

UNIVERZITET U SARAJEVU
FAKULTET ZA SAOBRAĆAJ I KOMUNIKACIJE

PREDMET:
CESTOVNA VOZILA

TEMA:
STVARNI CIKLUS MOTORA SUI

MENTORI:

Red.Prof.dr Ivan Filipović

Doc.dr Suada Dacić

STUDENTI:

Daniela Arapović

Valentina Mandić

Uvod

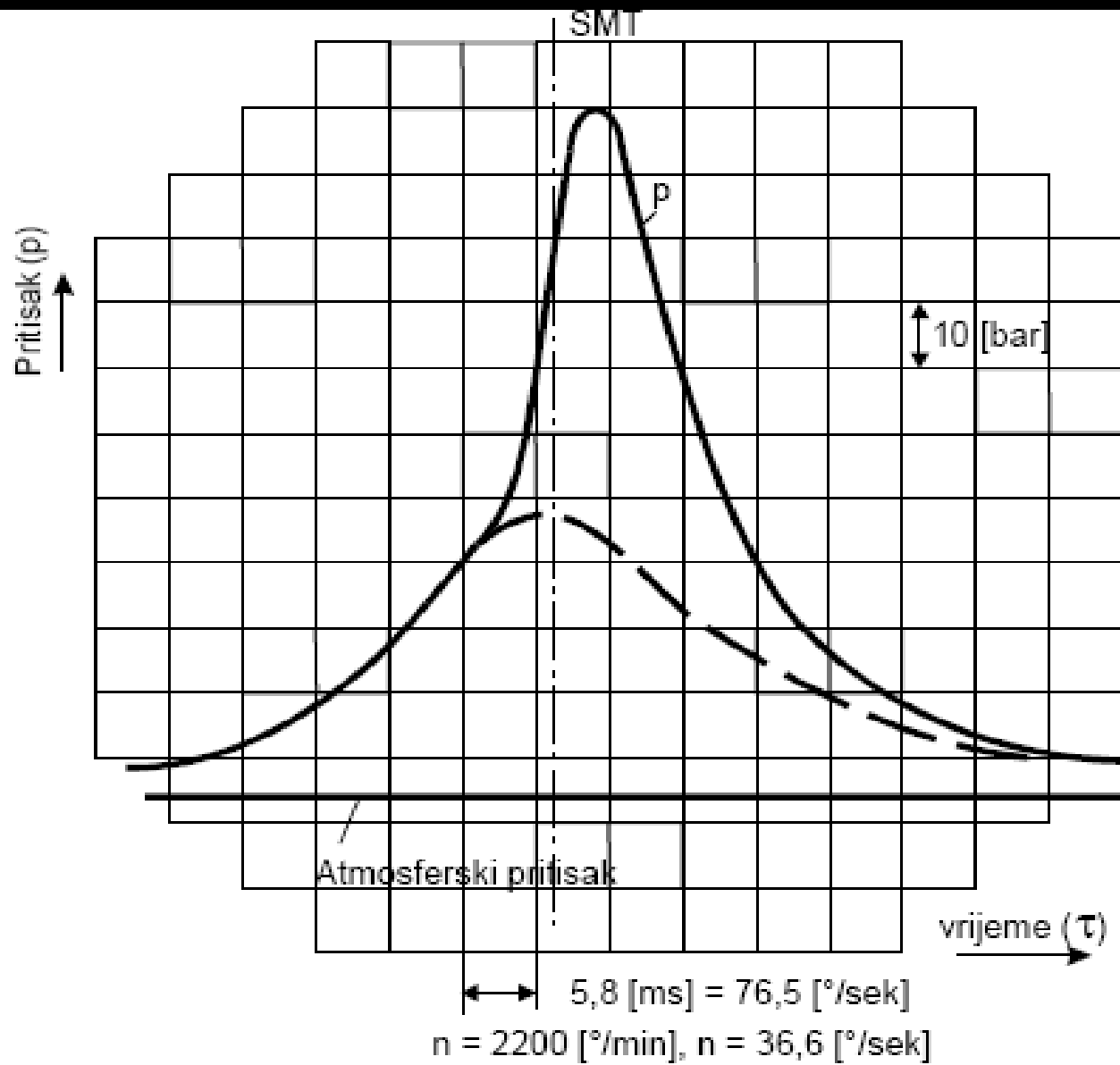
- ▶ Stroj koji preobražava bilo koji vid energije u mehaničku energiju naziva se motor
- ▶ Motori sa unutarnjim izgaranjem (motori sui) spadaju u grupu toplotnih motora, jer se toplotna energija sadržana u gorivu, posredstvom sagorijevanja pretvara u potencijalnu energiju radnog fluida, a zatim, putem ekspanzije radnog fluida u korisnu mehaničku energiju
- ▶ Procesi u motoru su tako komplikovani da se uticaj pojedinih fizikalnih i hemijskih procesa na odvijanje radnog ciklusa motora u cjelini može veoma teško obuhvatiti računom

Stvarni ciklus motora SUI

Na odstupanje stvarnog ciklusa od teorijskog utiče niz faktora:

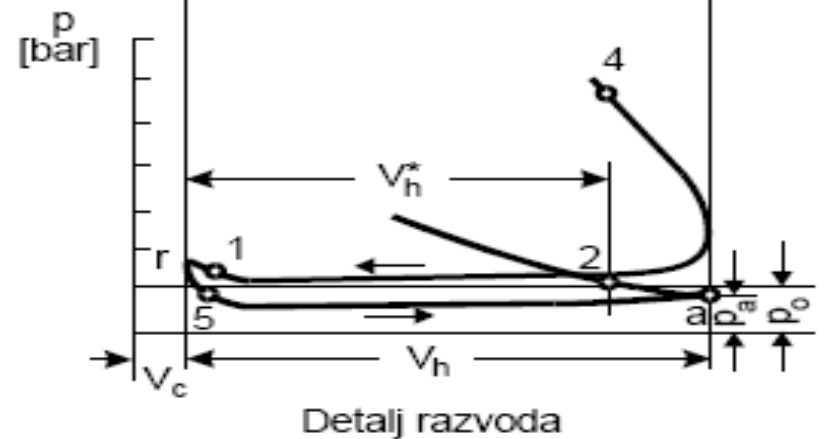
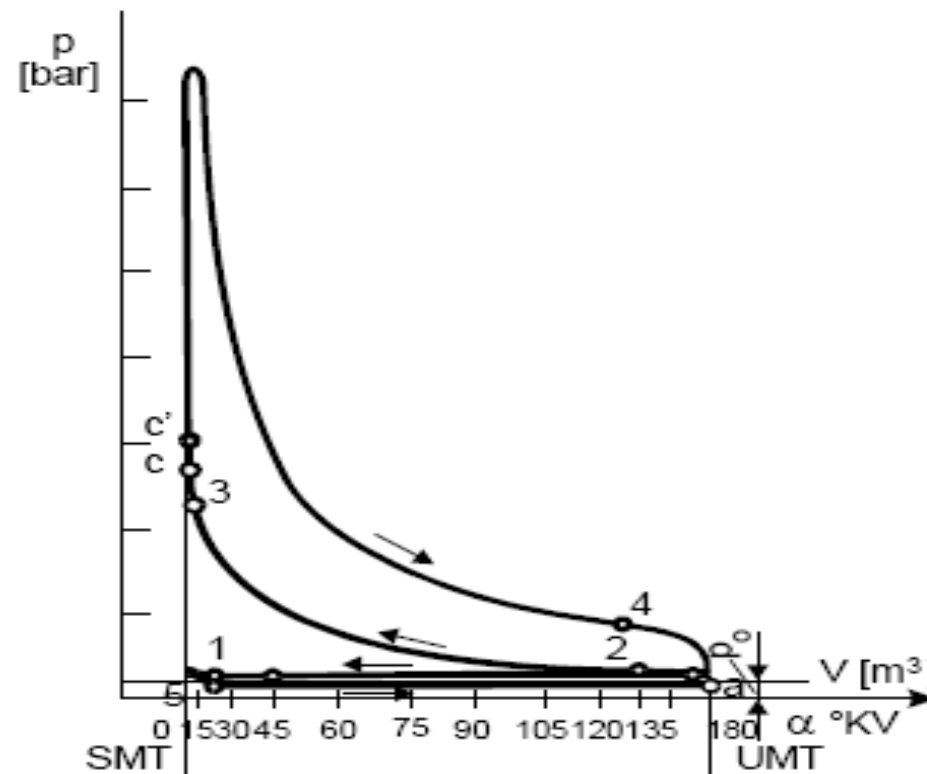
- ▶ radni fluid nije idealni gas, već smješa zraka, goriva i produkata sagorijevanja
- ▶ u toku odvijanja procesa vrši se prenos toplote sa radnog fluida na okolinu i obrnuto, što znači sabijanje i širenje nije izotropski proces
- ▶ vrijeme sagorijevanja je konačno i produžava se u taktu širenja sa dodatnim oslobađanjem dijela toplote
- ▶ uslijed nepotpunog sagorijevanja i pojave disocijacije dolazi do manjeg iskorištenja toplote
- ▶ uslijed propuštanja gasa u korito motora, strujnih otpora, prisustva zaostalih gasova u cilindru motora i dr. dolazi do gubitaka što utiče na smanjenje korisnog rada koji daje motor
- ▶ pri izmjeni radne materije nastaju energetske gubici uslijed strujnih otpora, prenosa toplote, prisustva zaostalih gasova u cilindru, itd

- ▶ Parametri koji karakterišu odvijanje pojedinih procesa u ciklusu kao i ciklusa u cjelini mogu se dobiti eksperimentalnim putem snimanjem indikatorskog diagrama
- ▶ Indiciranje motora daje grafički prikaz promjene pritiska u cilindru u zavisnosti od:
 - promjene zapremine, (diagram $p - V$)
 - ugla koljena koljenastog vratila (diagram $p - \alpha$) ili
 - vremena (diagram $p - \tau$)



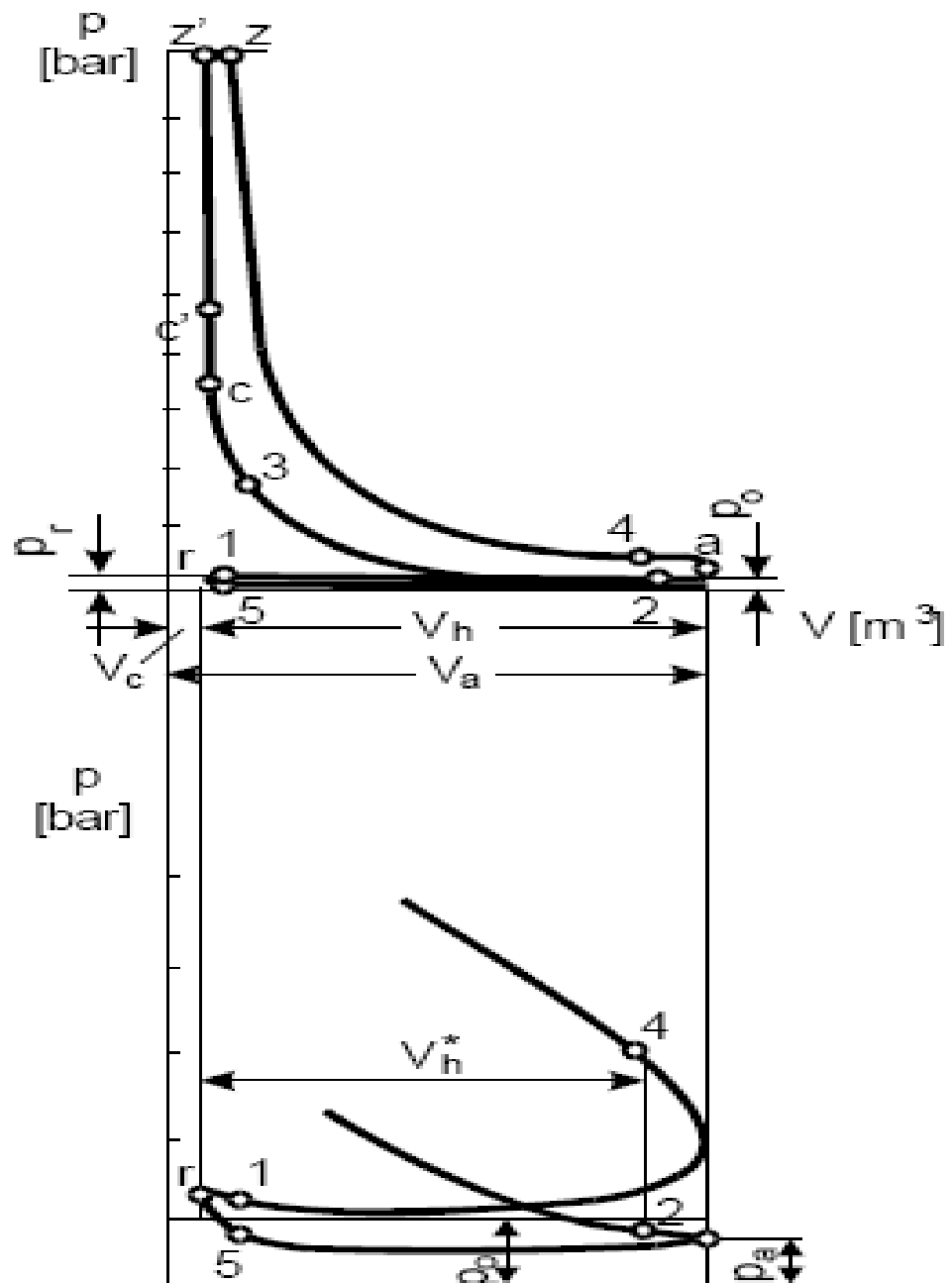
Indicatorski dijagram četvorotaktnog motora

Indikatorski dijagram četvorotaktnog oto motora



- ▶ Kod oto motora usisni ventil se otvara prije nego što je klip u taktu izduvavanja došao u SMT (1) i proces usisavanja smješe goriva i zraka teče do zatvaranja usisnog ventila (2), koje nastaje iza UMT
- ▶ U toku takta usisavanja svježja smješa, koja je ušla u cilindar motora, miješa se sa produktima sagorijevanja, koji su ostali u cilindru nakon obavljenog prethodnog ciklusa i na taj način tvori radnu smješu
- ▶ Homogena radna smješa kod oto motora pali se električnom varnicom nakon zatvaranja usisnog ventila i procesa sabijanja
- ▶ Specifičnost procesa sagorijevanja u oto motoru je početak sagorijevanja homogene smješe i brzo prostiranje fronta plamena od izvora upaljenja po čitavoj zapremini iznad čela klipa
- ▶ Proces izduvavanja počinje prilikom otvaranja izduvnog ventila, prije nego što je klip došao u UMT, a završava se nešto iza SMT, znači u taktu usisavanja

Indikatorski dijagram četvorotaktnog dizel motora

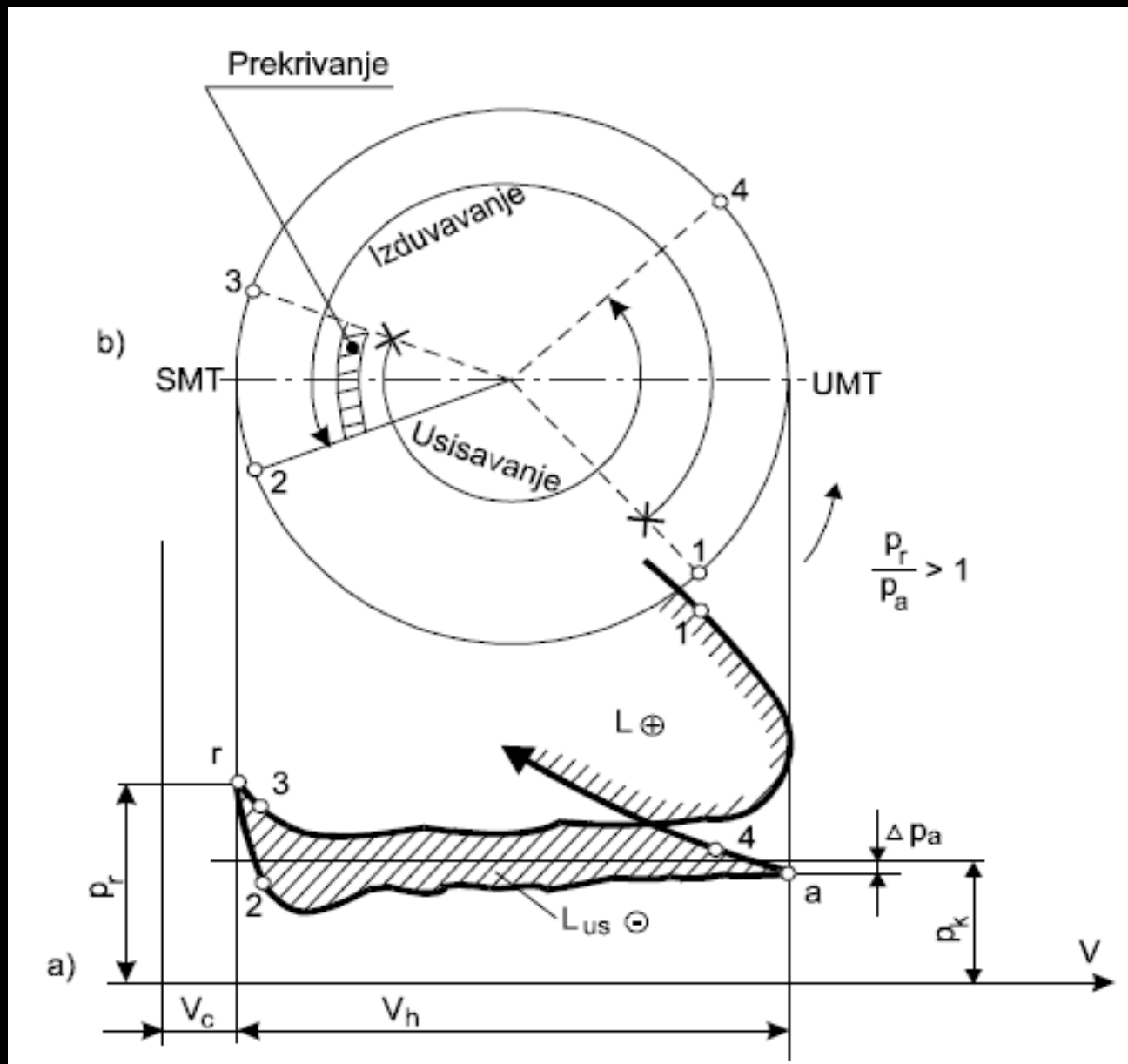


Detalj razvoda

- ▶ Kod četvorotaktnog dizel motora nakon otvaranja usisnog ventila (1) u cilindar ulazi samo čist zrak
- ▶ Kao i kod oto motora, nakon zatvaranja usinog ventila (2) pri kretanju klipa ka SMT vrši se proces sabijanja uz razmjenu toplote između zraka i stjenki cilindra
- ▶ Za razliku od oto motora u datom slučaju sabija se čist zrak, a ubrizgavanje goriva u cilindar počinje kada se klip nalazi blizu SMT (3)
- ▶ U tom trenutku temperatura sabijenog zraka mora biti viša od temperature, pri kojoj se ostvaruje samopaljenje ubrizganog goriva
- ▶ Kod dizel motora se sagorijevanje produžava u procesu širenja pri istovremenoj razmjeni toplote između produkata sagorijevanja i zidova cilindra

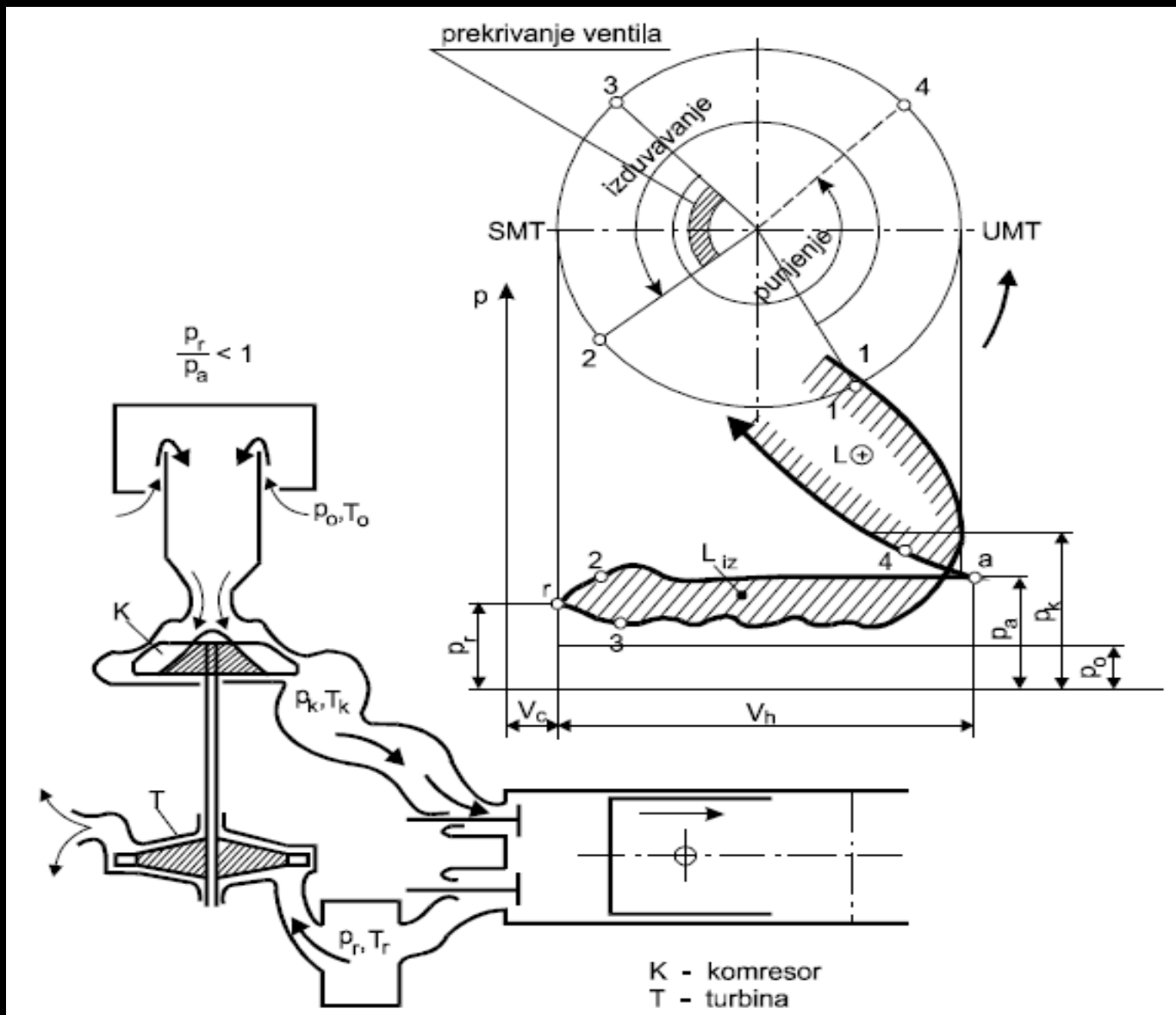
Procesi izmjene radne materije

- ▶ Proces izmjene radne materije obuhvata proces odstranjivanja produkata sagorijevanja iz cilindra i proces punjenja cilindra svježom radnom materijom
- ▶ Osnovna težnja je da se proces izmjene radnog fluida obavi što kvalitetnije, tj. da masa svježeg punjenja u cilindru bude što veća, a masa zaostalih produkata sagorijevanja što manja, ali da se za izmjenu radne materije utroši što manje energije
- ▶ Proces izduvavanja prethodi procesu usisavanja i na izvjestan način utiče na njega, obzirom da u većoj ili manjoj mjeri ovi procesi teku istovremeno, pa se zbog toga analiza procesa usisavanja i izduvavanja provodi jedinstveno



Indikatorski kružni dijagram razvoda četvorotaktnog usisnog motora

- ▶ Tačke 1 i 2 označavaju početak i kraj izduvavanja
- ▶ Tačke 3 i 4 početak i kraj usisavanja
- ▶ Površina na indikatorskom dijagramu, koja se nalazi između linije usisavanja i izduvavanja odgovara izgubljenom radu u toku jednog ciklusa L_{us} , a predstavlja razliku između rada, koji se gubi na izduvavanje sagorijelih gasova, i rada koji ostvaruje atmosferski pritisak prilikom usisavanja svježeg radne materije
- ▶ Poslije otvaranja usisnog ventila (3), kada pritisak u cilindru postane manji od pritiska zraka ispred usisnog ventila p_k za veličinu Δp_a koja obezbjeđuje potrebnu energiju za ubrzanje mase svježeg punjenja i savlađivanje strujnih gubitaka, dolazi do punjenja motora svježim radnim fluidom



Skica nadpunjenog četvorotaktnog motora sa dijagramom pritiska u cilindru u toku izmjene radne materije i kružnim dijagramom izvoda

- ▶ Kod motora sa nadpunjenjem svježi radni fluid uvodi se u cilindar nakon prethodnog sabijanja u kompresoru
- ▶ Pod dejstvom kompresora svježa radna materija ulazi u cilindar pod pritiskom $p_k > p_o$
- ▶ U fazi prekrivanja ventila, obzirom da je $p_k > p_o$, dolazi do ispiranja cilindra svježim radnim fluidom što poboljšava odstranjivanje sagorjelih gasova, a takođe utiče i na snižavanje toplotnog opterećenja površina koje formiraju komoru sagorijevanja (čelo klipa, cilindar i glava motora)
- ▶ Linija usisavanja je iznad linije izduvavanja, a površina koja se nalazi između linije usisavanja i izduvavanja daje pozitivan rad (L_{iz}), koji predstavlja dio rada, koga kompresor predaje radnoj materiji, a koji je dobijen ekspanzijom izduvnih gasova u turbini

Osnovni parametri procesa izmjene radne materije

- ▶ Za proces izmjene radne materije kod motora je osnovno da se dobije odgovarajuće punjenje motora svježom radnom smješom
- ▶ Ovaj kriterij se uglavnom vrednuje pomoću tzv. "stepena punjenja" motora (η_v). Na njegovu veličinu direktno utiču:
 - hidraulični otpori u usisnom sistemu
 - količina zaostalih produkata sagorijevanja u cilindru motora nakon izduvavanja
 - promjena temperature (ΔT) usisne smješe uslijed prenosa toplote sa zagrijanih stjenki usisnog voda i cilindra

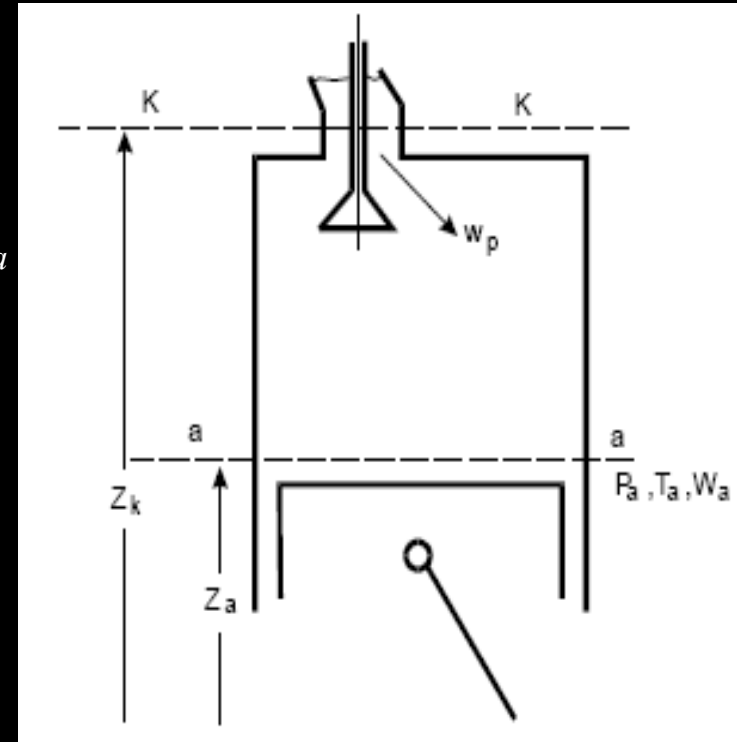
stepen punjenja motora

Hidraulični otpori usisa

- ▶ Za ocjenu hidrauličkih otpora uzima se veličina pritiska u tački "a" (klip u UMT) u odnosu na pritisak ispred usisnog kanala (p_k)

$$\frac{p_k}{\rho_k} + \frac{w_k^2}{2} + g \cdot Z_k = \frac{p_a}{\rho_a} + \frac{w_a^2}{2} \pm \zeta \frac{w_p^2}{2} + g \cdot Z_a$$

- ▶ w_k - brzina strujanja na ulazu ispred UV
- ▶ w_p - srednja brzina strujanja na UV
- ▶ $w_a = \beta \cdot w_p$ - brzina strujanja fluida u presjeku a - a
- ▶ ζ - koeficijent strujnih otpora u presjeku UV
- ▶ β - koeficijent smanjenja brzine strujanja svježeg punjenja u cilindru



- ▶ Ako se uvedu pretpostavke $z_a \approx z_k$, $\rho_a \approx \rho_k$, $w_k \approx 0$ iz prethodne jednačine se može napisati da je razlika pritiska:

$$\Delta p_a = p_k - p_a = \left(\beta^2 + \xi \right) \cdot \frac{w_p^2}{2} \cdot \rho_k$$

- ▶ Veličina pritiska u cilindru (p_a), prema iskustvenim podacima, kreće se u granicama:
 - kod četvorotaktnih usisnih motora $p_a = (0,8 \div 0,9) \cdot p_0$
 - kod četvorotaktnih nadpunjenih motora $p_a = (0,9 \div 0,96) \cdot p_k$
 - kod dvotaktnih motora sa istosmjernim ispiranjem $p_a = (0,85 \div 1,05) \cdot p_k$

Količina zaostalih gasova

- ▶ U procesu usisavanja zaostali gasovi se šire i miješaju sa svježom smješom umanjujući na taj način punjenje svježom radnom materijom
- ▶ Količina zaostalih gasova definiše se koeficijentom zaostalih gasova γ , koji predstavlja odnos mase zaostalih gasova u cilindru (m_r) prema ukupnoj masi, koja se nalazi u cilindru nakon punjenja (m_1), tj.:

$$\gamma = \frac{m_r}{m_1} = \frac{m_r}{m_k + m_r} \approx \frac{m_r}{m_k}$$

- ▶ U nekoj literaturi ovaj koeficijent se definiše i kao odnos broja molova zaostalih produkata sagorijevanja (M_r) prema broju molova svježeg punjenja (M_k), tj:

$$\gamma = \frac{M_r}{M_k}$$

- ▶ Ako se ovdje pored koeficijenta zaostalih gasova (γ) definiše i stepen ispiranja (η_s) kao:

$$\eta_s = \frac{m_k}{m_1} = \frac{m_k}{m_k + m_r}$$

- ▶ Može se uspostaviti zavisnost između η_s i γ kao:

$$\eta_s = \frac{1}{1 + \gamma}$$

Temperatura zagrijavanja svježeg punjenja

- ▶ Svježe punjenje, prilikom kretanja u usisnom sistemu i u unutrašnjosti cilindra, dolazi u dodir sa toplim stjenkama i zagrijava se za veličinu ΔT
- ▶ Visina zagrijavanja svježeg punjenja zavisi od brzine kretanja svježeg punjenja i razlike temperature stjenki i svježeg punjenja

$$\Delta T = \Delta T_k - \Delta T_{is}$$

- ▶ ΔT_k -porast temperature svježeg punjenja uslijed prenosa toplote
- ▶ ΔT_{is} -pad temperature svježeg punjenja zbog isparavanja goriva

- ▶ Kod oto usinih motora $\Delta T = 0^\circ \div 20^\circ C$
- ▶ Kod dizel usisnih motora $\Delta T = 20^\circ \div 40^\circ C$

- ▶ Jednačina bilansa toplota je

$$c_p \cdot M_1 \cdot (T_k + \Delta T) + \varphi \cdot c_p \cdot M_r \cdot T_r = c'_p (M_k + M_r) \cdot T_a$$

- ▶ Koristeći različita pojednostavljenja, može se odrediti T_a :

$$T_a = \frac{T_k + \Delta T + \gamma \cdot T_r}{1 + \gamma}$$

Stepen (koeficijent) punjenja (η_v)

- ▶ Ovaj koeficijent karakteriše količinsko punjenje cilindra svježom radnom materijom
- ▶ Definiše se odnosom količine svježeg punjenja (m_k), koje se nalazi u cilindru na početku procesa sabijanja, (u momentu zatvaranja usisnog ventila), prema količini svježeg punjenja ($V_h \cdot \rho_k$), koja bi mogla ispuniti radnu zapreminu cilindra u odnosu na parametre smješe na usisu (p_k, T_k)

$$\eta_v = \frac{m_k}{V_h \cdot \rho_k}$$

- ▶ Ako se sa V_k označi zapremina, koju bi popunila masa m_k gustine ρ_k , onda se jednačina može napisati kao:

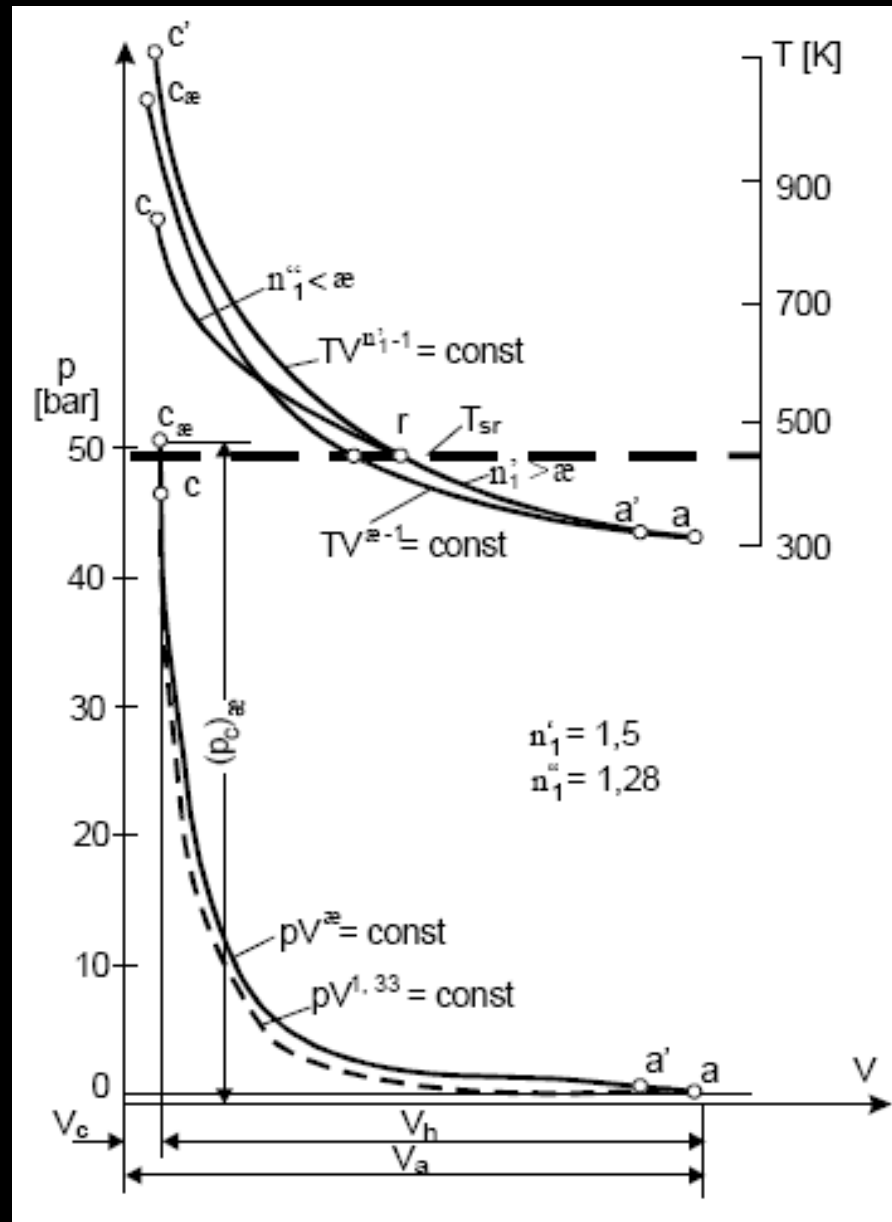
$$\eta_v = \frac{V_k}{V_h}$$

Proces sabijanja (kompresija)

- ▶ Nakon završenog procesa izmjene radne materije nastaje proces sabijanja u kojem se povećava pritisak i temperatura radnog fluida
- ▶ Kod oto motora, radna materija se sastoji iz smješe isparenog goriva, zraka, tečnog goriva i zaostalih sagorjelih gasova, a prilikom sabijanja produžava se proces isparavanja goriva i njegovo miješanje sa zrakom
- ▶ Kod dizel motora proces obrazovanja smješe izvodi se u cilindru motora, kada se klip nalazi u blizini SMT i većim dijelom se obavlja istovremeno sa sagorijevanjem goriva
- ▶ Proces sabijanja u ovom slučaju mora u momentu ubrizgavanja goriva omogućiti dovoljno visoku temperaturu sabijenog zraka, da bi se odigralo samozapaljenje ubrizganog goriva

- U početnom periodu temperatura smješe (zraka) je niža od temperature površina koje ograničavaju unutrašnjost cilindra; zbog toga se u početku hoda sabijanja temperatura svježeg fluida povećava kao posljedica prelaza toplote sa zidova

- U određenom momentu srednja temperatura svježeg radnog fluida i zidova je jednaka, a u daljem kretanju klipa do kraja procesa sabijanja radni fluid se zagrijava i toplota se odvodi na zidove cilindra



Karakteristike procesa sabijanja

- ▶ U početku sabijanja, toplota koja se dovodi od zidova cilindra svježoj smješi, troši se na isparavanje benzina
- ▶ Toplotni kapacitet smješe kod oto motora je veći nego kod dizel motora, zbog prisustva para benzina i veće količine zaostalih gasova
- ▶ Zbog manjeg stepena sabijanja kod oto motora, temperatura i pritisak na kraju procesa sabijanja su niži nego kod dizel motora, što utiče na proces razmjene toplote u drugoj fazi procesa sabijanja, kada je $\eta_1'' < \alpha$

Parametri procesa sabijanja

- ▶ Određivanje parametara na kraju procesa sabijanja uz promjenljivi eksponent politrope je dosta komplikovano
- ▶ Pretpostavlja se da je početak sabijanja kada je kip u UMT
- ▶ Koristeći jednačinu politropske promjene stanja

$$p_a \cdot V_a^{n_1} = p_c \cdot V_c^{n_1}$$

- ▶ i relaciju za stepen sabijanja

$$\varepsilon = \frac{V_a}{V_c}$$

- ▶ dobija se pritisak na kraju kompresije

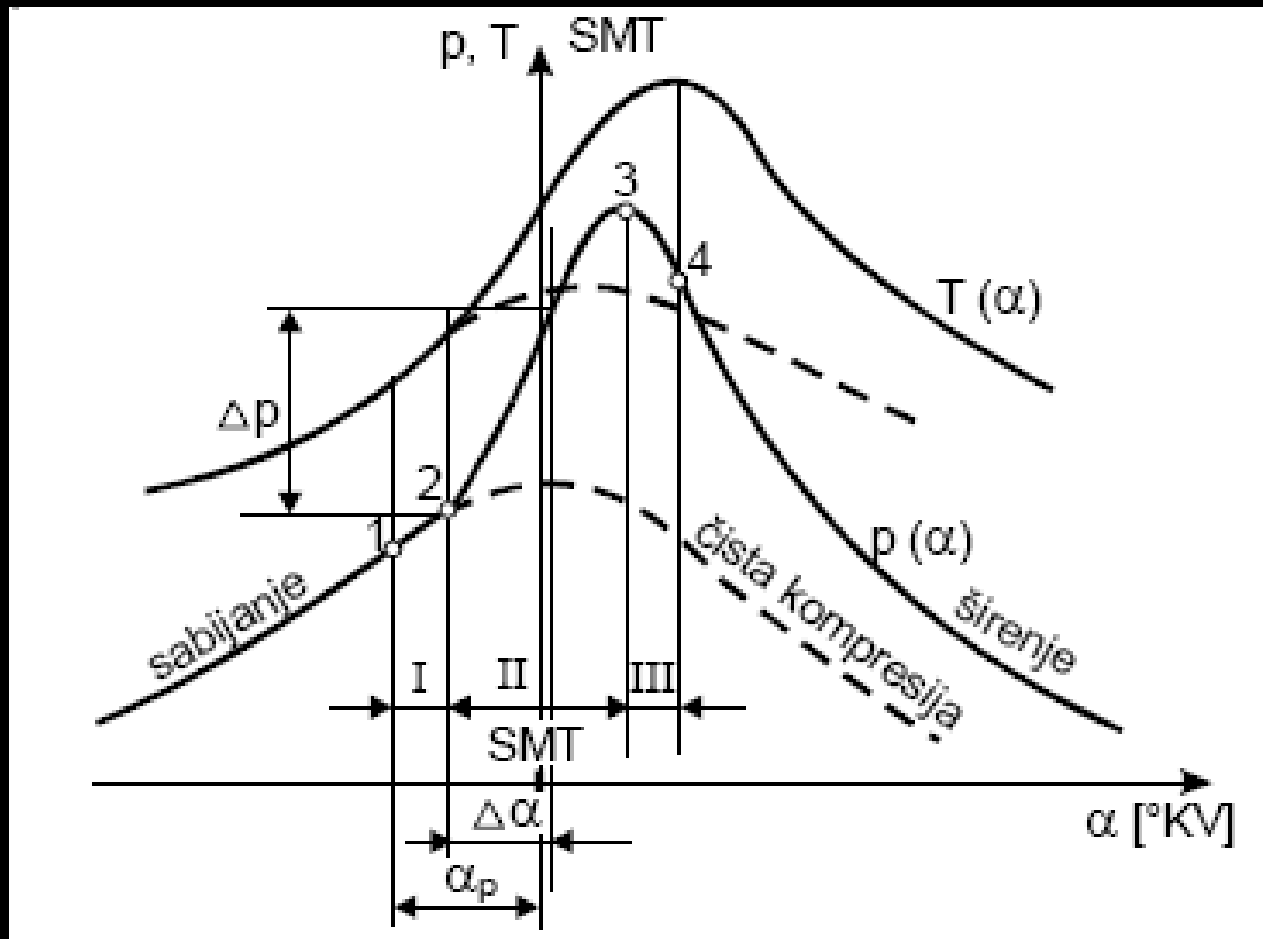
$$p_c = p_a \cdot \varepsilon^{n_1}$$

- ▶ Mehanička energija, koja se sa strane dovodi i troši pri ostvarivanju sabijanja, troši se na povećanje unutrašnje energije, što se manifestuje povećanjem temperature svježeg punjenja
- ▶ Dvostrani karakter predaje toplote (prvo od zidova svježem punjenju a kasnije od svježeg punjenja zidovima) i kratkoća vremena u kome se odvija proces sabijanja dovodi do toga da se sa dovoljnom "tehničkom" tačnošću može linija sabijanja tretirati kao politropa konstantnog eksponenta, čija vrijednost leži u granicama $n_1 = 1,3 - 1,39$

Proces sagorijevanja

- ▶ Proces sagorijevanja i proces širenja, koji za njim slijedi, su osnovni procesi radnog ciklusa motora sui, u toku kojih se hemijska energija goriva pretvara u toplotu a ova djelomično u mehanički rad
- ▶ Za razliku od teoretskih ciklusa, dovođenje toplote pri $v = \text{const}$, $p = \text{const}$ i kombinovano u stvarnom motoru ne samo da je nemoguće, nego je i nepoželjno
- ▶ Sam proces sagorijevanja kod oto motora bitno se razlikuje od sagorijevanja kod dizel motora, stoga je potrebno proučiti posebno proces sagorijevanja i tok linije sagorijevanja kod oto i kod dizel motora

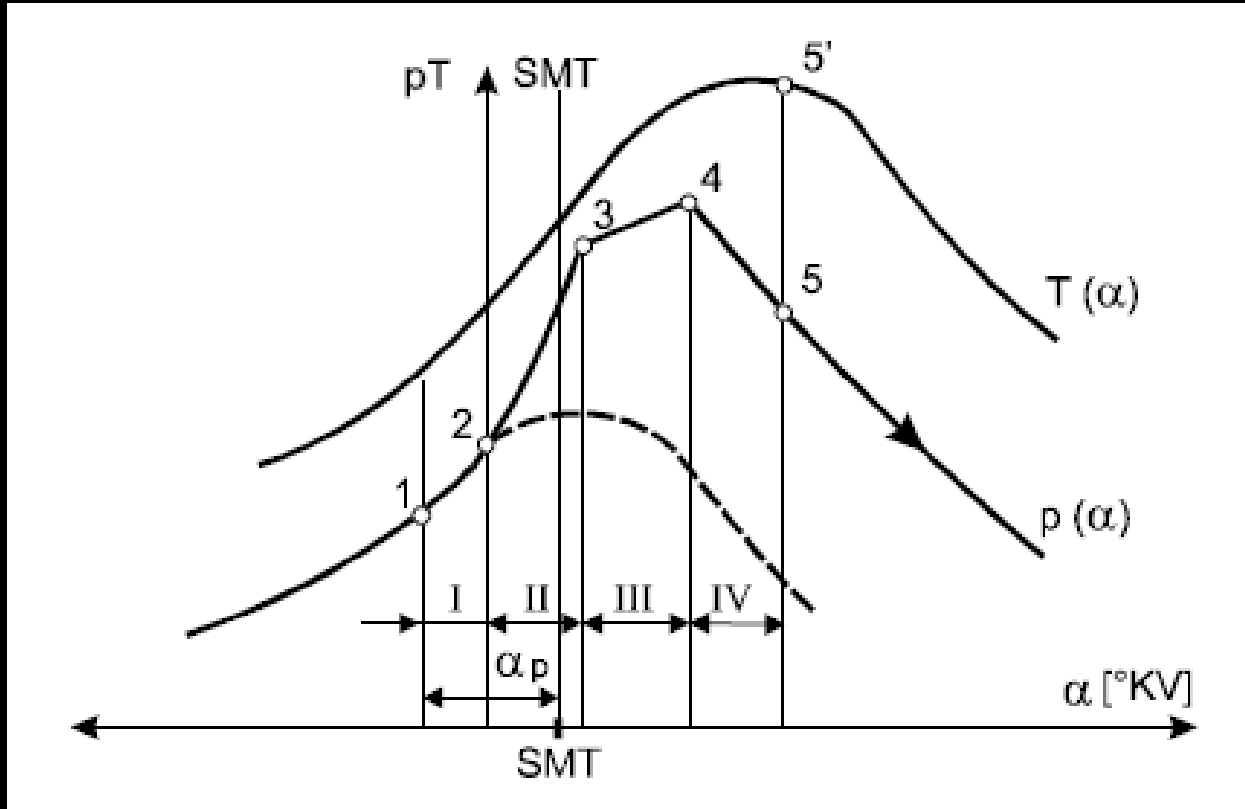
Proces sagorijevanja i stvarni tok linije sagorijevanja kod oto motora



► Faze sagorijevanja kod oto motora prikazane u p - α dijagramu

- ▶ Kod oto motora paljenje se vrši električnom varnicom
- ▶ Kod ovog motora se u toku kompresije vrši sabijanje gotove smješe, ostvarene u karburatoru
- ▶ Pritisak u cilindru se ne povećava u odnosu na pritisak čiste kompresije odmah nakon paljenja, već je potrebno da protekne jedan izvjestan vremenski period do momenta vidnog porasta pritiska u cilindru
- ▶ Period, koji protekne od momenta pojave varnice do momenta vidnog porasta pritiska (period I) naziva se period pritajenog sagorijevanja - indikacije ili period zakašnjenja upaljenja (kod dizel motora)
- ▶ Ugao α_p , koji definiše moment skoka varnice, naziva se ugao predpaljenja

Proces sagorijevanja i stvarni tok linije sagorijevanja kod dizel motora



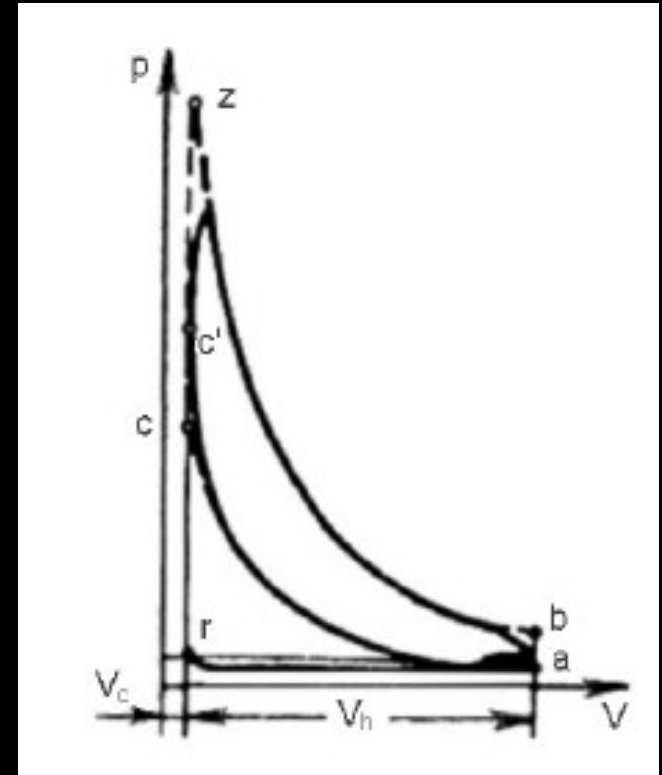
Razvijeni indikatorski dijagram dizel motora

- ▶ Kod dizel motora stvaranje smješe se vrši u samom cilindru motora i to uz istovremeno sagorijevanje
- ▶ Pod ovakvim uslovima, nemoguće je postići homogenost smješe jer u takvoj smješi postoje čestice isparenog goriva i zraka (parna faza) i čestice tečnog goriva (tečna faza), a smješa je i neravnomjerno raspoređena po prostoru sagorijevanja (dok se u jednom dijelu prostora sagorijevanja nalazi prebogata smješa u drugom dijelu je neiskorišteni zrak)
- ▶ Ovo je glavni razlog što dizel motori ne mogu raditi sa malim viškom zraka

- ▶ Ugao α_p , koji definiše početak ubrizgavanja, zove se ugao predubrizgavanja i iznosi najčešće 10 - 30 °KV
- ▶ Slično kao kod oto motora i kod dizel motora sagorijevanje ne počinje sa vidnim porastom pritiska, već mora proći izvjestan period laganog sagorijevanja u toku koga se gorivo priprema za intenziviranje sagorijevanja
- ▶ Period koji protekne od momenta ulaska prvih količina goriva u cilindar (početak ubrizgavanja), pa do momenta pojave vidnog porasta pritiska u odnosu na liniju bez sagorijevanja, naziva se period pritajenog sagorijevanja (period zakašnjenja paljenja ili period indikacije)
- ▶ Uvodi se i period dogorijevanja od momenta dostizanja maksimalnog pritiska, pa do momenta dostizanja maksimalne temperature gasova i on se produžava i dalje u toku linije širenja, pod još nepovoljnijim uslovima i s krajnje nepovoljnim ekonomskim efektom

Proces širenja (ekspanzija)

- ▶ U procesu širenja, koji se često naziva radni hod, proizvodi se mehanički rad na račun toplotne energije razvijene prilikom sagorijevanja goriva
- ▶ U početnoj fazi procesa širenja produžava se intenzivno sagorijevanje goriva
- ▶ Temperatura gasa, dobijena indiciranjem, dostiže najveću vrijednost u procesu širenja, nešto iza momenta kada se dostigne maksimalni pritisak p_{max}



Proces širenja kod oto motora

- ▶ U početku procesa širenja, kada je intenzivno sagorijevanje, dolazi do intenzivnog dovodenja toplote i znatnog porasta pritiska
- ▶ U procesu širenja, naročito u početnoj fazi dolazi do prodora gasova pored klipnih prstenova u korito motora, kao posljedica visokih pritisaka, što snižava efektivnost procesa širenja

Parametri procesa širenja (ekspanzije)

- ▶ U toku procesa sagorijevanja na ime oslobođene toplote goriva, nastali produkti sagorijevanja kao i zaostali produkti iz prethodnog ciklusa dovedeni su na početno stanje ekspanzije (širenja)
- ▶ Linija širenja je politropa promjenjivog eksponenta uslijed nejednakog intenziteta izmjene toplote u toku širenja

- ▶ Pritisak i temperatura na kraju širenja dobiju se koristeći jednačinu politrope kao:

$$p_b = p_z \cdot \left(\frac{V_z}{V_b} \right)^{n_2} = p_z \cdot \frac{1}{\delta^{n_2}} = p_z \cdot \left(\frac{\rho}{\varepsilon} \right)^{n_2}$$

- ▶ Za oto motore prethodni izraz se može napisati kao:

$$p_b = p_z \frac{1}{\varepsilon^{n_2}}$$

- ▶ Na sličan način određuje se i temperatura na kraju širenja:

- Za dizel ciklus: $T_b = T_z \cdot \frac{1}{\delta^{n_2-1}} = T_z \cdot \left(\frac{\rho}{\varepsilon} \right)^{n_2-1}$

- Za oto ciklus $T_b = T_z \cdot \frac{1}{\varepsilon^{n_2-1}}$

- ▶ Ovakav pristup analizi pokazatelja stvaranog ciklusa je dosta uprošten, tako da su i očekivani rezultati "približni"
- ▶ Svaka detaljnija analiza procesa u motoru zahtijeva složenije jednačine (obične i parcijalne diferencijalne jednačine) za opisivanje pojedinih procesa, kao i složenije numeričke metode za rješavanje pomenutih jednačina
- ▶ Danas postoji veći broj razvijenih računskih programa za simuliranje procesa u motorima, od najjednostavnijih tzv. nulti - dimenzionih do trodimenzionalnih modela, kojima se mogu računati svi interesantni pokazatelji (pritisci, temperature, brzine, promjena mase, itd.)

Zaključak

- ▶ Stvarni ciklusi se razlikuju od idealnih, teorijskih i poluteorijskih po mnogim faktorima
- ▶ Stepenn iskorištenja stvarnog ciklusa manji od stepena iskorištenja idealnog ciklusa i da je računanje stepena iskorištenja stvarnog ciklusa mnogo složenije jer zahtijeva analiziranje svakog procesa posebno
- ▶ Proces širenja, zajedno sa procesom sagorijevanja, su osnovni procesi radnog ciklusa motora SUI, u toku kojih se hemijska energija goriva pretvara u toplotu, a ova djelimično u mehanički rad

HVALA NA PAŽNÍ