

9. PROCESI U CILINDRIMA MOTORA SUI

U poglavlju 1.3. Klasifikacija brodskih motora, rečeno je da se motori s unutrašnjim izgaranjem, s obzirom na teoretski proces koji se odvija u radnom cilindru, mogu podijeliti na Ottov, Dieselov i Sabathéov (Seiligerov) proces. Zatim je bilo riječi o pV - dijagramima tih procesa, a da se nismo upuštali u njihovu analizu.

9.1 Ottov proces prikazan u dijagramu pV i TS

Osnovna je karakteristika Ottova procesa da se goriva smjesa stvara izvan cilindra pri temperaturi koja se mnogo ne razlikuje od temperature okoline. Motor ima ugrađeni ispušni i usisni ventil na glavi motora, a za pripremu gorive smjese rasplinjač. Za rad tog motora pogodna su sva lako hlapljiva goriva, npr. sve vrste benzina, alkoholi i neki plinovi. Nedostatak oto-motora je usisavanje gorive smjese u radni cilindar jer je zbog kompresije (drugi takt) te smjese ograničen kompresijski prostor $\left(\varepsilon = \frac{V_1}{V_2}\right)$, da ne bi nastupilo samozapaljenje goriva.

Gorivo se pali električnom iskrom koja se u određenom trenutku stvara između elektroda svjećice. Kompresijski omjer kod ovih motora iznosi od 4 : 1 do 12 : 1. Omjer kompresije iznad 10 odnosi se na oto-motore kod kojih se komprimira čisti zrak, a gorivo se uštrcava u radni cilindar slično kao i kod dizel-motora. Neki plinovi (npr. metan) mogu se upotrijebiti kod kompresijskog omjera veličine dizel-motora, a da ne nastupi detonacija pri izgaranju u radnom cilindru.

Kod oto-procesa (pV -dijagram, sl.9.1) smjesa goriva i zraka ulazi u volumen radnog cilindra:

$$V_1 = \frac{D_2 \cdot \pi}{4} \cdot s + V_k = V_s + V_k.$$

Teorijski, smjesa ulazi u radni cilindar pri konstantnom atmosferskom tlaku ($p_a = \text{konst.}$ -klasični motor), a sve promjene procesa vrše se za vrijeme četiri hoda stapa, odnosno dva okreta koljenastog vratila. Adijabatska kompresija smjese vrši se po krivulji 1—2, a radnja utrošena za vršenje kompresije označena je površinom između točaka 1—2—2'—1. Utrošena radnja matematički se može odrediti iz izraza:

$$W_k = \frac{1}{K-1} \cdot p_1 \cdot V_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{K-1}{K}} - 1 \right] [\text{kJ}].$$

Za vrijeme promjene volumena od V_1 na V_2 mijenja se stanje od

$$m_1 \cdot R \cdot T_1 = p_1 \cdot V_1$$

na

$$m_1 \cdot R \cdot T_2 = p_2 \cdot V_2$$

Masa usisana u cilindar volumena V_1 , tlaka p_1 i temperature T_1 iznosi:

$$m_1 = V_1 \rho_1 = \frac{p_1}{RT_1} \cdot V_1 \text{ kg}$$

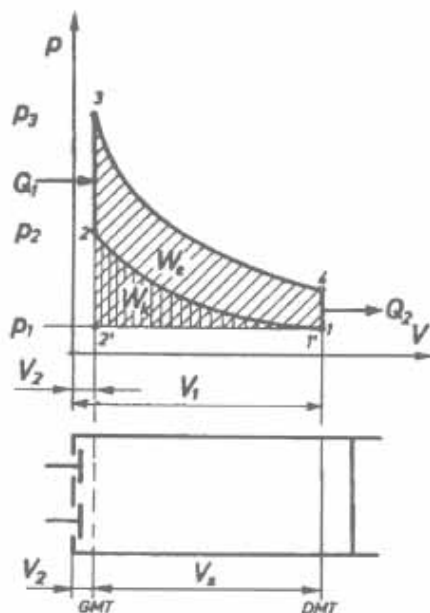
Adijabatski, konačni tlak može se odrediti po jednadžbi:

$$p_1 \cdot V_1^k = p_2 \cdot V_2^k,$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^k; \quad p_2 = p_1 \cdot \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^k; \quad p_2 = p_1 \cdot \varepsilon^k,$$

a konačna temperatura kompresije prema izrazu:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} \quad \text{ili} \quad T_2 = T_1 \cdot \varepsilon^{k-1}.$$



Sl. 9.1. Ottov proces u pV-dijagramu

Kompresijski omjer je odnos početnog i konačnog volumena

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_k + V_s}{V_k} = 1 + \frac{V_s}{V_k}.$$

Goriva smjesa koja se pali u kompresijskom prostoru $V_2 = V_k$ oslobađa toplinu Q_1 tako da se povećava tlak od p_2 na p_3 i temperatura od T_2 na T_3 . Teorijski, gorivo izgara trenutno, tj. kod konstantnog volumena V_2 . Temperatura u točki 3 može se odrediti prema izrazu:

$$Q_1 = c_v \cdot (T_3 - T_2) \text{ kJ}; \quad T_3 = T_2 + \frac{Q_1}{c_v},$$

c_v kJ/kg K — specifična toplina kod konstantnog volumena.

Tlak u točki 3 pV-dijagrama iz omjera jednadžbi stanja:

$$\frac{m \cdot R \cdot T_3}{m \cdot R \cdot T_2} = \frac{p_3 \cdot V_2}{p_2 \cdot V_2}, \quad p_3 = p_2 \cdot \frac{T_3}{T_2} = p_2 \cdot \frac{T_2 + \frac{Q_1}{c_v}}{T_2} = p_2 \cdot \left(1 + \frac{Q_1}{T_2 \cdot c_v}\right),$$

$$p_3 = p_1 \cdot \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^k \cdot \frac{T_3}{T_2} = p_1 \cdot \varepsilon^k \left(1 + \frac{Q_1}{T_2 \cdot c_v}\right) = p_1 \cdot \varepsilon^k \left(1 + \frac{Q_1}{c_v \cdot T_1 \cdot \varepsilon^{k-1}}\right) \text{ Pa.}$$

Prirast tlaka p_2 na p_3 upravo je razmjernan dovedenoj količini topline Q_1 , a obrnuto razmjernan omjeru kompresije ε , početnoj temperaturi T_1 i specifičnoj toplini pri konstantnom volumenu c_v ($V_2 = \text{konst.}$), odnosno tlaku p_1/p_2 , a dan je izrazom:

$$\frac{p_3}{p_2} = \frac{T_3}{T_2} = \xi.$$

Plinovi od točke 3 (GMT) ekspandiraju adijabatski po krivulji ($\delta = \text{delta}$) 3—4 do točke 4 (DMT) ponovno na volumenu V_1 , tlak p_4 i temperaturu T_4 prema izrazu:

$$p_3 \cdot V_2^k = p_4 \cdot V_1^k; \quad p_4 = p_3 \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^k = p_3 \cdot \frac{1}{\varepsilon^k}.$$

Temperatura točke 4 može se odrediti izrazom:

$$T_4 = T_3 \cdot \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{k-1} = T_3 \cdot \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \text{ kJ.}$$

Ekspanzija i kompresija vrše se na istoj promjeni volumena ($V_1 \rightarrow V_2 \rightarrow V_1$), pa je stupanj ekspanzije δ jednak stupnju kompresije predočene u pV-dijagramu 3—4—1—2' i dobiva se izrazom:

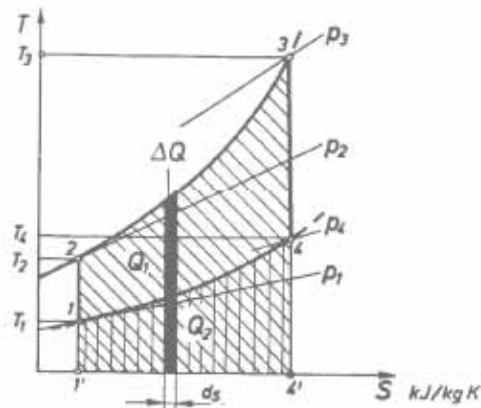
$$W_e = \frac{1}{k-1} \cdot p_3 \cdot V_2 \left[1 - \left(\frac{p_4}{p_3}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right].$$

Radnja ekspanzije veća je od radnje kompresije: $W_e > W_k$, a korisna radnja je razlika između te dvije radnje, tj:

$$W = W_e - W_k$$

9.2 Ottov proces u TS-dijagramu

Iz pV -dijagrama bilo je moguće očitati promjene stanja radnog medija u kružnom procesu i odrediti radnju kompresije i ekspanzije. Međutim, sadržaj i promjenu topline za vrijeme trajanja procesa moguće je pratiti i odrediti samo pomoću TS -dijagrama (sl. 9.2). Zbog složenosti ovog dijagrama on je crtan u slobodnoj veličini, a krivulja adijabatske kompresije 1—2 predočena je s manjom dužinom od krivulje adijabatske ekspanzije 3—4, da bi se moglo lakše uočiti da je adijabatska radnja ekspanzije plinova veća od adijabatske radnje kompresije čistog zraka ($W_e > W_k$). Tlak za vrijeme kompresije poraste od p_1 na p_2 , a zbog dovođenja topline Q_1 , pri konstantnom volumenu ($V_2 = \text{konst.}$) 2—3, tlak će porasti od p_2 na p_3 . Adijabatskom ekspanzijom plinova 3—4 tlak plinova će pasti od vrijednosti p_3 na vrijednost p_4 . Toplina se odvodi iz procesa pri konstantnom volumenu ($V_4 = V_1$), točka 4—1.



Sl. 9.2. Ottov proces u TS-dijagramu

Dovedena količina topline Q_1 predočena je površinom ,2-3-4-4'-1'-2 može se odrediti izrazom:

$$Q_1 = \frac{H_d}{\lambda \cdot Z_0 + 1} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

Dovedena toplina upravo je razmjerna donjoj ogrjevnoj moći goriva, a obrnuto razmjerna stehiometrijskoj količini zraka za njegovo izgaranje i pretičku zraka.

Toplina se dovodi pri $c_v = \text{konst.}$ pa se temperatura u točki 3 može odrediti prema izrazu:

$$Q_1 = c_v \cdot (T_3 - T_2); \quad T_3 = T_2 + \frac{Q_1}{c_v},$$

$$T_3 = T_1 \cdot \varepsilon^{k-1} + \frac{Q_1}{c_v},$$

jer se temperatura za vrijeme procesa povisila s T_1 na T_2 prema poznatoj jednadžbi

$$T_2 = T_1 \cdot \varepsilon^{k-1}.$$

Za vrijeme ekspanzije temperatura pada od T_3 na T_4 :

$$T_4 = \frac{T_3}{\varepsilon^{k-1}} = \frac{T_1 \cdot \varepsilon^{k-1} + \frac{Q_1}{c_v}}{\varepsilon^{k-1}} = T_1 + \frac{Q_1}{c_v \cdot \varepsilon^{k-1}}.$$

Toplina odvedena iz procesa pri $V_1 = \text{konst.}$ prikazana je u TS -dijagramu površinom koja je zatvorena točkama 1—4—4'—1—1':

$$Q_2 = c_v \cdot (T_4 - T_1).$$

Odnosi temperatura između točaka $\frac{T_3}{T_2}$ i $\frac{T_4}{T_1}$ u isti:

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{T_2 + \frac{Q_1}{c_v}}{T_2} = 1 + \frac{Q_1}{c_v \cdot T_1 \cdot \varepsilon^{k-1}} = \xi,$$

$$\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_1 + \frac{Q_1}{c_v \cdot \varepsilon^{k-1}}}{T_1} = 1 + \frac{Q_1}{c_v \cdot T_1 \cdot \varepsilon^{k-1}} = \xi,$$

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{T_4}{T_1} = \xi.$$

ξ (ksi) - odnos termodinamičkih temperatura u točkama $\frac{3}{2}$ i $\frac{4}{1}$.

9.3 Toplinski stupanj djelovanja Ottova procesa

Za sve toplinske strojeve toplinski stupanj djelovanja je odnos između dobivenog rada i uložene topline. Razlika između dovedene topline procesu Q_1 i odvedene iz procesa Q_2 bit će u rad pretvorena toplina.

$$Q = Q_1 - Q_2.$$

Toplinski je stupanj:

$$\eta_t = \frac{Q}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}.$$

Uvedena toplina u procesu:

$$Q_1 = c_v \cdot (T_3 - T_2).$$

Odvedena toplina iz procesa:

$$Q_2 = c_v \cdot (T_4 - T_1),$$

pa proizlazi:

$$\eta_i = 1 - \frac{c_v \cdot (T_4 - T_1)}{c_v \cdot (T_3 - T_2)}.$$

Pretpostavimo li da je c_v pri dovođenju i odvođenju topline jednako, onda je:

$$\eta_i = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2},$$

$$\eta_i = 1 - \frac{\left(T_1 + \frac{Q_1}{c_v \cdot \epsilon^{k-1}}\right) - T_1}{\left(T_1 \cdot \epsilon^{k-1} + \frac{Q_1}{c_v}\right) - T_1 \cdot \epsilon^{k-1}} = 1 - \frac{1}{\epsilon^{k-1}}.$$

Isti rezultat može se dobiti ako se uzme:

$$T_4 = T_3 \cdot \frac{1}{\epsilon^{k-1}} \text{ i } T_2 = T_1 \cdot \epsilon^{k-1},$$

$$\eta_i = \frac{\frac{T_3}{\epsilon^{k-1}} - T_2}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{1}{\epsilon^{k-1}}.$$

Toplinski stupanj djelovanja ovisi o omjeru kompresije (ϵ) i eksponentu adijabatske promjene stanja (k). Pretpostavimo li da je k konstantna vrijednost, onda omjer kompresije jedini utječe na toplinski stupanj djelovanja oto-motora. Što je ϵ veći, i toplinski stupanj djelovanja (η_i) je veći, jer se on pojavljuje kao djelitelj u zadnjem izrazu za η_i . Kod oto-motora konačna temperatura ograničena je na približno 350 °C i ne smije biti jednaka niti viša od one kod koje nastupa samozapaljenje

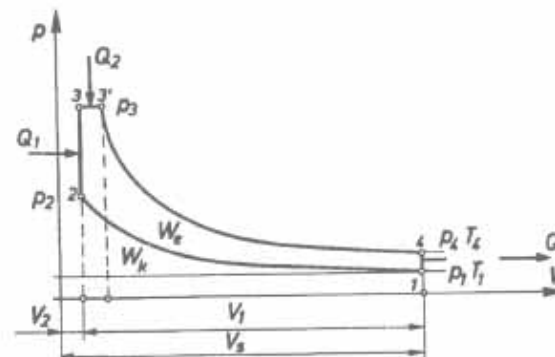
$$T_2 = T_1 \cdot \epsilon^{k-1}$$

komprimirane gorive smjese, jer bi ranijim paljenjem goriva moglo doći do nepoželjnih posljedica, kao npr. do vraćanja motora u suprotan smjer gibanja, do loma stapa, ojnice ili glave motora.

9.4 Sabathéov proces u dijagramu pV i TS

Kod suvremenih dizel-motora proces izgaranja u radnom cilindru traje od 40 do 2 tisućinke sekunde (ms). Gorivo se u radni cilindar uvodi nešto prije GMT i kao posljedica toga je da u početku izgara pri konstantnom volumenu, a pri kraju pri konstantnom tlaku.

Sabathéov ili Seiligerov [Zajliger] proces je udruženi proces Otta i Diesela. Slikom 9.3. prikazan je pV -dijagram Sabathéova procesa. Stap adijabatski komprimira čisti zrak po krivulji 1—2 od V_1 na V_2 , pri čemu poraste tlak od p_1 na $p_2 = p_1 \cdot \epsilon^k$ Pa, a temperatura od T_1 na $T_2 = T_1 \cdot \epsilon^{k-1}$ K.



Sl. 9.3. Sabathéov proces u pV -dijagramu

Teorijski, u GMT dovodi se toplina kod $V = \text{konst}$; temperatura poraste od T_2 na T_3 zbog dovođenja topline po izolaciji.

$$Q_1 = c_v \cdot (T_3 - T_2) \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right].$$

Temperatura T_3 ima izraz:

$$T_3 = T_2 + \frac{Q_1}{c_v} = T_1 \cdot \epsilon^{k-1} + \frac{Q_1}{c_v} \text{ [K]}.$$

Budući da se pri $V_2 = \text{konst}$. mijenja stanje od

$$p_v \cdot V_2 = m \cdot R \cdot T_2 \text{ u } p_3 \cdot V_3 = m \cdot R \cdot T_3,$$

bit će

$$\frac{p_3}{p_2} = \frac{T_3}{T_2}; \quad p_3 = p_1 \cdot \left(\epsilon^k + \epsilon \cdot \frac{Q_1}{c_v \cdot T_1} \right) \text{ [Pa]}.$$

Tlak p_3 bit će veći ako je dovedena toplina Q_1 veća. Kada se u točki 3 postigne najveći tlak (do 150 MPa), dovodi se ostatak topline Q_2 pri konstantnom tlaku ($p_3 = \text{konst.}$).

$$Q_d = Q_1 + Q_2.$$

Volumen poraste od V_2 na V_3' , a temperatura od T_3 na T_3'

$$\frac{T_3'}{T_3} = \frac{V_3'}{V_2} = \rho \cdot T_3' = T_3 \cdot \rho.$$

Uvrstimo li za T_3 izraz $T_3 = T_2 \cdot \frac{p_3}{p_2}$ i $\frac{p_3}{p_2} = \xi$, dobivamo da je

$$T_3' = T_2 \cdot \xi \cdot \rho = T_1 \cdot \varepsilon^{k-1} \cdot \xi \cdot \rho = \left(T_1 \cdot \varepsilon^{k-1} + \frac{Q_1}{c_v} \right) \cdot \rho.$$

S obzirom da je Q_2 dovedena toplina pri $p_3 = \text{konst.}$, mora biti

$$Q_2 = c_p(T_3' - T_3),$$

odakle proizlazi:

$$T_3' = T_3 + \frac{Q_2}{c_p} = \left(T_1 \cdot \varepsilon^{k-1} + \frac{Q_1}{c_v} \right) + \frac{Q_2}{c_p}.$$

Odnos $\frac{V_3'}{V_2} = \rho$. Pri $p = \text{konst.}$, Q_2 je veći, a Q_1 manji. kod Dieselova procesa

$Q_1 = 0$, a $Q_2 = Q_1$. Nakon završetka izgaranja (postiže se najveća temperatura $T_3' = T_3 \cdot \rho$ nastupa ekspanzija plinova. Stupanj adijabatske ekspanzije je:

$$\delta = \frac{\varepsilon}{\rho} \left(\frac{V_1}{V_3'} = \frac{V_2}{V_3'} = \frac{V_1}{V_3'} \right).$$

Tlak je na kraju ekspanzije (točka 4 u dijagramu).

$$p_4 = \frac{p_3}{\delta^k} \text{ [Pa]},$$

a temperatura T_4 , na kraju ekspanzije po adijabati 3'—4', određena je izrazom:

$$T_4 = \frac{T_3'}{\delta^{k-1}} = \frac{T_3 \cdot \rho}{\delta^{k-1}} = \frac{T_2 \cdot \xi \cdot \rho}{\delta^{k-1}} = T_1 \cdot \frac{\varepsilon^{k-1}}{\delta^{k-1}} \cdot \xi \cdot \rho.$$

Budući da je

$$\delta \cdot \rho = \varepsilon \text{ odnosno } \rho = \frac{\varepsilon}{\delta},$$

bit će

$$T_4 = T_1 \cdot \rho^k \cdot \xi.$$

Izvršeni rad jednak je zbroju radova ispod krivulje 3 — 3' i 3' — 4 smanjenom za rad kompresije ispod krivulje 1 — 2.

$$W_1 = p_3 \cdot (V_3 - V_2) \text{ kJ},$$

$$W_2 = \frac{1}{k-1} \cdot p_3 \cdot V_3 \left[1 - \left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \text{ [kJ]},$$

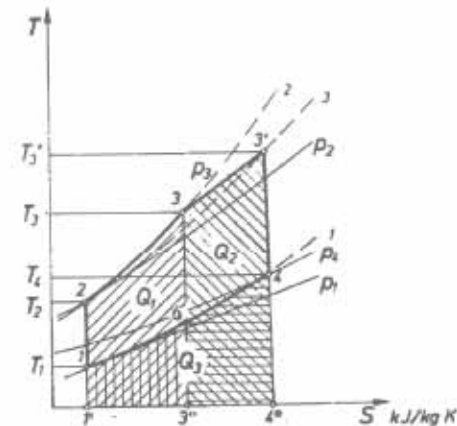
$$W_k = \frac{1}{k-1} \cdot p_1 \cdot V_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \text{ [kJ]}.$$

Vanjski rad je dakle:

$$W = W_1 + W_2 - W_k \text{ [kJ]},$$

Ako se sve tri jednačbe podijele masom m radnog medija i svedu na 1 kg, imamo izraz:

$$W = p_3 \cdot (v_3 - v_2) + \frac{1}{k-1} \cdot p_3 \cdot v_3 \left[1 - \left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] - \frac{1}{k-1} \cdot p_1 \cdot v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$



Sl. 9.4. Sabathéov proces u TS-dijagramu

U TS-dijagramu (sl. 9.4) prikazan je Sabathéov proces, a sve oznake i njihova značenja ista su kao i u pV -dijagramu (sl. 9.3). Adijabatskom kompresijom 1—2 povećava se tlak zraka od p_1 na p_2 :

$$p_2 = p_1 \cdot \varepsilon^k,$$

a temperatura od T_1 na T_2 :

$$T_2 = T_1 \cdot \varepsilon^{k-1}.$$

Između točka 2—3 dovodi se toplina Q_1 pri $v = \text{konst.}$ Ta je toplina preočena zatvorenom plohom 2—3—5—1. Količina topline Q_1 za jedan kg radnog medija je

$$Q_1 = c_v \cdot (T_3 - T_2).$$

Temperatura T_3 je

$$T_3 = T_2 + \frac{Q_1}{c_v} = T_1 \cdot \varepsilon^{k-1} + \frac{Q_1}{c_v}.$$

Tlak u točki 3 zbog porasta temperature je:

$$\frac{p_3}{p_2} = \frac{T_3}{T_2} = \xi = \frac{T_2 + \frac{Q_1}{c_v}}{T_2} = 1 + \frac{Q_1}{c_v \cdot T_1 \cdot \varepsilon^{k-1}}.$$

Najviši tlak p_3 procesa ovisi o dovedenoj količini topline Q_1 i kompresijskom omjeru ε . Između točaka 3—3' dovodi se količinom topline Q_2 pri $p = \text{konst.}$ Ta količina topline zadana je površinom 3—3'—4—5—3". Toplina Q_2 može se odrediti izrazom:

$$Q_2 = c_p \cdot (T_3' - T_3).$$

Najviša će temperatura biti:

$$T_3' = T_3 + \frac{Q_2}{c_p} = \left(T_1 \cdot \varepsilon^{k-1} + \frac{Q_1}{c_v} \right) + \frac{Q_2}{c_p} \text{ [K]}.$$

Budući da je Poissonov [Poisson] koeficijent $\frac{c_p}{c_v} = k$, izraz za ρ glasi:

$$\rho = 1 + \frac{Q_2}{c_p \cdot T_1 \cdot \varepsilon^{k-1} + k \cdot Q_1}.$$

Promjena volumena $\frac{V_3'}{V_3} = \rho$ ovisi o razlici dovedenih toplina Q_1 i Q_2 .

Između točaka 3'—4 prikazana je adijabatska ekspanzija od v_3 na v_4 i pad tlaka od p_3' na $p_4 = p_1$, te pad temperature od T_3' na T_4 . Temperatura u točki 4 može se odrediti izrazom:

$$T_4 = T_1 \cdot \rho^{k-1} + \frac{1}{\delta^{k-1}} \cdot \left(\frac{Q_1}{c_v} + \frac{Q_2}{c_p} \right) \text{ [K]}.$$

Odvedena toplina Q_3 jednaka je

$$Q_3 = c_v \cdot (T_4 - T_1) \quad T_4 = T_1 + \frac{Q_3}{c_v}.$$

$$T_1 + \frac{Q_3}{c_v} = T_1 \cdot \rho^{k-1} + \frac{1}{\delta^{k-1}} \cdot \left(\frac{Q_1}{c_v} + \frac{Q_2}{c_p} \right),$$

$$Q_3 = c_v \cdot \left[T_1 \cdot \left(\rho^{k-1} + \frac{1}{\delta^{k-1}} \cdot \left(\frac{Q_1}{c_v} + \frac{Q_2}{c_p} \right) \right) \right] - T_1 \cdot c_v,$$

$$Q_3 = \left[c_v \cdot T_1 \cdot \rho^{k-1} + \frac{1}{\delta^{k-1}} \cdot \left(Q_1 + \frac{Q_2}{k} \right) \right] - T_1 \cdot c_v,$$

$$Q_3 = \left[c_v \cdot T_1 \cdot \rho^{k-1} + \frac{1}{\rho^{k-1}} \cdot \frac{Q_1 k + Q_2}{k} \right] - T_1 \cdot c_v.$$

Količina odvedene topline Q_3 ovisi osim o dovedenim toplotama Q_1 i Q_2 još i o veličinama ρ i δ . Ona raste s porastom ρ i smanjenjem δ i obratno. Uz nepromijenjeni eksponent adijabate k , odvedena toplina Q_3 je veća ako su dovedene topline Q_1 i Q_2 veće.

Faktor uz Q_1 pokazuje da veličina dovedene topline Q_1 pri $v = \text{konst.}$ ima k -puta veći utjecaj na odvedenu toplinu Q_3 , nego dovedena Q_2 pri $p = \text{konst.}$

Kako je koeficijent ekspanzije odnos između omjera kompresije i povećanja volumena pri dovođenju topline Q_2 , tj.

$$\delta = \frac{\varepsilon}{\rho},$$

možemo pisati:

$$Q_3 = c_v \cdot T_1 \cdot (\rho^{k-1} - 1) + \frac{\rho^{k-1}}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{Q_1 \cdot k \cdot Q_2}{k}.$$

Odvedena toplina bit će veća kod povećanog ρ , a manja s povećanjem ε .

9.5 Toplinski stupanj djelovanja Sabathéova procesa

Toplina pretvorena u rad jednaka je razlici između dovedenih toplina Q_1 i Q_2 i odvedene topline Q_3 , tj.

$$W = (Q_1 + Q_2) - Q_3,$$

$$W = \left[c_v \cdot (T_3 - T_2) - c_p \cdot (T_3' - T_3) \right] - c_v \cdot (T_4 - T_1).$$

Izraz za toplinski stupanj djelovanja glasi:

$$\eta_t = \frac{Q_{\text{ot}}}{Q} = \frac{(Q_1 + Q_2) - Q_3}{Q_1 + Q_2} = 1 - \frac{Q_3}{Q_1 + Q_2}.$$

Uvrstimo li u izraz za η_t vrijednost za toplinu, dobit ćemo:

$$\eta_t = 1 - \frac{c_v \cdot (T_4 - T_1)}{c_v \cdot (T_3 - T_2) + c_p \cdot (T_3' - T_2)}.$$

Dijeljenjem drugog člana u razlomku, nazivnika i brojnika sa c_v proizlazi:

$$\eta_t = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2 + k \cdot (T_3' - T_2)}.$$

Temperaturne vrijednosti u pojedinim točkama već su određene i one glase:

$$T_2 = T_1 \cdot \varepsilon^{k-1},$$

$$T_3 = T_1 \cdot \varepsilon^{k-1} \cdot \xi,$$

$$T_3' = T_1 \cdot \varepsilon^{k-1} \cdot \xi \cdot \rho,$$

$$T_4 = T_1 \cdot \xi \cdot \rho^k.$$

Razlike temperatura su:

$$T_4 - T_1 = T_1 \cdot \xi \cdot (\rho^k - 1),$$

$$T_3 - T_2 = T_2 \cdot (\xi - 1) = T_1 \cdot \varepsilon^{k-1} \cdot (\xi - 1),$$

$$T_3' - T_3 = T_3 \cdot (\rho - 1) = T_1 \cdot \varepsilon^{k-1} \cdot \xi \cdot (\rho - 1),$$

Uvrstimo li ove vrijednosti, dobiva se:

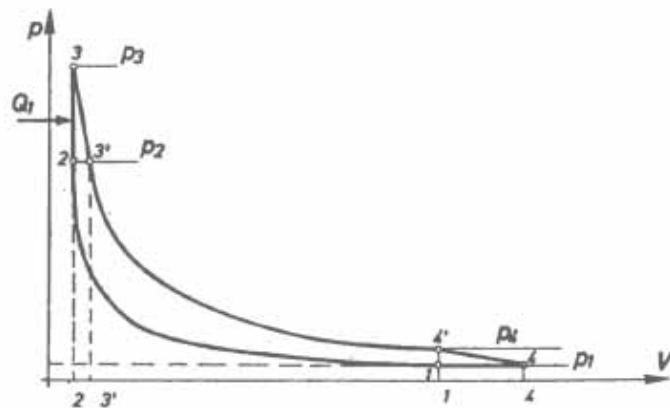
$$\eta_n = 1 - \frac{(\xi \cdot \rho^k - 1)}{\varepsilon^{k-1} \cdot [(\xi - 1) + k \cdot \xi(\rho - 1)]}.$$

Toplinski stupanj djelovanja ovog procesa bit će povoljniji što je omjer kompresije ε veći i što je odnos porasta tlaka ξ veći. Naime, veća vrijednost drugog člana jednadžbe umanjuje vrijednost toplinskog stupnja djelovanja. Odnos porasta volumena $\frac{V_3'}{V_3} = \rho$ za vrijeme dodavanja dijela količine topline pri $p = \text{konst.}$

zmanjuje toplinski stupanj djelovanja jer se on u jedndžbi nalazi na k -potenciji. Ako nastupi zakašnjenje paljenja zbog loše kvalitete goriva, odnos volumena $\frac{V_3'}{V_3} = \rho$ bit će sve veći, a toplinski stupanj (η_n) sve manji. Idealno bi bilo kad bi

se proces odvijao bez dovođenja topline pri $p = \text{konst.}$ (pV -dijagram, sl. 9.5). U tom slučaju imali bismo:

$$\eta_i = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot k \cdot \frac{\xi^k - 1}{\xi - 1}.$$



Sl. 9.5. Idealni pV -dijagram Sabathéova procesa

Kod ovog procesa ne vrijede uvjeti postavljeni za oto-motore, tj. da je $\delta = \varepsilon$, jer je $\delta = \frac{V_4}{V_2} > \varepsilon = \frac{V_1}{V_2}$. Faktor ξ i δ međusobno su povezani pri zadanom V_1 i V_2 jer je

$$p_3 \cdot V_2^k = p_1 \cdot V_4^k; \quad p_3 = \xi \cdot p_2 = \xi \cdot p_1 \cdot \varepsilon^k;$$

$$\delta = \left(\frac{p_1 \cdot \xi \cdot \varepsilon^k}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}} = \xi^{\frac{1}{k}} \cdot \varepsilon;$$

$$\frac{V_4}{V_2} = \delta = \left(\frac{p_3}{p_2} \right)^{\frac{1}{k}}; \quad V_4 = V_2 \cdot \delta = \delta \cdot \frac{V_1}{\varepsilon} = \xi^{\frac{1}{k}} \cdot V_1.$$

Kod motora SUI ekspanzija se ne može voditi tako daleko da tlak padne od p_3 na p_1 , jer bi u tom slučaju volumen cilindra bio vrlo velik. Nastavak ekspanzije plinova i iskorištavanje njihove potencijalne i kinetičke energije danas je omogućeno u plinskoj turbini koja pogoni turbopuhalo za dobavu zraka za ispitivanje i prednabijanje cilindra.

Toplinski je stupanj djelovanja plinske turbine:

$$\eta_{pr} = 1 - k \cdot \frac{T_4 - T_1}{T_4 \cdot \delta^{k-1} - T_1},$$

jer je

$$\frac{V_4}{V_1} = \delta' \quad T_4 = T_4' \cdot \frac{1}{\delta^{k-1}},$$

Pitanja za ponavljanje

1. Objasnite pV i TS — dijagram Ottova procesa.
2. Što je to toplinski stupanj djelovanja procesa i o čemu on ovisi?
3. Objasnite Sabathéov proces u pV i TS — dijagramu. Napišite izraz za dovedenu i odvedenu toplinu.
4. Napišite izraz za stupanj kompresije, odnos porasta tlaka, odnos uštrcavanja i ekspanzije.
5. Koje veličinu utječu na toplinski stupanj djelovanja procesa Sabathé?
6. Idealni Sabathéov (Seiligerov) proces prikažite u pV -dijagramu.