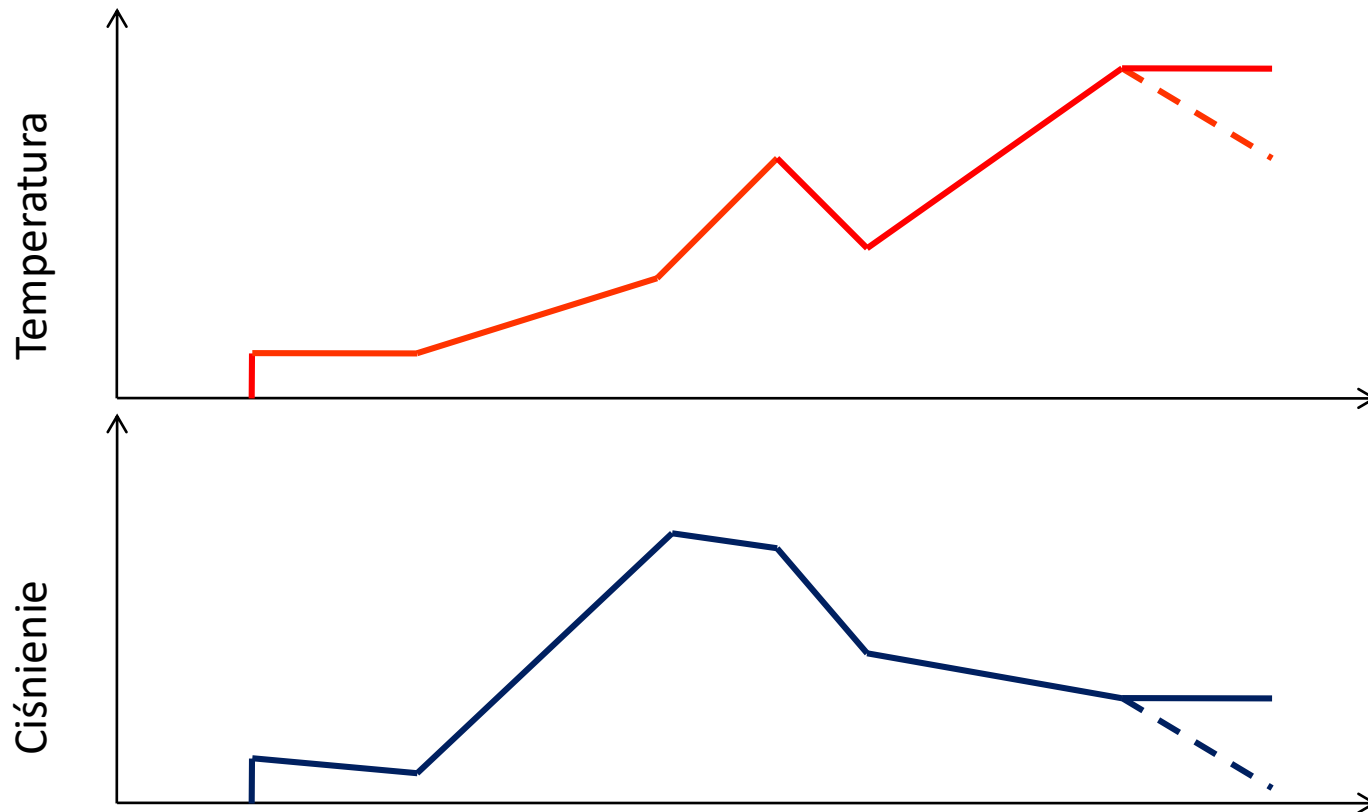
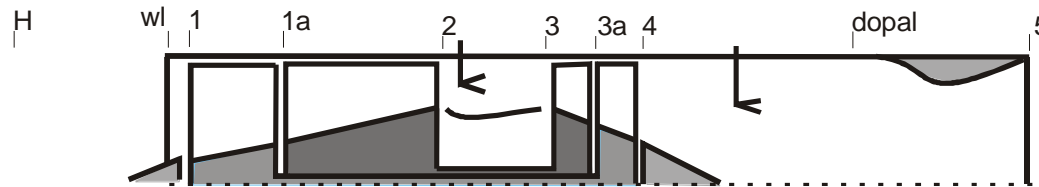
$$\dot{m}_{pal_dopal} \cdot W_u \cdot \eta_{dopal} = c_p \dot{m}_{spal} (T_{dopal}^* - T_4^*)$$

$$\dot{m}_{pal_dopal} = \left[c_p \dot{m}_{spal} (T_{dopal}^* - T_4^*) \right] / (W_u \cdot \eta_{dopal})$$

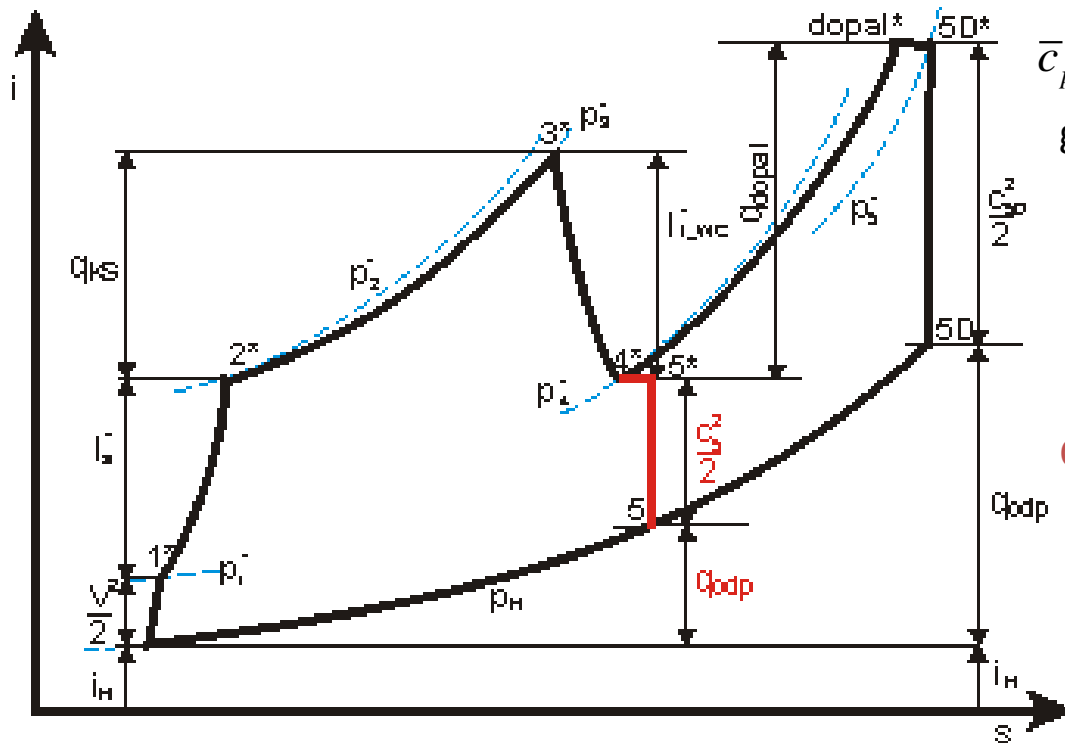
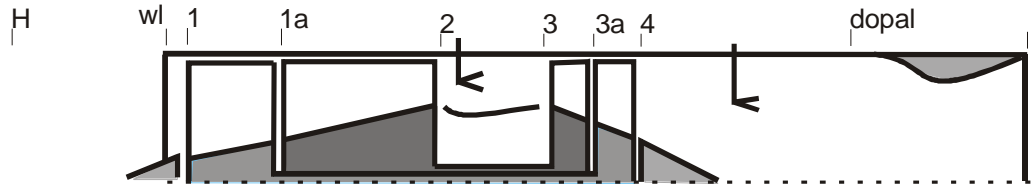
Względne zużycie paliwa

$$\tau_{dopal} = \dot{m}_{pal_dopal} / \dot{m} = \left[c_p (1 + \tau_{KS}) (T_{dopal}^* - T_4^*) \right] / (W_u \cdot \eta_{dopal})$$

Przebieg temperatury i ciśnienia wzdłuż silnika



Wykres entalpia entropia



Ciepło doprowadzone

$$\dot{Q}_{dop} = \dot{Q}_{KS} + \dot{Q}_{dopal} =$$

$$\bar{c}_p (\dot{m}_3 T_3^* - \dot{m}_2 T_2^*) + \bar{c}_p (\dot{m}_{dopal} T_{dopal}^* - \dot{m}_4 T_4^*)$$

gdzie:

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 = \dot{m} + \dot{m}_{pal_ks}$$

$$\dot{m}_{dopal} = \dot{m}_4 + \dot{m}_{pal_dopal} =$$

$$\dot{m} + \dot{m}_{pal_ks} + \dot{m}_{pal_dopal}$$

Całkowite zużycie paliwa

$$\dot{m}_{pal} = \dot{m}_{pal_dopal} + \dot{m}_{pal_ks}$$

Ciepło odprowadzone

$$\dot{Q}_{odp} = \bar{c}_p \dot{m}_{dopal} (T_5 - T_H)$$

Prędkość spalin na wyjściu z silnika

$$c_5 = \varphi_{dysz} \sqrt{2c_p T_{dopal}^* \left(1 - \left(\frac{p_5}{p_{dopal}^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right)}$$

Prędkość spalin na wylocie z dyszy wylotowej zależy od temperatury w dopalaczu oraz stosunku ciśnienia całkowitego w dyszy do ciśnienia otoczenia, na co pośrednio wpływa spręż silnika i temperatura w KS

$$k_j = f \left(H, Ma, \pi_S^*, T_3^*, T_{dopal}^* \right)$$

$$c_j = \frac{\tau_{pal}}{k_j} = f \left(H, Ma, \pi_S^*, T_3^*, T_{dopal}^* \right)$$

Ciąg silnika z włączonym i wyłączonym dopalaczem

$$C_{5_z_dopal} = \varphi_{dysz} \sqrt{2c_p T_{dopal}^* \left(1 - \left(\frac{P_5}{P_{dopal}^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right)}$$

$$C_{5_bez_dopal} = \varphi_{dysz} \sqrt{2c_p T_4^* \left(1 - \left(\frac{P_5}{P_{dopal}^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right)}$$

Dla warunków startowych i przy pominięciu wpływu zmiany ilości czynnika roboczego w silniku

Przy pominięciu wzrostu strat przepływowych i zmiany właściwości czynnika roboczego w silniku

$$\begin{aligned} K_{z_dopal} &= \dot{m} c_{5_z_dopal} \\ K_{bez_dopal} &= \dot{m} c_{5_bez_dopal} \end{aligned} \implies \frac{K_{z_dopal}}{K_{bez_dopal}} \approx \frac{C_{5_z_dopal}}{C_{5_bez_dopal}} \approx \sqrt{\frac{T_{dopal}^*}{T_4^*}}$$

T_{dopal}^*

dla współczesnych silników z dopalaczem jest na poziomie 2000K
dla wcześniejszych konstrukcji wynosiła ona ok. 1750 K

W silniku z dopalaczem wymagane jest stosowanie regulowanej dyszy wylotowej

W wyniku znaczącej zmiany gęstości strumienia po włączeniu dopalacza konieczne jest dopasowanie przekrojów minimalnych dyszy, aby spełnione były warunki wynikające z równania ciągłości, a także aby zapewnić wysokie wartości ciągu.

Z równania ciągłości przepływu dla przekroju krytycznego dyszy:

$$\dot{m} = A_{\min_bez_dopal} \left(\frac{k'+1}{2} \right)^{\frac{1}{k'-1}} \sqrt{2c_p'} \frac{p_4^* \sigma^*}{\sqrt{T_4^*}} = A_{\min_z_dopal} \left(\frac{k''+1}{2} \right)^{\frac{1}{k''-1}} \sqrt{2c_p''} \frac{p_4^* \sigma^*}{\sqrt{T_{dopal}^*}}$$

Przy pominięciu zmian wskaźników opisujących właściwości czynnika roboczego z powyższego równania otrzymuje się:

$$\frac{A_{\min_bez_dopal}}{\sqrt{T_4^*}} \approx \frac{A_{\min_z_dopal}}{\sqrt{T_{dopal}^*}} \implies \frac{A_{\min_z_dopal}}{A_{\min_bez_dopal}} \approx \sqrt{\frac{T_{dopal}^*}{T_4^*}}$$

Włączeniu dopalacza musi towarzyszyć zwiększenie pola minimalnego dyszy wylotowej proporcjonalne do wartości pierwiastka ze stosunku temperatury w dopalaczu do temperatury za turbiną

Optymalizacja obiegu silnika z dopalaczem

Maksymalizacja ciągu, ciągu jednostkowego silnika

Poszukiwanie sprężu optymalnego

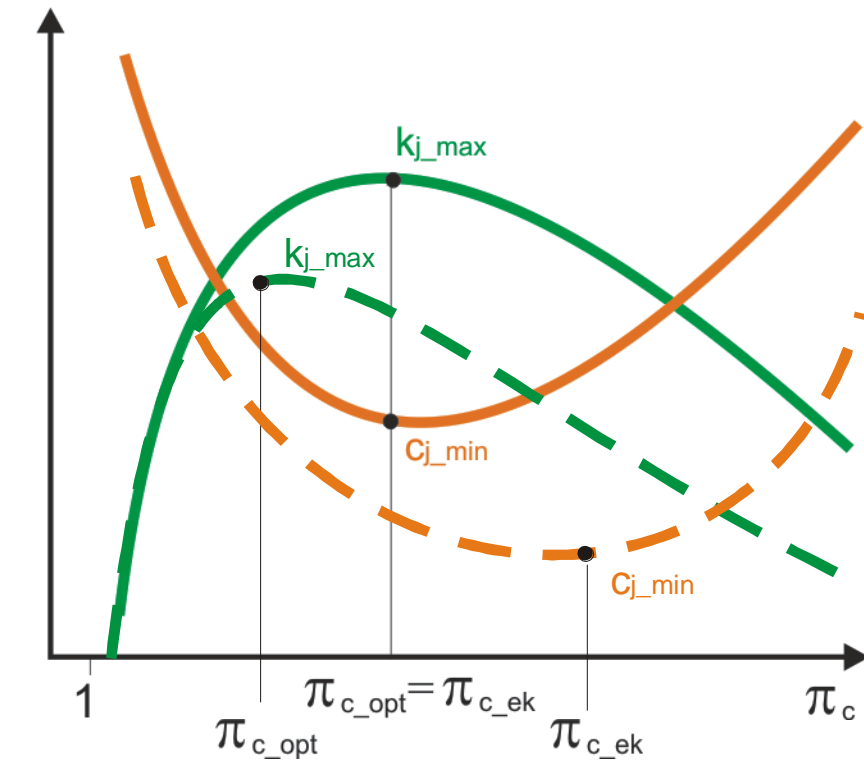
$$k_{j_max}(\pi_c, T_3^*, T_{dopal}^*) \Leftrightarrow \left. \frac{dk_j}{d\pi_c} \right|_{T_3^*, T_{dopal}^* = idem} = 0$$

Minimalizacja jednostkowego zużycia paliwa

Poszukiwanie sprężu ekonomicznego

$$c_{j_min}(\pi_c, T_3^*, T_{dopal}^*) \Leftrightarrow \left. \frac{dc_j}{d\pi_c} \right|_{T_3^*, T_{dopal}^* = idem} = 0$$

Zależność ciągu jednostkowego i jednostkowego zużycia paliwa od sprężu



Dla silnika jednoprzepływowego wyposażonego w dopalacz często jako warunki doboru sprężu przyjmuje się wartości wynikające z optymalizacji silnika pracującego z włączonym dopalaczem.

- Silnik z wyłączonym dopalaczem
- Silnik z włączonym dopalaczem

Dziękuję za uwagę