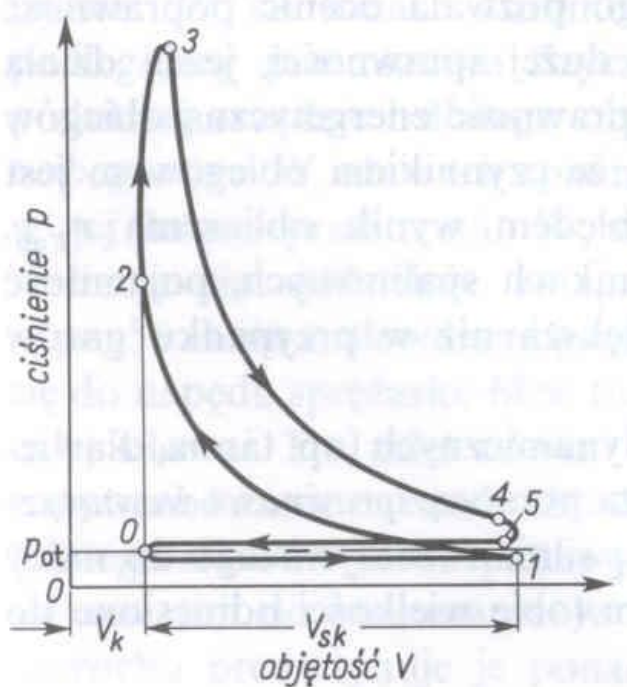
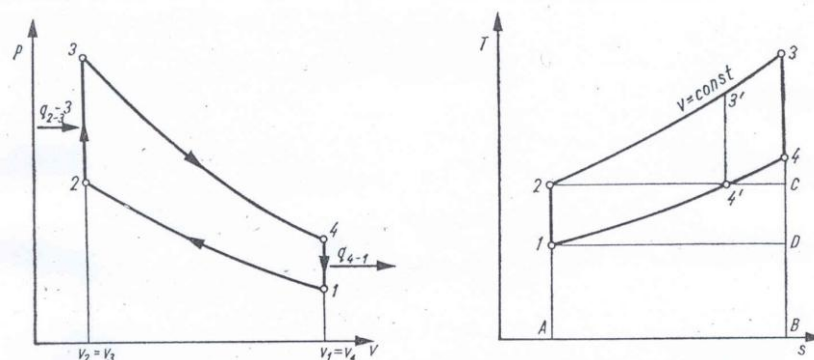


Obiegi porównawcze silników spalinowych



Rys. 1. Wykres indykatorowy silnika czterosuwowego z zapłonem iskrowym. 0-1 napełnianie cylindra mieszanką paliwa i powietrza; 1-2 kompresja mieszanki paliwa i powietrza; 2-3 zapłon mieszanki; 2-3 spalanie mieszanki; 3-4 ekspansja zamknięta spalin; 4 otwarcie zaworu wylotowego; 4-5 wypływ spalin z cylindra; 5-0 wytłaczanie reszty spalin z cylindra.

1. Silnik spalinowy z zapłonem iskrowym – obieg Otta



Rys. 2. Teoretyczny (porównawczy) obieg silnika z zapłonem iskrowym w układzie $p-v$ oraz $T-s$ (obieg Otta).

Obieg *Otta* składa się z izentropy kompresji 1-2, izochory sprężania 2-3, izentropy ekspansji 3-4 i izochory rozprężania 4-1. Praca do obiegu jest

doprowadzana podczas przemiany 1-2, a ciepło podczas przemiany 2-3. Podczas przemiany 3-4 z obiegu jest wyprowadzana praca, a podczas przemiany 4-1 wyprowadzane jest ciepło.

Sprawność termiczna obiegu

$$\eta_t = \frac{L_{ob}}{Q_d} \quad (1.1)$$

Pracę obiegu, L_{ob} , wyznaczamy z równania bilansu energii (pierwszej zasady termodynamiki)

$$L_{ob} = Q_d - |Q_w| \quad (1.2)$$

Po podstawieniu równania (1.2) do równania (1.1) dostajemy

$$\eta_t = \frac{Q_d - |Q_w|}{Q_d} = 1 - \frac{|Q_w|}{Q_d} = 1 - \frac{|q_w|}{q_d} \quad (1.3)$$

Pracę obiegu można też obliczyć jako różnicę pracy ekspansji i bezwzględnej wartości pracy kompresji

$$L_{ob} = L_{eks} - |L_{kom}| = L_{3-4} - |L_{1-2}| \quad (1.4)$$

Ciepło jednostkowe doprowadzone do obiegu to ciepło przemiany izochorycznej 2-3

$$q_d = q_{2-3} = c_v(T_3 - T_2) \quad [\text{J/kg}] \quad (1.5)$$

Ciepło jednostkowe wyprowadzone z obiegu to ciepło przemiany izochorycznej 4-1

$$|q_w| = |q_{4-1}| = c_v(T_4 - T_1) \quad [\text{J/kg}] \quad (1.6)$$

Prawe strony równań (1.5) i (1.6) podstawiamy do prawej strony równania (1.3) i wyciągamy przed nawias T_1 w liczniku oraz T_2 w mianowniku

$$\eta_t = 1 - \frac{c_v(T_4 - T_1)}{c_v(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1 \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{T_2 \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)} \quad (1.7)$$

Dla izentrop 1-2 oraz 3-4

$$\frac{T_3}{T_4} = \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{\kappa-1} \quad (1.8)$$

Z (1.8)

$$\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2} \quad (1.9)$$

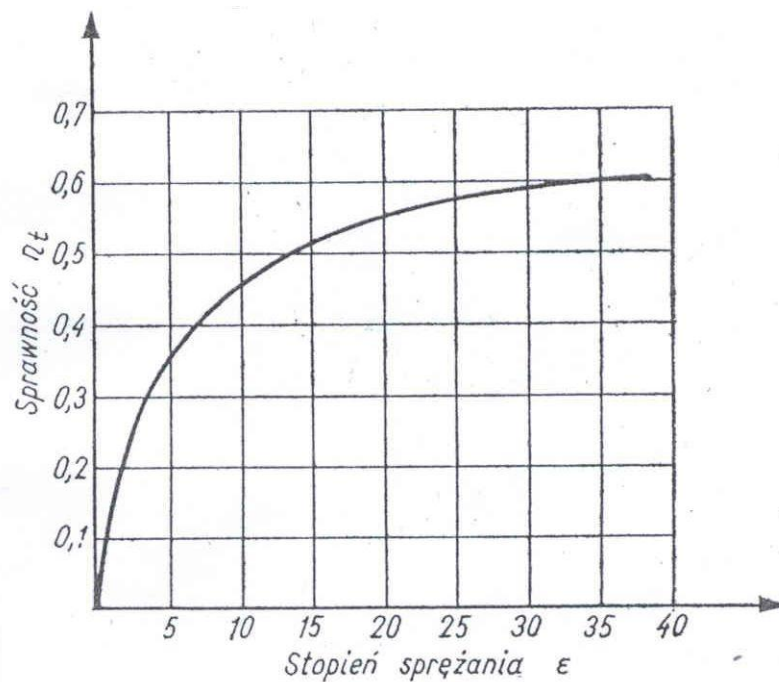
Kolejno podstawiamy prawe strony równań (1.9) i (1.8) do (1.7)

$$\eta_t = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{\kappa-1} \quad (1.10)$$

$$\frac{v_1}{v_2} = \varepsilon \quad (1.11)$$

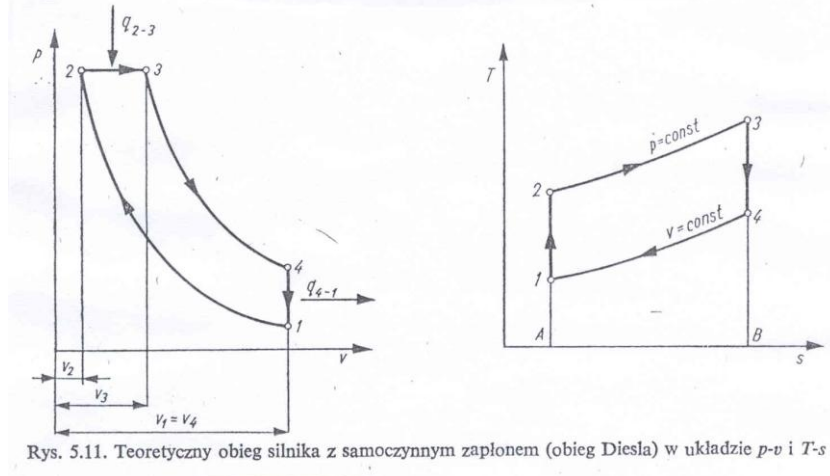
ε - stopień sprężania (typowe wartości dla silników z zapłonem iskrowym: 7-10)

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \quad (1.12)$$



Rys. 3. Zależność sprawności termicznej obiegu *Otta* od stopnia sprężania (równanie 1.12)

2. Silnik spalinowy z zapłonem samoczynnym – obieg Diesela



Rys. 5.11. Teoretyczny obieg silnika z samoczynnym zapłonem (obieg Diesela) w układzie $p-v$ i $T-s$

$$\eta_t = 1 - \frac{|q_w|}{q_d} = 1 - \frac{c_v(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{1}{\kappa} \frac{T_1 \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{T_2 \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)} \quad (2.1)$$

Dla izentropy 1-2

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{\kappa-1} = \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \quad (2.2)$$

ε - stopień sprężania (typowe wartości dla silników z zapłonem samoczynnym 12-20)

Dla izobary 2-3

$$\boxed{\frac{T_3}{T_2} = \frac{v_3}{v_2} = \varphi} \quad (2.3)$$

φ - stosunek obciążenia

$$\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_4}{T_3} \frac{T_3}{T_2} \frac{T_2}{T_1} \quad (2.4)$$

Dla izentropy 3-4

$$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{v_3}{v_4} \right)^{\kappa-1} = \left(\frac{v_3}{v_2} \frac{v_2}{v_4} \right)^{\kappa-1} = \left(\frac{\varphi}{\varepsilon} \right)^{\kappa-1} \quad (2.5)$$

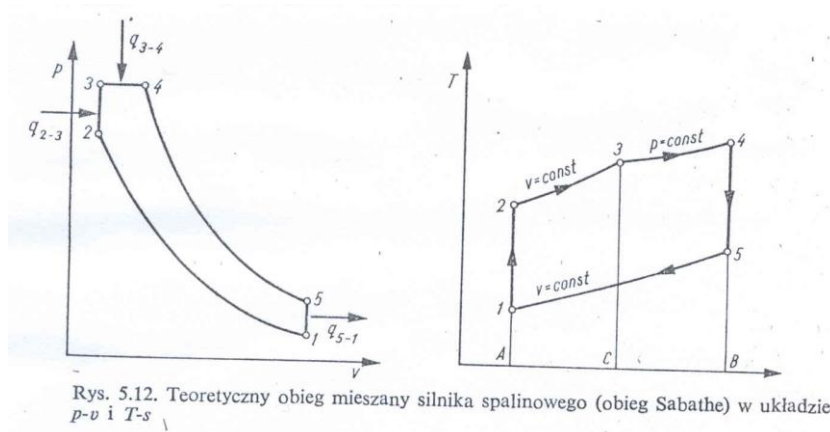
(2.2), (2.3) i (2.5) do (2.4)

$$\frac{T_4}{T_1} = \left(\frac{\varphi}{\varepsilon}\right)^{\kappa-1} \cdot \varphi \cdot \varepsilon^{\kappa-1} = \varphi^{\kappa} \quad (2.6)$$

(2.2), (2.6) i (2.3) do (2.1)

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \cdot \frac{\varphi^{\kappa} - 1}{\varphi - 1} \quad (2.7)$$

3. Silnik spalinowy z zapłonem samoczynnym z wtryskiem paliwa za pomocą pompek – obieg Sabathe



$$\eta_t = 1 - \frac{|q_w|}{q_{d1} + q_{d2}} \quad (17)$$

$$q_{d1} = c_v(T_3 - T_2) \quad (18)$$

$$q_{d2} = c_p(T_4 - T_3) \quad (19)$$

$$|q_w| = c_v(T_5 - T_1) \quad (20)$$

(18)-(20) do (17)

$$\begin{aligned} \eta_t &= 1 - \frac{c_v(T_5 - T_1)}{c_p(T_4 - T_3) + c_v(T_3 - T_2)} \\ &= 1 - \frac{T_5 - T_1}{T_3 - T_2 + \kappa(T_4 - T_3)} \end{aligned} \quad (21)$$

Dla izobary (3)-(4)

$$\boxed{\frac{T_4}{T_3} = \frac{v_4}{v_3} = \varphi} \quad (22)$$

φ - stosunek obciążenia

$$\boxed{\frac{p_3}{p_2} = \alpha} \quad (23)$$

α - stopień przyrostu ciśnienia

$$\boxed{\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \cdot \frac{\alpha\varphi^\kappa - 1}{\alpha - 1 + \kappa\alpha(\varphi - 1)}} \quad (24)$$

SPRAWNOŚĆ SILNIKÓW SPALINOWYCH

Sprawność termiczna obiegu teoretycznego (porównawczego)

$$\eta_{ob} = \frac{L_{ob}}{Q_d} = \frac{N_{ob}}{\dot{Q}_d} \quad (1)$$

Sprawność wewnętrzna silnika

$$\eta_i = \frac{N_i}{N_{ob}} \quad (2)$$

N_i – moc wewnętrzna (wykresowa)

Sprawność mechaniczna silnika

$$\eta_m = \frac{N_e}{N_i} \quad (3)$$

N_e – moc efektywna (na wale; na sprzęgle)

Sprawność ogólna silnika

$$\eta_e = \frac{N_e}{\dot{Q}_d} \quad (4)$$

$$\eta_e = \frac{N_{ob}}{\dot{Q}_d} \cdot \frac{N_i}{N_{ob}} \cdot \frac{N_e}{N_i} = \eta_{ob}\eta_i\eta_m \quad (5)$$