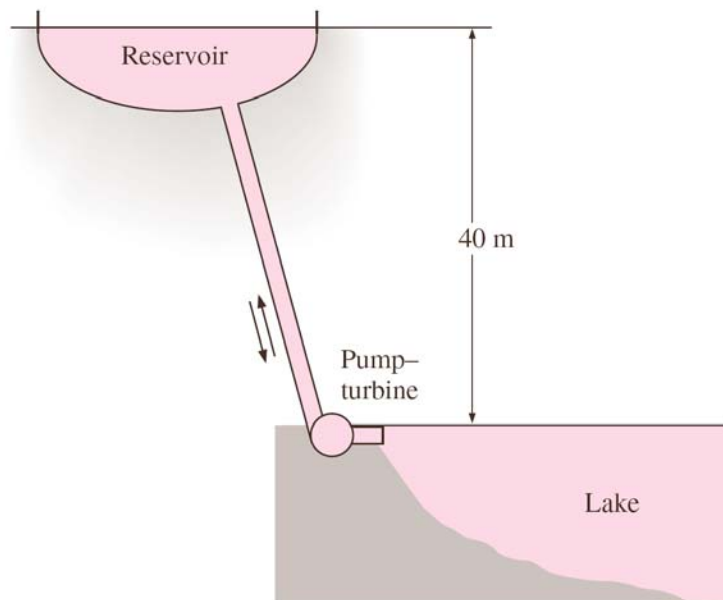


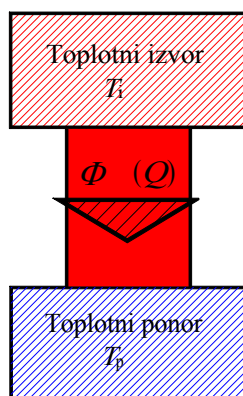
11. Kružni procesi

11.1 Uvod

- U termodinamici izučavamo ponašanje radne supstancije pod dejstvom spoljašnjih energetskeg uticaja (radova i toplote). U tehničkoj praksi su od posebnog značaja slučajevi kada je dejstvo tih uticaja stalno.
- Pr. (mehanički)- Reverzibilna hidrocentrala Bajna Bašta – spontano, zbog razlike u potencijalnim energijama, javlja protok vode.
 - U normalnim uslovima radi kao hidrocentrala
 - U slučajevima kada ima „viška“ struje u sistemu radi kao pumpa (troši struju) i stvara akumulaciju vode

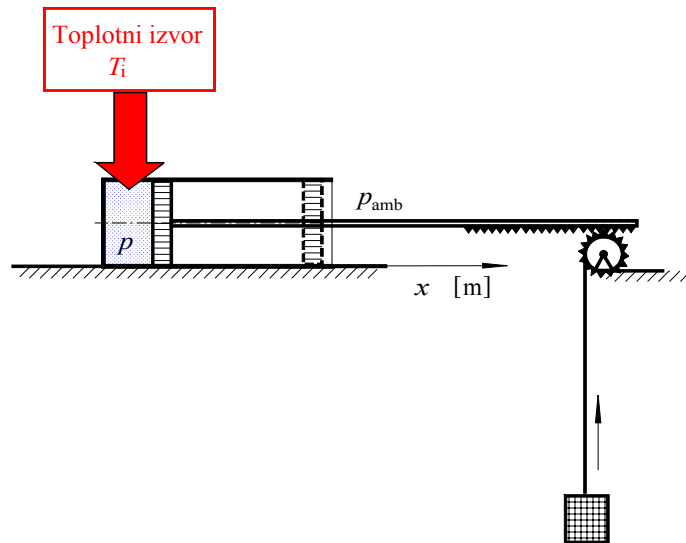


- U termotehnici



Spontano se javlja toplotni protok

- Kako da ga iskoristimo?
 - „umetanjem“ radnog fluida



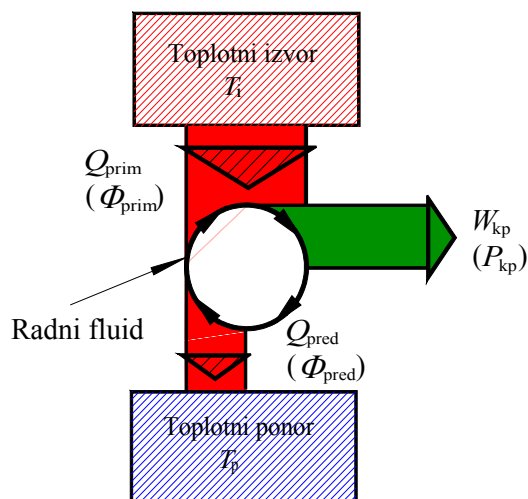
Pri predaji toplote gasu on se širi i pokreće klip, koji pokreće zupčastu letvu, koja preko zupčanika podiže teret – vrši rad

Kretanje letve ograničeno:

- dimenzijama
- temperaturama,

- Za trajno (permanentno) podizanje tereta, vršenje rada, radni fluid je potrebno vratiti u početno (polazno) stanje, a proces ponoviti!
- Kako?
 - Predajom toplote radne materije okolini – toplotnom ponoru

Opšta šema energetskih tokova desnokretnih kružnih procesa



$\Phi_{\text{prim}} (Q_{\text{prim}})$ – neophodno energetske dejstvo okoline

$P_{\text{kp}} (W_{\text{kp}})$ – željena posledica, željeno energetske dejstvo na okolinu

$\Phi_{\text{pred}} (Q_{\text{pred}})$ – sporedno (posledično) energetske dejstvo

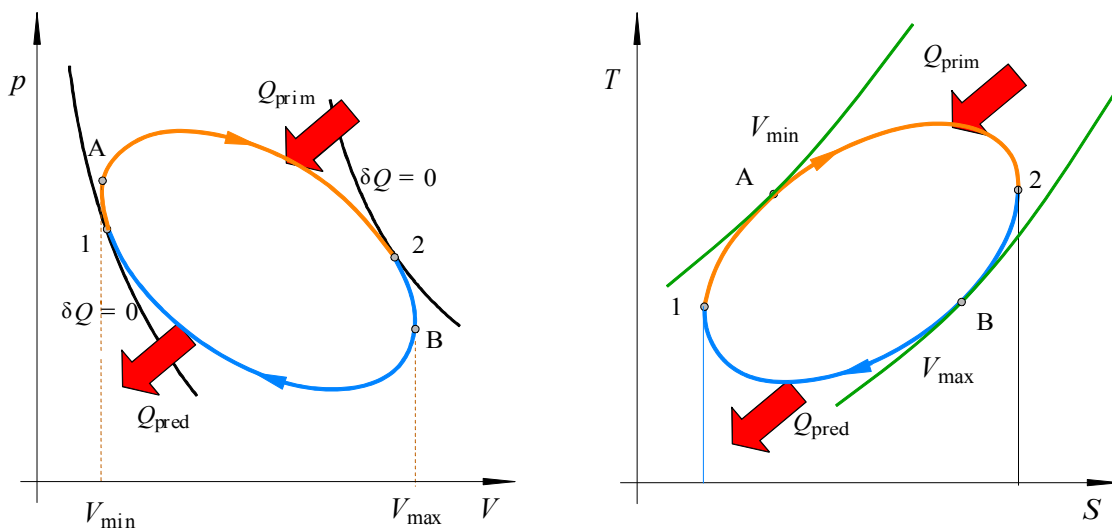
- Svrha postojanja desnokretnih kružnih procesa je permanentno dobijanje (vršenje, obavljanje) rada na račun primljene toplote
- Za pretvaranje toplote u rad $P_{\text{kp}} (W_{\text{kp}})$, između ostalog, potrebno je obezbediti toplotni izvor iz koga će radni fluid primati toplotu ($Q_{\text{prim}}, \Phi_{\text{prim}}$), radni fluid, toplotni ponor, kome će radni fluid predati toplotu $\Phi_{\text{pred}} (Q_{\text{pred}})$, kako bi mogao da se vraća u polazno stanje.

Termodinamički stepen korisnosti

- Mera (energetskog) kvaliteta desnokretnih kružnih procesa opisuje se termodinamičkim stepenom korisnosti

$$\boxed{\eta_t = -\frac{W_{kp}}{Q_{prim}} = -\frac{P_{kp}}{\Phi_{prim}}} \quad \left(= \frac{\text{željeno energetska dejstvo TDS na okolinu}}{\text{neophodno energetska dejstvo okoline na TDS}} \right)$$

Smer desnokretnih kružnih procesa



- Matematički negativan
- Slike su slične za sve vrste gasova (idealne, poluidealne, realne)

Analiza desnokretnih procesa Prvim principom termodinamike (zatvoren TDS)

- Posmatra se „prost“ zatvoren termodinamički sistem (npr. cilindar sa klipom i gasom u njemu)

$$\delta Q + \delta W_V = dU$$

integraljenjem po zatvorenoj konturi, od polaznog stanja(1) do krajnjeg stanja (1):

$$Q_{1-A-2-B-1} + W_{V,1-A-2-B-1} = \underbrace{U_1 - U_1}_{\text{vazna činjenica koja važi i za sve ostale veličine stanja}} = 0$$

$$Q_{1-A-2} + Q_{2-B-1} + W_{kp} = 0$$

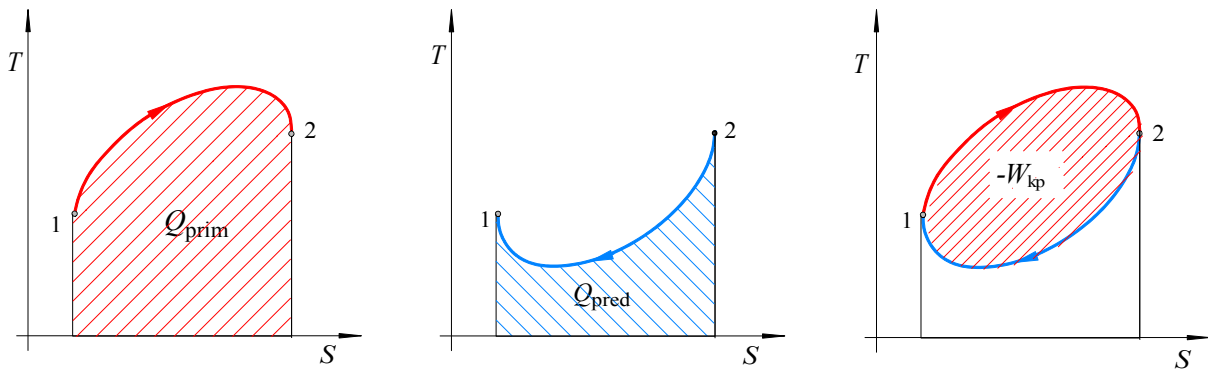
$$Q_{prim} - |Q_{pred}| + W_{kp} = 0$$

$$-W_{kp} = Q_{prim} - |Q_{pred}|$$

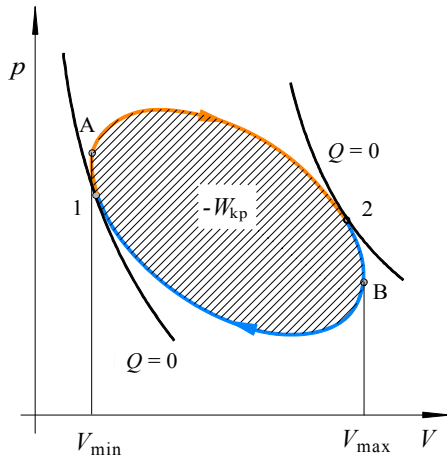
Na osnovu ovoga sledi:

$$\eta_t = \frac{Q_{\text{prim}} - |Q_{\text{pred}}|}{Q_{\text{prim}}} = 1 - \frac{|Q_{\text{pred}}|}{Q_{\text{prim}}}$$

Za ravnotežne procese



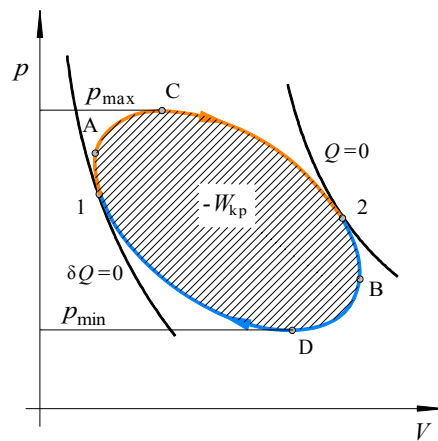
$$W_{\text{kp}} = -\oint T dS$$



$$W_{\text{kp}} = -\oint p dV$$

$$W_{\text{kp}} = W_{V,A-2-B} + W_{V,B-1-A}$$

$$W_{\text{kp}} = W_{V,\text{izvršen}} + W_{V,\text{uložen}}$$



$$W_{\text{kp}} = \oint V dp$$

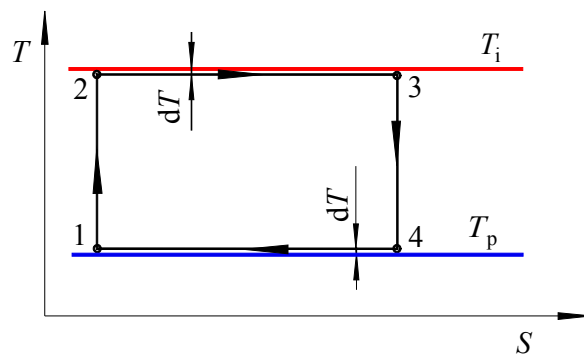
$$W_{\text{kp}} = W_{\text{teh},C-2-D} + W_{V,D-1-C}$$

$$W_{\text{kp}} = W_{\text{teh},\text{izvršen}} + W_{\text{teh},\text{uložen}}$$

11.2 Karnoov (Carnot) kružni proces

- Sadi Carnot, 1824
- Karnoov kružni proces je termodinamički „najbolji“ kružni proces – povratni kružni proces
- Karnoov kružni proces se sastoji od 4 povratne promene stanja:

1-2	izentropske kompresije	$s = \text{idem}$	
2-3	izotermnog primanja toplote	$T = \text{idem}$	$T_2 = T_3 = T_p = \text{idem}$
3-4	izentropske ekspanzije	$s = \text{idem}$	
4-1	izotermne predaje toplote	$T = \text{idem}$	$T_4 = T_1 = T_i = \text{idem}$



- Određivanje termodinamičkog stepena korisnosti Karnoovog kružnog procesa

$$\eta_{t,\text{Carno}} = 1 - \frac{|Q_{\text{pred}}|}{Q_{\text{prim}}} = 1 - \frac{T_p (S_4 - S_1)}{T_i (S_3 - S_2)} = 1 - \frac{T_p}{T_i}$$

- Karnoov proces je povratni kružni proces

$$\Delta S_{\text{is}} = \Delta S_{\text{ti}} + \Delta S_{\text{tp}} + \Delta S_{\text{rs}} = 0$$

- Kratka analiza Karnoovog kružnog procesa

- Ako bi temperatura toplotnog ponora bila jednaka apsolutnoj nuli $T_p = 0 \text{ K}$ ($\vartheta_p = -273,15^\circ\text{C}$),

termodinamički stepen korisnosti Karnoovog kružnog procesa bio bi jednak jedinici

$$\eta_{t,\text{Carnot}} = 1$$

- Realno $T_p \approx 300 \text{ K}$, a $T_i = 1000 \text{ K}$, (max 1300 K), pa je

$$\eta_{t,c} = 1 - 0,3 = 0,7 \quad (\eta_{t,c} = 0,77)$$

11.3 Desnokretni kružni porocesi sa idealnim gasovima

- Motori sa unutrašnjim sagorevanjem
- Gasne turbine
- Osnovne osobenosti
 - Radni fluid
 - u prvom delu kružnog procesa radni fluid je ili smeša vazduha i gasovitog goriva (ili para tečnog goriva) ili čist vazduh
 - u drugom delu procesa (tokom i nakon sagorevanja goriva) radni fluid predstavljaju nastali produkti sagorevanja
 - termo-fizičke osobenosti (karakteristika) bilo vazduha, bilo smeše vazduha i goriva i produkata sagorevanja su približno iste
 - pritisci pri kojima se odvijaju procesi su relativno niski pa se radni fluidi mogu smatrati idealnim gasovima
 - Izvor toplote
 - hemijske reakcije sagorevanja goriva
 - ne postoji izolovan „uređaj”, nego se proces „oslobađanja ” toplote dešava u samom radnom fluidu

11.2.3 Motori sa unutrašnjim sagorevanjem (motori SUS) – *Internal Combustion Engine (ICE)*

- Otto
- Diesel
- Brayton-Joule
- (Stirling)
- (Sabathe)
- (Ericson)
- (Wankel)

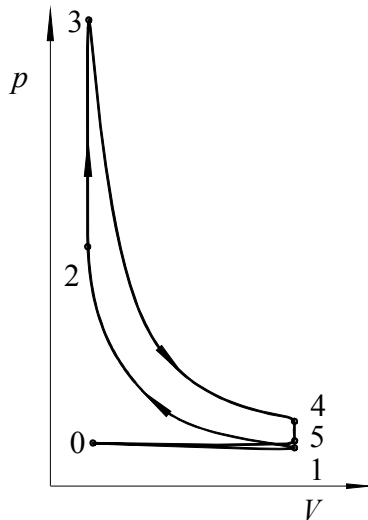
11.2.4 Otov (Otto) kružni proces

1854 – Eugenio Barsanti and Felice Matteucci – patentirali

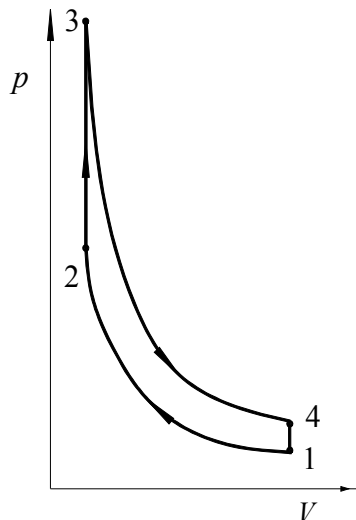
1862 – Aphonse Beau de Rochas – prvi konstruisao

1876 – Nicolaus Augus Otto – ponovo “prvi” konstruisao

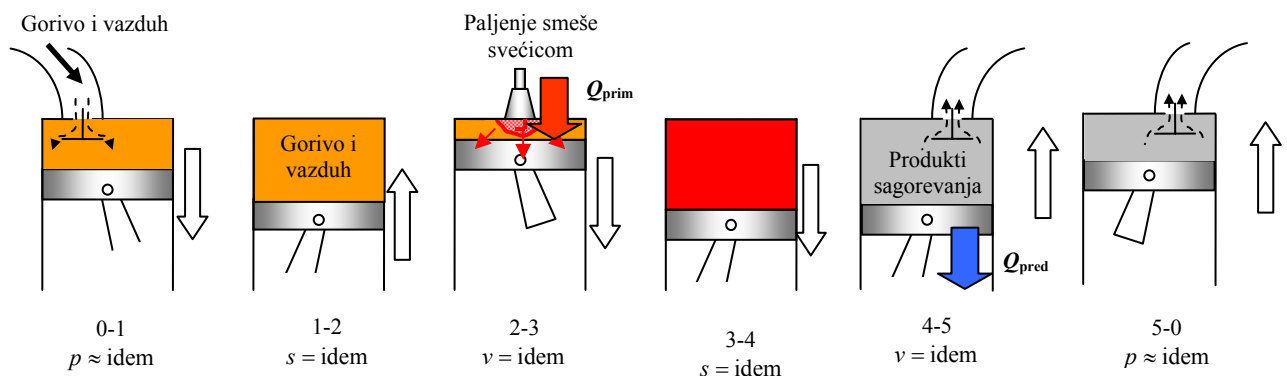
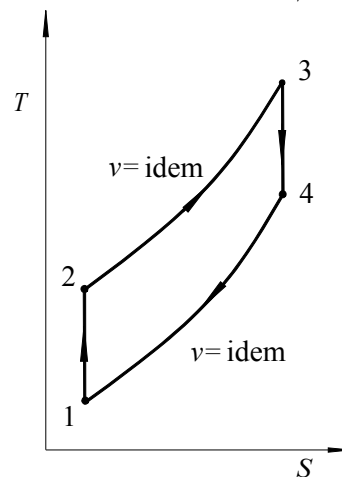
Indikatorski dijagram



Teorijski (hipotetički) dijagram



- 0-1 – usis smeše vazduha i goriva iz karburatora u cilindar ($v \approx \text{idem}$)
- 1-2 – adijabatsko sabijanje smeše vazduha i goriva
- 2-3 – paljenje svećicom smeše i njeno izohorsko sagorevanje
- 3-4 – radni takt – adijabatsko širenje produkata sagorevanja
- 4-5 – otvaranje izduvnog ventila i izohorsko isticanje produkt sagorevanja iz cilindra
- 5-0 – istiskivanje preostalih produkata sagorevanja iz cilindra ($v \approx \text{idem}$)



- Termodinamički stepen korisnosti $\eta_{t,Otto}$

$$\eta_{t,Otto} = 1 - \frac{|Q_{pred}|}{Q_{prim}} = 1 - \frac{mc_V(T_4 - T_1)}{mc_V(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1 \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{T_2 \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)} = \dots^1$$

$$\boxed{\eta_{t,Otto} = 1 - \frac{T_1}{T_2}}$$

a uvođenjem stepena kompresije ε

$$\varepsilon = \frac{V_{max}}{V_{min}}$$

termodinamički stepen korisnosti $\eta_{t,Otto}$ može da se izrazi kao²

$$\boxed{\eta_{t,Otto} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}}}$$

- Kratka analiza $\eta_{t,Otto}$

$$\eta_{t,Otto} = f(\varepsilon, \kappa)$$

$$\text{Ako } \varepsilon \nearrow \Rightarrow \eta_{t,Otto} \nearrow, \text{ ali i } T_2 \nearrow !! \Rightarrow$$

¹ Kako zapremine gasa u stanjima 1 i 4, odnosno 2 i 3 iste

$$V_1 = V_4 \text{ i } V_2 = V_3$$

a procesi 1-2 i 3-4 su izentropski ($s = \text{idem}$)

$$T_1 V_1^{\kappa-1} = T_2 V_2^{\kappa-1} \text{ i } T_4 V_4^{\kappa-1} = T_3 V_3^{\kappa-1}$$

sledi da je

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

pa je

$$\eta_{t,Otto} = 1 - \frac{T_1 \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{T_2 \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

² Uvođenjem stepena kompresije ε - tj. odnosa maksimalne i minimalne zapremine cilindra

$$\varepsilon = \frac{V_{max}}{V_{min}}$$

odnosno, odnosa zapremina gasa stanja 1 i 2:

$$\varepsilon = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{V_1}{V_2},$$

te kako je promena stanja 1-2 izentropska

$$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{1}{\kappa-1}}$$

sledi da je

$$\varepsilon^{\kappa-1} = \frac{T_2}{T_1} \text{ ili } \frac{T_1}{T_2} = \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}}$$

pa je

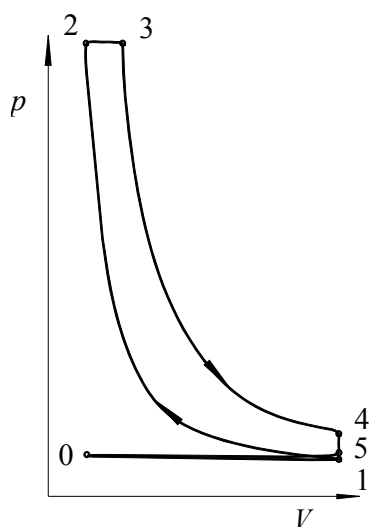
$$\eta_{t,Otto} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

- problem samopaljenja smeše - detonacioni udar
 - dodavanjem aditiva u benzin – tetra-etil-olova ili tetra-metil-olova, povećava se oktanski broj goriva
 - oktanski broj predstavlja meru otpornosti goriva na samopaljenje
 - Oktanski broj 100 (ili 100 oktana) ima izooktan – gorivo vrlo otporno na samopaljenje
 - Oktanski broj 0 (ili 0 oktana) ima normalni heptan – gorivo izuzetno male otpornost na samopaljenje
 - Oktanski broj nekog goriva određuje se upoređivanjem njegove otpornosti na samopaljenje sa otpornosti na samopaljenje smeše izooktana i normalnog heptana. Procenat izooktana u smeši iste otpornosti na samopaljenje, određuje oktanski broj goriva
 - Do 1920, koristili su se benzini bez olova, pa im je oktanski broj bio veoma mali 40-50 oktana
 - Bezolovni benzin – hemijski inženjering – novi aditivi –(aromatični ugljovodonici) – ista svrha – povećanje “oktanskog” broja
- Ograničenja ε - (danas)
 - $\varepsilon = 9 \div 10,5$ (12- sa direktnim ubrizgavanjem – promenljiv pritisak ubrizgavanja)

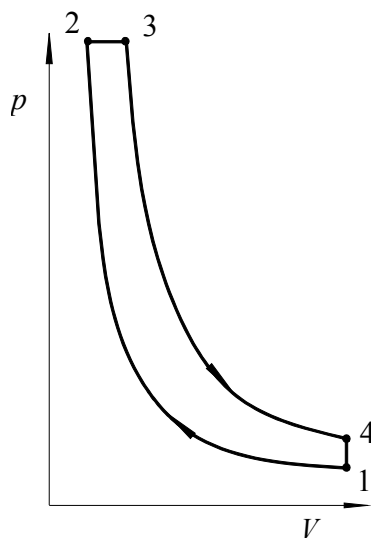
11.2.3 Dizelov (Diesel) kružni proces

1892 – Rudolf Christian Karl Diesel – patentirao i 1893 konstruisao

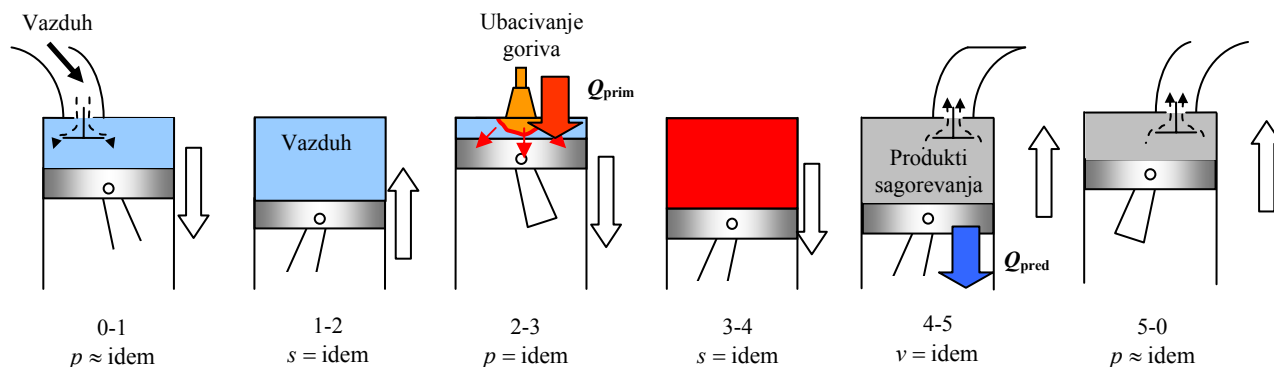
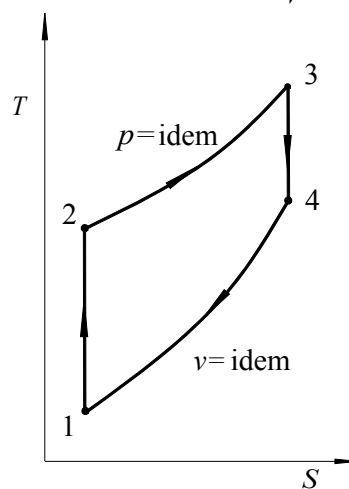
Indikatorski dijagram



Teorijski (hipotetički) dijagram



- 0-1 – usisavanje čistog vazduha u cilindar
- 1-2 – adijabatsko sabijanje vazduha
- 2-3 – postepeno ubacivanje goriva i njegovo sagorevanje pri $p = \text{idem}$
- 3-4 – radni hod – širenje produkata sagorevanja (adijabatsko širenje)
- 4-5 – izbacivanje produkata sagorevanja otvaranjem ventila ($v = \text{idem}$)
- 5-0 – izbacivanje preostalih produkata sagorevanja



- Videti:
<http://www.shermanlab.com/science/physics/thermo/engines/DieselG.php>
<http://members.fortunecity.com/rickteuscher/thermodynamics/DieselCycle.html>

- Stepen kompresije

$$\varepsilon = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{V_1}{V_2}$$

- Stepen predekspanzije ili stepen punjenja

$$\varphi = \frac{V_3}{V_2}$$

- Termodinamički stepen korisnosti

$$\eta_{t, \text{Diesel}} = 1 - \frac{c_V(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{1}{\kappa} \frac{T_1}{T_2} \frac{\left(\frac{T_4}{T_1} - 1\right)}{\left(\frac{T_3}{T_2} - 1\right)} = \dots^3$$

$$\boxed{\eta_{t, \text{Diesel}} = 1 - \frac{1}{\kappa} \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \frac{\varphi^{\kappa} - 1}{\varphi - 1}}$$

- Kratka analiza $\eta_{t, \text{Diesel}}$

- $\eta_{t, \text{Diesel}} = f(\varepsilon, \varphi, \kappa)$
- $\eta_{t, \text{Diesel}} \nearrow$, ako $\varepsilon \nearrow$, $\kappa \nearrow$, $\varphi \searrow$
- $\varepsilon = 17 \div 22$,
 - nema opasnosti od samopaljenja – koristi jeftinije gorivo niže rafinacije
 - više temperature i pritisci pri sagorevanju – “kabastiji” motor – skuplji za izradu, ali jeftiniji u eksploataciji
 - nema ni karburator, ni svećice

³ Proces 1-2, $s = \text{idem}$

$$T_1 V_1^{\kappa-1} = T_2 V_2^{\kappa-1} \Rightarrow \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\kappa-1} = \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}}$$

Proces 2-3, $p = \text{idem}$

$$p_2 V_2 = mRT_2 \text{ i } p_3 V_3 = mRT_3 \Rightarrow \frac{T_3}{T_2} = \frac{V_3}{V_2} = \varphi$$

Proces 3-4 i proces 1-2

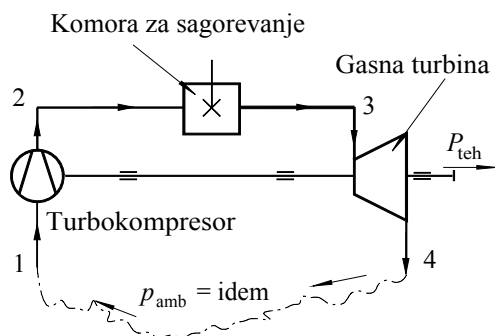
$$T_4 V_4^{\kappa-1} = T_3 V_3^{\kappa-1} \text{ i } T_1 V_1^{\kappa-1} = T_2 V_2^{\kappa-1} \Rightarrow \frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2} \left(\frac{V_3}{V_2}\right)^{\kappa-1} = \varphi \cdot \varphi^{\kappa-1} = \varphi^{\kappa}$$

Džul (Joule) – Brajtonov (Brayton) kružni proces

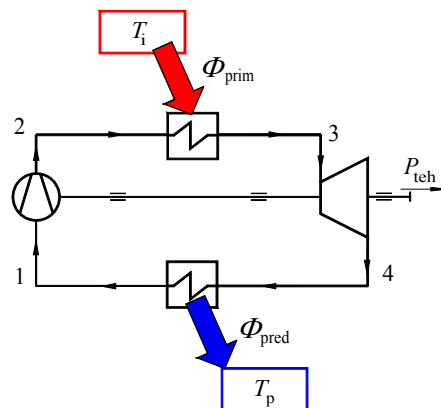
1850 – James Joule

1872 – George Brayton

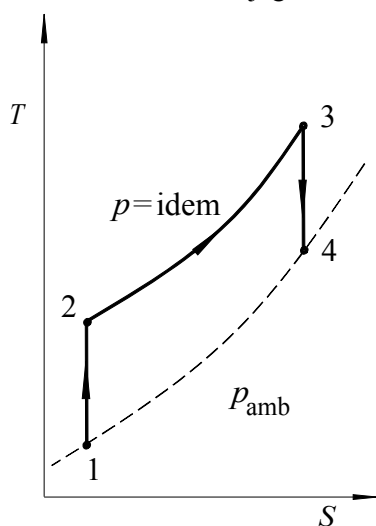
Šema postrojenja “otvorenog” tipa



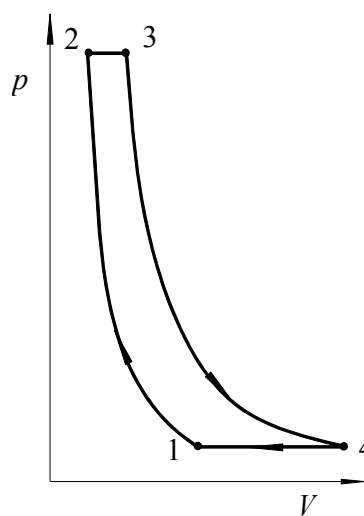
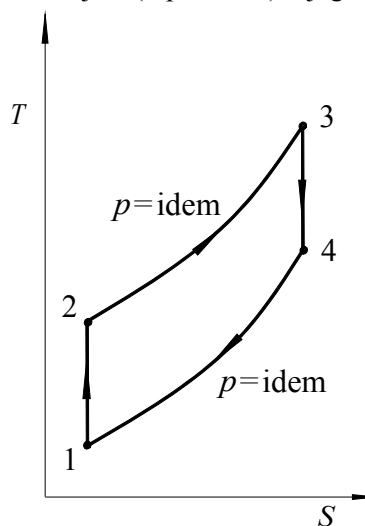
Šema postrojenja “zatvorenog” tipa



Indikatorski dijagram



Teorijski (hipotetički) dijagram



- 1-2 - adijabatsko sabijanje okolnog vazduha (p_{amb})
- 2-3 - postepeno ubacivanje goriva i njegovo sagorevanje pri $p = idem$
- 3-4 - radni hod – širenje produkata sagorevanja (adijabatsko širenje)
- 4 - puštanje produkata sagorevanja u okolinu (p_{amb})

- Termodinamički stepen korisnosti

$$\eta_{t, \text{Joule}} = 1 - \frac{|\Phi_{\text{pred}}|}{\Phi_{\text{prim}}} = 1 - \frac{q_m c_p (T_4 - T_1)}{q_m c_p (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1 \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{T_2 \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)} = \dots^4$$

$$\eta_{t, \text{Joule}} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

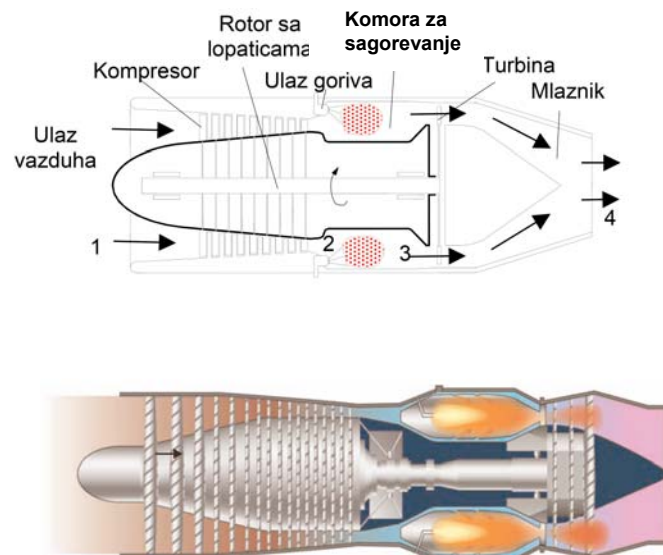
- Uvođenjem odnosa pritisaka

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

termodinamički stepen korisnosti se može napisati u obliku⁵

$$\eta_{t, \text{Joule}} = 1 - \pi^{\frac{1-\kappa}{\kappa}}$$

- Primer Džulovog “kružnog” procesa kod turbomlaznog avionskog motora



⁴ Kako je promena entropije pri izobarskim procesima 2-3 i 4-1 ista,

$$s_3 - s_2 = s_4 - s_1$$

$$c_p \ln \frac{T_3}{T_2} - R \ln \frac{p_3}{p_2} = c_p \ln \frac{T_4}{T_1} - R \ln \frac{p_4}{p_1} \Rightarrow \frac{T_3}{T_2} = \frac{T_4}{T_1} \Rightarrow$$

$$\eta_{t, \text{Joule}} = 1 - \frac{T_1 \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{T_2 \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

⁵ Za izentropski proces 1-2 važi:

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