

TERMODINAMIKA

Sadržaj

Temperatura i toplota			
Nulti zakon termodinamike	186	Kinetička teorija gasova	209
Toplota i masena količina toploste	189	Osnovna jednačina kinetičke teorije gasova	211
Latentna toplota faznog prelaza	190	Molekularni model pritiska idealnog gasa	212
Širenje čvrstih tela pri zagrevanju	192	Daltonov zakon	213
Širenje tečnosti pri zagrevanju	193	Molekularni model temperature idealnog gasa	214
Širenje gasova pri zagrevanju	194	Stepeni slobode kretanja molekula	215
Prenošenje toplote. Provodenje toplote.	195	Raspodela energije po stepenima slobode	216
Prenošenje toplote konvekcijom	197	Unutrašnja energija idealnog gasa	217
Prenošenje toplote zračenjem	198	Toplota i masena količina toplote idealnog gasa	218
Molekulsko kinetička teorija gasova	200	Rad i toplota u termodinamičkim procesima	220
Atomsko-molekulski sastav materije	201	Prvi zakon termodinamike	225
Makroskopski opis idealnog gasa	203	Neke primene I zakona termodinamike	227
Jednačina stanja idealnog gasa	204	Termodinamički procesi - podela	235
Gasni zakoni, Bojl-Mariotov zakon,	206	Toplotne maštine i II zakon termodinamike	237
Gej-Lisakov i Šarlov zakon	207	Karnovo ciklus	241

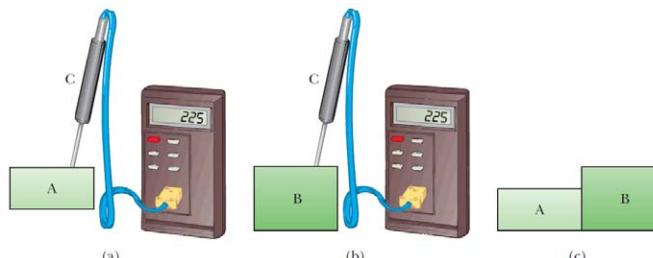
185

Temperatura i toplota. Nulti princip termodinamike.

- **Temperatura** je mera unutrašnje energije tela ili mera zagrejanosti tela (stepen toplotnog stanja), pri čemu se uvek vrši poređenje sa drugim telima.
- Za tela se kaže da su u **toplotnom kontaktu**, ako mogu razmenjivati toplotu.
- **Termička** (toplotna) **ravnoteža** tela je situacija kada su tela u toplotnom kontaktu i ako je razmenjena toplota jednaka nuli (ako im je **temperatura jednaka**).

- **Nulti princip** (zakon) **termodinamike**:

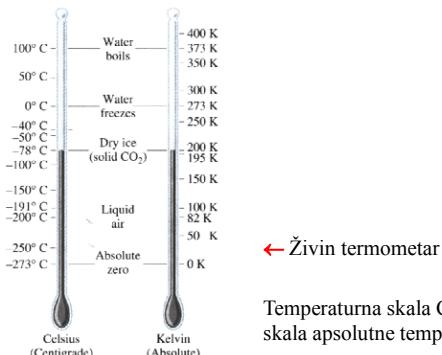
Ako su tela A i B, svako pojedinačno u toplotnoj ravnoteži sa telom C, tada su i tela A i B u toplotnoj ravnoteži jedno sa drugim.



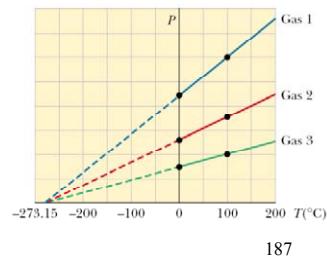
186

Temperatura i toplota.

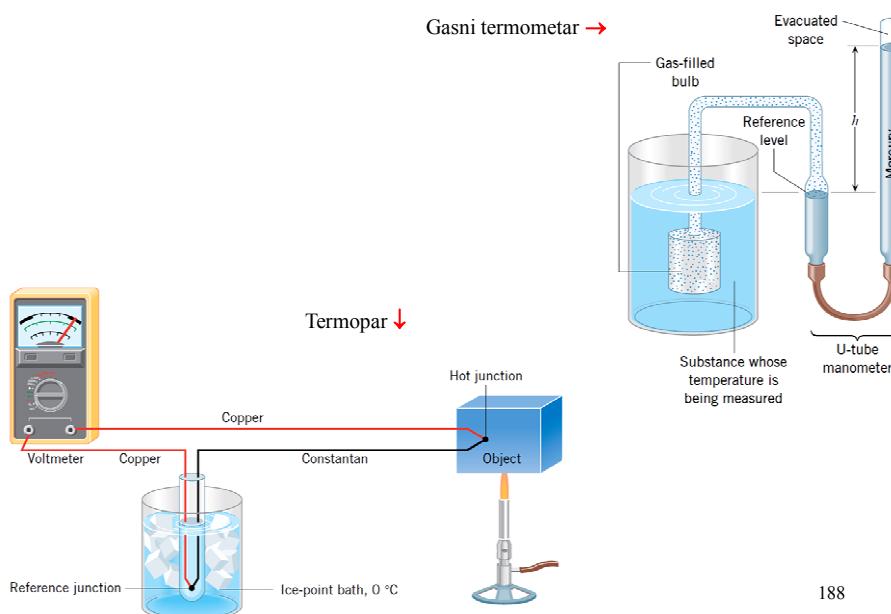
- Za merenje temperature se koriste **termometri**, čiji se rad zasniva na **reverzibilnoj** promeni neke *fizičke osobine* sa temperaturom (dužina čvrstog tela, zapremina tečnosti, pritisak gasa pri stalnoj zapremini, električni otpor, ...).
- Gasni termometri** (H_2 , He), **termometri sa tečnošću** (Hg , alkohol), **metalni termometar**, **termoelement** (termopar).
- Temperaturne skale: **Celzijusova**, Farenhajtova, Reomirova, **skala apsolutne temperature**.



$$T = 273.16 + t \text{ [K]}$$



Termometri i temperaturne skale



Toplota i masena količina toplote

- **Toplota** je jedan od vidova energije i manifestuje se kada se ona razmenjuje između tela kao rezultat **razlike u temperaturi** između njih.
- U kontaktu dvaju tela različitih temperatura, toplota prelazi sa tela **više** na telo **nije** temperature sve dok se one ne izjednače.
- Pošto je temperatura mera unutrašnje energije (mera ukupne energije kretanja molekula tela, ali i potencijalne energije koju oni poseduju zbog interakcije sa ostalim molekulima), proces prelaska toplote je proces **razmene unutrašnje energije** između tela.
- **Količina toplote** je unutrašnja energija razmenjena između tela. Jedinica je Džul ([J]).
- **Masena količina toplote c (specifična toplota)** je toplota koju treba dovesti **telu jedinične mase** da bi mu se temperatura promenila za jedinicu. Jedinica je [J/kg°C].

$$\Delta Q = cm\Delta t$$

$$c = \frac{\Delta Q}{m \Delta t}$$

$$Q = m \int_{t_1}^{t_2} c(t) dt$$

$$c = \frac{dQ}{m dt}$$

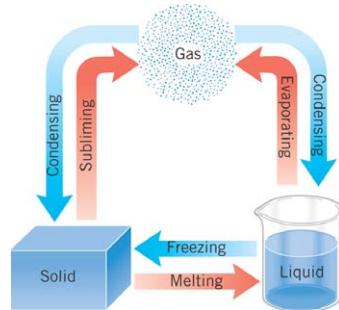
- **Toplotni kapacitet C_k** nekog tela je količina toplote koju treba dovesti **telu** da bi mu se temperatura povisila za jediničnu vrednost.

$$C_k = \frac{dQ}{dt} = mc$$

189

Latentna toplota faznog prelaza

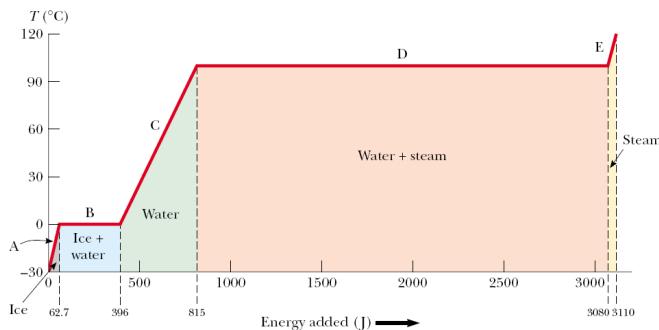
- **Fazni prelaz** je promena u obliku postojanja neke materije. U širem smislu, osim promene agregatnog stanja (čvrsto - tečno - gasovito), promena faze podrazumeva i promene u unutrašnjoj gradi (strukturi) materijala.
- Prilikom faznog prelaza usled dovođenja ili odvođenja toplote **menja se unutrašnja energija tela**, ali **bez promene temperature tela**.
- Promena **agregatnog stanja** strukturno uređenih (kristalnih) **materijala** praćena je **apsorpcijom** ili **oslobađanjem** toplote i dešava se na tačno definisanoj temperaturi.



190

Latentna toplota faznog prelaza

- Prilikom promene agregatnog stanja, bilo da supstanca prima toplotu, bilo da je osloboda, **temperatura se ne menja**.



- Latentna toplota q** (u [J/kg]) je toplota oslobođena ili apsorbovana prilikom promene agregatnog stanja (faznog prelaza) jedinične mase supstance.

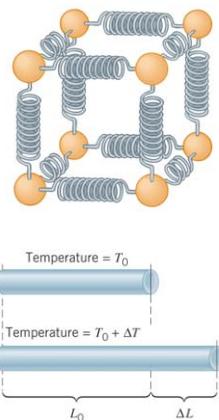
$$q = \frac{\Delta Q}{m}$$

191

Širenje čvrstih tela pri zagrevanju

- Pri zagrevanju povećava se zapremina tela jer se **ravnotežna rastojanja** između molekula i atoma, koji čine građu tela, postepeno povećavaju.
- U slučaju da je jedna dimenzija tela znatno veća od ostalih, tada se širenje može svesti na **linearno** širenje.
- Za uže temperaturne intervale, relacija koja sasvim zadovoljavajuće opisuje promenu linearnih dimenzija tela sa temperaturom glasi:

$$\ell = \ell_0(1 + \alpha t) \quad \Rightarrow \quad \alpha = \frac{\Delta \ell / \ell_0}{\Delta t}$$



- Termički koeficijent **linearog** širenja α predstavlja **relativnu** promenu linearnih dimenzija tela pri jediničnoj promeni temperature.
- Zapreminska širenje čvrstih tela opisuje:

$$V = V_0(1 + \gamma t)$$

γ - termički koeficijent zapreminskog širenja ($\gamma=3\alpha$).

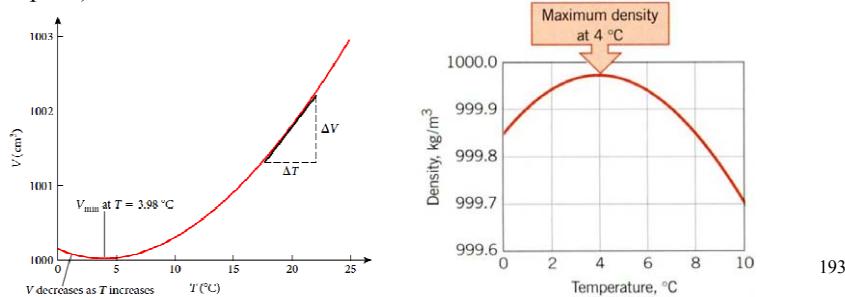
192

Širenje tečnosti pri zagrevanju

- Usled toga što tečnosti nemaju stalan oblik, kod njih možemo govoriti samo o **zapreminskom** širenju.

$$V = V_0(1 + \gamma t)$$

- Voda ima **anomalno** ponašanje u pogledu termičkog širenja zbog posebne prirode hemijskih veza u molekulima i između njih.
- Od 0 °C do 4 °C koeficijent γ je negativan (sažimanje, smanjenje zapremine vode → povećanje gustine) dok je iznad 4 °C pozitivan (zapremina raste → gustina opada).



193

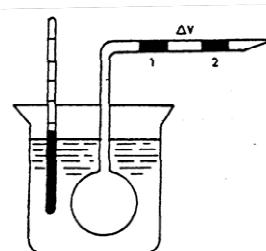
Širenje gasova pri zagrevanju

- Kao i kod tečnosti, i gasovi se mogu okarakterisati samo termičkim koeficijentom **zapreminskog** širenja.
- Pri promeni temperature, kod gasova se istovremeno menjaju i zapremina i pritisak.
- Ako se pritisak održava konstantnim ($p=\text{const.}$):

$$V_t = V_0(1 + \gamma t)$$

γ - termički koeficijent zapreminskog širenja

$$\gamma = \frac{1}{273.15} = 0.0036604 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$



- Svi gasovi imaju isti termički koeficijent širenja (Šarlov zakon).

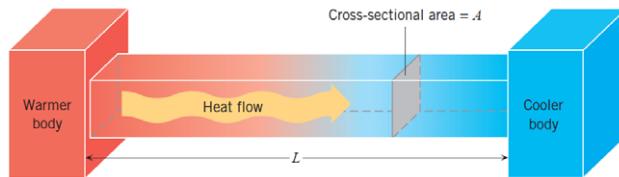
194

Prenošenje topote

- Prenos topote sa jednog na drugo telo se odvija spontano i to sa toplijeg na hladnije telo.
- Principijelno, razlikuju se tri načina prenosa topote: **provodenje**, **konvekcija** (strujanje) i **zračenje**.

1. Provodenje topote

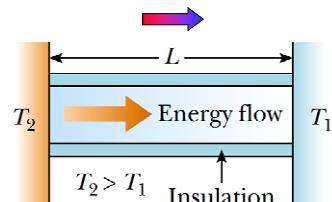
- Prenos topote **provodenjem** se ostvaruje **interakcijom** delića koji vrše termičko kretanje, pri čemu se delovi tela ne pomeraju.
- Provodenje topote je proces u kome se toplota prenosi **direktno kroz materijal** pri čemu **ne dolazi do premeštanja** sastavnih delova materijala.
- Materijale, prema tome kako provode toplotu, delimo na **toplotne provodnike** i **toplotne izolatore**.



195

1. Provodenje topote

- Količina topote Q koja se **provodenjem** prenosi kroz materijal u obliku šipke zavisi od:
 - vremena provodenja τ ,
 - razlike temperature ($t_2 - t_1$),
 - površine poprečnog preseka S ,
 - dužine šipke L .



$$Q = \lambda S \frac{t_2 - t_1}{L} \tau$$

λ – koeficijent toplotne provodljivosti (u [W/mK])

$(t_2 - t_1)/L = \Delta t/\Delta x$ – **gradijent temperature**

- Veća količina topote se prenese za **duži** period provodenja, pri većoj razlici temperatura uspostavljenoj na **kraćem rastojanju** i pri većem poprečnom preseku kroz koji se toplota prenosi.

196

2. Prenošenje topline konvekcijom (strujanjem)

- Prenošenje topline putem **pokretanja (strujanja)** toplog materijala (fluida) je **konvekcija**.
- **Prirodna konvekcija** je pojava kada se topli materijal kreće sam od sebe (spontano) zbog **razlika u gustini**.
- **Prinudna konvekcija** je kretanje (strujanje) toplog materijala pod uticajem **spoljašnjih faktora**.
- Razmena topline između **površine** na jednoj temperaturi t_1 i **fluida** na drugoj temperaturi t_2 zavisi od niza činilaca:
 - oblik i nagib **dodirne površine**;
 - gustina, viskoznost, masena količina topline, toplotna provodljivost **fluida**;
 - način kretanja **fluida** (laminarno ili turbulentno), ...
- Količina topline Q koju **površina S** primi ili preda **konvekcijom** u **toku vremena τ** , ako je između površine i fluida **razlika temperatura Δt** , iznosi



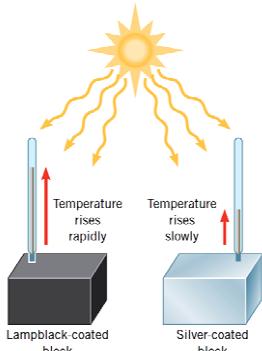
$$Q = h S \Delta t \tau$$

h - koeficijent konvekcije

197

3. Prenošenje topline zračenjem

- Toplota se između tela može prenositi i **bez direktnog kontakta – zračenjem**, tj. emisijom elektromagnetskog toplotnog zračenja.
- Sva tela **neprestano** zrače, ali istovremeno i apsorbuju energiju u obliku elektromagnetskih talasa. U tome značajnu ulogu ima površina tela.
- Ukupna energija zračenja koje pada na neko telo delimično se **apsorbuje**, delimično **reflektuje**, a delimično **prođe** kroz njega.
- Kada je neko telo u termodinamičkoj ravnoteži sa okolinom, znači da su **jednake** količine **emitovane** i **apsorbovane** energije putem zračenja.



$$a + r + t = 1$$

a - koeficijent apsorpcije

r - koeficijent refleksije

t - koeficijent transparencije

Za $a=1$ - **apsolutno crno telo** - apsorbuje svu toplotu
Za $r=1$ - **apsolutno belo telo** - reflektuje svu toplotu
Za $t=1$ - **apsolutno transparentno telo** - propušta svu toplotu (zračenje)

198

3. Prenošenje topline zračenjem

- Količina topline Q koja se putem zračenja emituje od strane **apsolutno crnog tela** srazmerna je vremenu emitovanja τ , površini S , ali i emisionoj sposobnosti (moći) tela W_{ec} , koja je srazmerna T^4 .

$$Q = \sigma T^4 S \tau$$

- Ukupna emisiona moć (sposobnost) **crnog tela** W_{ec} (energija koju telo izrači sa jedinične površine u jedinici vremena) data je **Štefan-Bolcmanovim zakonom**:

$$W_{ec} = \sigma T^4 \quad \sigma = 5.7 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$$

Štefan-Bolcmanova konstanta

- Emisiona moć (sposobnost) W_e bilo kojeg tela zavisi od **relativne** emisione sposobnosti tela e ($0 < e < 1$), koja je karakteristika materijala i strukture površine tela koje zrači:

$$W_e = e \sigma T^4$$

199

Molekulsko - kinetička teorija gasova. Jednačina stanja idealnog gasa

- Prva saznanja i iskustva o tome da toplota može izvršiti korisni rad - XVII vek - uticaj na razvoj nauke o toploti – termofizike.
- Rezultat intenzivnih istraživanja u hemiji i fizici u XVII, XVIII i XIX veku je zaključak da su **atomi i molekuli** su osnovni sastavni delovi materije - materija je **diskretnе** prirode.
- Rezultat saznanja da je materija sastavljena od atoma i molekula pogodovao je nastanku tzv. **molekulsko-kinetičke teorije gasova** – teorije koja polazeći od proučavanja ponašanja **mikroskopskih** sastavnih delova materije pokušava (i uspeva) da objasni mnoge **makroskopske pojave** i **termičke veličine** (pritisak gase, temperatura i njena promena, promena agregatnog stanja, prenošenje toplote, ...).

200

Atomsko-molekulski sastav materije

- Relativna atomska masa A_r - neimenovan broj koji pokazuje koliko je puta prosečna masa atoma nekog elementa veća od 1/12 mase atoma izotopa ugljenika C-12 (tzv. atomska jedinica mase $u=1.66 \cdot 10^{-27}$ kg).
- Prosečna masa atoma je srednja vrednost mase atoma **normalne izotopske smeše** koja se u prirodi nalazi.
- Relativna molekulska masa M_r - neimenovan broj koji pokazuje koliko je puta prosečna masa nekog molekula veća od 1/12 mase izotopa atoma ugljenika C-12.
- 1 mol je ona količina supstance (atomi, molekuli, joni, elektroni, ...), koja sadrži toliko elementarnih jedinki koliko je atoma sadržano u 0.012 kg izotopa ugljenika C-12.

201

Atomsko-molekulski sastav materije

- Molarna masa je odnos mase supstance m i broja molova n (masa jednog mola supstance):

$$M = \frac{m}{n}$$

- 1 mol sadrži Avogadrov broj čestica N_A $N_A = 6.022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
- Broj molova neke supstance se nalazi preko odnosa mase supstance m i molarne mase M :

$$n = \frac{m}{M} = \frac{N}{N_A}$$

202

Makroskopski opis idealnog gasa.

Jednačina stanja idealnog gasa.

- Osobine gasova su veoma važne u mnogim termodinamičkim procesima (vremenske prilike, parne mašine, motori sa gasovima kao radnim supstancama, ...).
- Osnovni parametri (veličine) koji opisuju stanje gasa su:
 - ❖ pritisak p [Pa]
 - ❖ zapremina V [m^3]
 - ❖ temperatura T [K]
 - ❖ količina n [mol]
- Eksperimentima je jednostavno utvrđena **međuzavisnost** između parametara za slučaj gasa na relativno **niskim pritiscima**, reda atmosferskog, i **temperaturama reda sobne** (gasovi male gustine).



203

Jednačina stanja idealnog gasa.

Pod tim uslovima pojam **idealni gas** predstavlja skup **velikog broja** čestica (atoma ili molekula):

- koje se kreću potpuno **nasumično**;
- koje imaju **zanemarljivu zapreminu** u poređenju sa zapreminom suda u kome se gas nalazi (posmatraju se kao **materijalne tačke**);
- u kome su **rastojanja** između molekula **velika**, pa su međumolekularne **sile zanemarljive**;
- u kojima molekuli međusobno interaguju isključivo **elastičnim sudarima** – tada se interakcija vrši putem kratkodometnih međumolekularnih sila.
- Dakle, pri **niskim pritiscima** i **visokim temperaturama** svi gasovi se mogu smatrati idealnim.

204

Jednačina stanja idealnog gasa.

Eksperimenti su pokazali sledeće:

- ako se gas održava na konstantnoj temperaturi, pritisak određene količine gase je obrnuto proporcionalan zapremini suda u kome se nalazi (Bojl-Mariotov zakon);
- ako se pritisak gase održava konstantnim, zapremina određene količine gase je direktno proporcionalna temperaturi gase (Šarlov zakon);
- ako se zapremina gase održava konstantnom, pritisak određene količine gase je direktno proporcionalan temperaturi (Gej-Lisakov zakon).

Ova zapažanja su objedinjena u jednačini stanja idealnog gasa:

$$pV = nRT \quad pV = \frac{m}{M} RT = \frac{N}{N_A} RT = NkT \quad pV = NkT$$

$R=8.314 \text{ J/molK}$ – univerzalna gasna konstanta; $k=1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ – Boltzmanova konstanta ($k=R/N_A$).

- Svaka promena nekog od parametara uzrokuje promenu ostalih. U slučaju konstantne količine gasa:

$$\frac{pV}{T} = \text{const.}$$

205

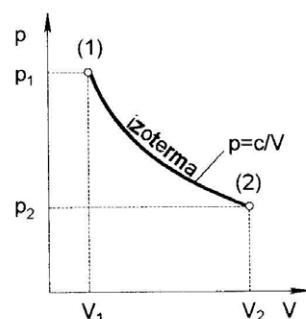
Gasni zakoni. Bojl-Mariotov zakon.

- Ponašanje idealnog gasa opisuju Bojl-Mariotov, Gej-Lisakov i Šarlov zakon.
- **Bojl-Mariotov zakon:** Pri konstantnoj temperaturi, zapremina date mase gase obrnuto je srazmerna pritisku.

$$pV = nRT \quad (n = \text{const.}, T = \text{const.})$$

$$pV = \text{const.}$$

- Krive na p - V dijagramu koje opisuju procese promene stanja gase pri konstantnoj temperaturi su izoterme.



206

Gej Lisakov i Šarlov zakon

- **Šarlov zakon:** Zaređene količine idealnog gasa pri konstantnom pritisku menjaju se linearno sa promenom temperature:

$$(n = \text{const.}, p = \text{const.})$$

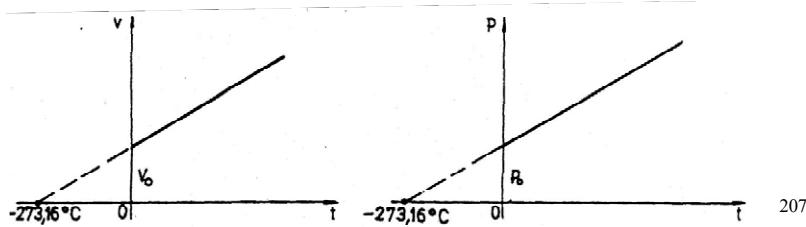
$$V = V_0(1 + \gamma t)$$

- **Gej-Lisakov zakon:** Pritisak određene količine idealnog gasa pri konstantnoj zapremini menjaju se linearno sa promenom temperature:

$$(n = \text{const.}, V = \text{const.})$$

$$p = p_0(1 + \gamma t)$$

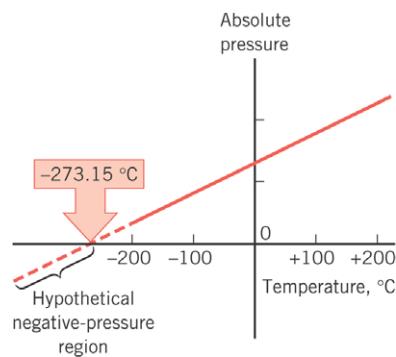
- Krive na p - V dijagramu koje opisuju procese promene stanja gase pri konstantnom pritisku, odnosno zapremini su **izobare**, odnosno **izohore**.



207

Gej Lisakov i Šarlov zakon

- Gej-Lisakov i Šarlov zakon ukazuju na najnižu moguću temperaturu u prirodi - **apsolutnu nulu** (-273.16°C), na kojoj idealan gas ne vrši pritisak na zidove suda. Ovo je početak skale apsolutne temperature (Kelvinova skala).
- Pošto je pritisak posledica udara molekula o zidove suda, sledi da na ovoj temperaturi molekuli prestaju da se kreću.



208

Kinetička teorija gasova

- **Molekulsко-kinetičка теорија** gasova polazi od molekula, kao najmanjih sastavnih delova gasa i na osnovу njihovog ponašanja i uz statistički pristup objašnjava i povezuje njihove **makroskopsке особине** (pritisak, temperatura, energija).

Osnovne pretpostavke kinetičke teorije gasova:

- ❖ Sva tela se sastoje od **velikog broja** stabilnih čestica (molekula, atoma) i međumolekulskog prostora. To znači da se njihovo ponašanje može izučavati primenom statističkog računa.
- ❖ Gas se posmatra kao čista supstanca. To znači da su svi molekuli jednaki.
- ❖ **Rastojanje** između pojedinih čestica je **veliko** u poređenju sa njihovim sopstvenim dimenzijama. To znači da se molekuli gasa posmatraju kao materijalne tačke, a njihova ukupna zapremina je zanemarljivo mala u poređenju sa zapreminom prostora koji gas ispunjava.
- ❖ Između molekula deluju **sile** električne prirode koje zavise od **vrste molekula** i međumolekularnog **rastojanja**.

209

Kinetička teorija gasova

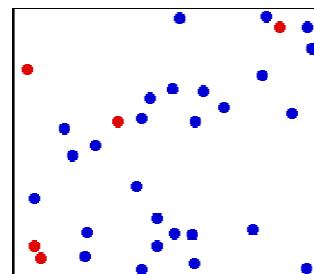
- ❖ Molekuli se u gasovima **stalno i хаотично крећу**. Na ovo kretanje se može uticati samo promenom temperature. Haotičnost (nasumičnost) kretanja znači da se bilo koji molekul može kretati u bilo kom pravcu sa jednakom verovatnoćom i to sa brzinom koja ima širok spektar vrednosti.
- ❖ Pošto se molekuli **idealnог** gase kreću se haotično, u svim pravcima podjednako verovatno, oni interaguju sa drugim molekulima i zidovima suda i neprekidno **менјају** pravac i intenzitet brzine (menja se količina kretanja koju poseduju) usled razmene energije sa ostalim molekulima
- ❖ Interakcije (sudari) između molekula su **потпуно еластичне** i ostvaruju se samo putem kratkodometnih sila (na malom rastojanju). Na većim rastojanjima se uzima da molekuli ne utiču jedan na drugi.

210

Osnovna jednačina kinetičke teorije gasova

- Primena prepostavki kinetičke teorije gasova omogućava povezivanje veličina koje se odnose na **jedan** molekul sa **parametrima** koji opisuju stanje gasa (pritisak, temperatura).
- Molekuli gase u sudu se haotično kreću i sudarajući se sa zidovima suda deluju izvesnom silom na njih. Iako je sila slaba, zbog ogromnog broja molekula, ukupna sila delovanja gasa na zidove suda je velika. Kada se ona obračuna po jedinici površine, dobija se veličina **pritiska** gase.
- Pritisak gase je uslovjen topotnim kretanjem molekula i zavisi od njihove **brzine**, odnosno **kinetičke energije translacionog kretanja**.
- Osnovna jednačina kinetičke teorije gasova daje zavisnost između **pritiska** i **srednje kinetičke energije translacionog kretanja** molekula gasa.

$$p = f(\bar{\varepsilon}_\tau)$$



211

Osnovna jednačina kinetičke teorije gasova Molekularni model pritiska idealnog gasa

- Ukupan **pritisak** na dati zid suda u kome se molekuli gasa nalaze:

$$p = \frac{2}{3} \left(\frac{N}{V} \right) \frac{m \bar{v}^2}{2}$$

N – broj molekula; V – zapremina suda; m – masa molekula; \bar{v}^2 – srednja vrednost kvadrata brzine za sve molekule u gasu.

- Srednja kinetička energija **translacionog** kretanja **jednog** molekula:

$$\bar{\varepsilon}_\tau = \frac{m \bar{v}^2}{2}$$

- **Osnovna jednačina kinetičke teorije gasova** – pritisak idealnog gasa je proporcionalan **konzentraciji molekula** (broju molekula po jedinici zapremine) i srednjoj **kinetičkoj energiji translacionog kretanja** molekula gasa:

$$p = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \bar{\varepsilon}_\tau$$

212

Daltonov zakon

- Osnovna jednačina kinetičke teorije gasova primenjena na smešu gasova:

$$\frac{N}{V} = \frac{N_1}{V} + \frac{N_2}{V} + \dots \quad p = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \bar{\varepsilon}_\tau = \frac{2}{3} \left(\frac{N_1}{V} + \frac{N_2}{V} + \dots \right) \bar{\varepsilon}_\tau$$

N_i/V – koncentracija molekula i -tog gasa u smeši gasova

$$p = p_1 + p_2 + \dots$$

p_i – parcijalni pritisak – pritisak koji vrši pojedina komponenta smeše, kada bi se u sudu nalazila sama u istoj količini kao i u smeši.

Daltonov zakon:

Za idealne gasove pritisak koji vrši smeša gasova jednak je zbiru parcijalnih pritisaka gasova koji čine smešu.

213

Molekularni model temperature idealnog gasa

$$pV = NkT \quad p = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \bar{\varepsilon}_\tau \Rightarrow pV = \frac{2}{3} N \bar{\varepsilon}_\tau = NkT$$


$$\bar{\varepsilon}_\tau = \frac{3}{2} kT$$

- Srednja kinetička energija **translatornog** kretanja molekula gase srazmerna je apsolutnoj temperaturi.
- Obrnuto, **temperatura** je mera srednje **kinetičke energije translatornog** kretanja molekula gasa:

$$T = \frac{2}{3k} \bar{\varepsilon}_\tau$$

i od nje zavisi i pritisak gasa:

$$p = \frac{N}{V} kT$$

- Na $T=0$ K (apsolutna nula) teorijski prestaje kretanje molekula gasa i pritisak postaje jednak nuli.

214

Stepeni slobode kretanja molekula

$$\overline{v_x^2} = \frac{1}{3} \overline{v^2} \Rightarrow \frac{m\overline{v_x^2}}{2} = \frac{1}{3} \frac{m\overline{v^2}}{2} = \frac{1}{3} \frac{3}{2} kT = \frac{1}{2} kT \quad \leftarrow \text{Kinetička energija jednog molekula gasa duž jedne (x-koordinatne ose.)}$$

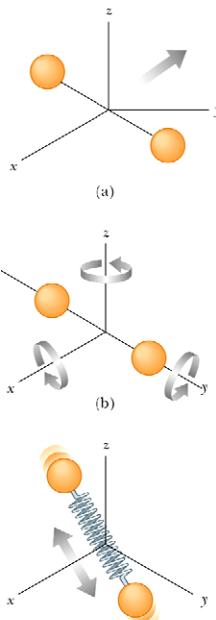
- Slično tome:

$$\frac{m\overline{v_y^2}}{2} = \frac{m\overline{v_z^2}}{2} = \frac{1}{2} kT$$

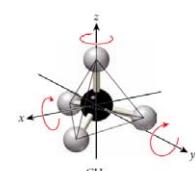
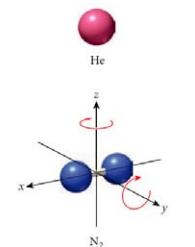
- Svaki **nezavisan pravac kretanja** molekula gasa (duž x-, y- i z-ose) doprinosi ukupnoj kinetičkoj energiji **translatornog** kretanja u **jednakom** iznosu (**$kT/2$**).
- Nezavisni načini kretanja su tzv. **stepeni slobode kretanja** molekula idealnog gasa.
- **Broj stepeni slobode** kretanja sistema čestica je broj **nezavisnih koordinata** koji određuju položaj sistema.
- Drugim rečima, to je **broj mogućih vrsta kretanja** pomoću kojih možemo opisati složeno kretanje čestica sistema.

215

Raspodela energije po stepenima slobode



- Molekuli gase osim **3 translatorna** načina kretanja (duž sve 3 ose koordinatnog sistema) imaju mogućnost i **rotacije**, a na višim temperaturama **atomi** i znatno **osciluju** oko ravnotežnih položaja **u molekulu**.
 - jednoatomni molekul – 3t
 - dvoatomni molekul – 3t+2r
 - tro- i višeatomni molekul – 3t+3r
- Prosečna energija po stepenu slobode kretanja (ne samo za **translatorni**, već i za **rotacioni** i **oscilatorni**):
- **Molekul sa i stepeni slobode** kretanja ima **srednju kinetičku energiju**:



$$\bar{\epsilon}' = \frac{1}{2} kT$$

$$\bar{\epsilon} = i\bar{\epsilon}' = \frac{i}{2} kT$$

216

Unutrašnja energija idealnog gasa

- **Unutrašnja energija U** idealnog gasa je zbir **energija kretanja** pojedinih molekula, ali u širem smislu i **potencijalnih energija** koje molekuli poseduju zato što na njih deluju ostali molekuli međumolekulskim silama.
- Ako smatramo da su **međumolekulske interakcije zanemarljive**, uzima se u obzir samo **kinetička energija** kretanja svih molekula.

$$U = \sum_{i=1}^N \varepsilon_i = N\bar{\varepsilon}$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{i}{2} kT$$

$$U = \frac{i}{2} NkT$$

$$Nk = Nk \frac{N_A}{N_A} = nR$$

$$U = \frac{i}{2} nRT$$

- **Temperatura** je mera srednje **kinetičke energije** molekula gase.
- Unutrašnja energija U idealnog gasa zavisi od **apsolutne temperature**, ali, strogo uzevši, i od **broja stepeni slobode** molekula (vrsta molekula).

217

Toplota i masena količina toplote idealnog gasa

- **Toplota** je jedan od vidova energije i manifestuje se kada se ona razmenjuje između tela.
- **Masena količina toplote c** (u [J/kgK]) je toplota koju treba dovesti **telu jedinične mase** da bi mu se temperatura promenila za jedinicu.
- Pri dovođenju toplote **gasu**, osim **temperature**, može se značajno promeniti još i **zapremina** gase.

$$c = \frac{dQ}{m dt}$$

❖ Zagrevanje pri $V=\text{const.}$

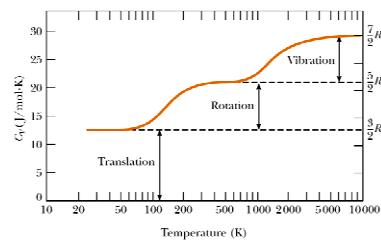
- Gas ne vrši rad (nema promene zapremine) već se dovedena količina toplote troši samo na **povećanje unutrašnje energije**.

$$dQ = mc_V dT = dU \Rightarrow$$

$$c_V = \frac{1}{m} \frac{dU}{dT} \quad U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} RT$$

$$c_V = \frac{i}{2} \frac{R}{M}$$

Primer vodonika (dvoatomski gas) – sa porastom temperature novi oblici kretanja doprinose ukupnoj specifičnoj toploti



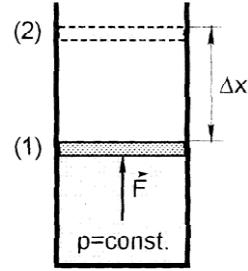
218

Masena količina toplice idealnog gasa

❖ Zagrevanje pri $p=\text{const.}$

- Dovedena količina toplice se troši delom na **povećanje unutrašnje energije**, a delom na **vršenje rada** ($dA=pdV$) protiv spoljašnjeg pritiska.

$$\left. \begin{array}{l} dQ = dU + pdV \\ dQ = mc_p dT \end{array} \right\} \Rightarrow c_p = \frac{1}{m} \left(\frac{dU}{dT} + p \frac{dV}{dT} \right) = c_V + \frac{p}{m} \frac{dV}{dT}$$



$$p \frac{dV}{dT} = \frac{m}{M} R$$

$$c_p = c_V + \frac{R}{M}$$

$$c_p = \frac{i+2}{2} \frac{R}{M}$$

$$\frac{c_p}{c_V} = \frac{i+2}{i} \equiv \kappa$$

- Odnos masenih količina toploca c_p/c_V (**adijabatska konstanta**) kod idealnih gasova (niži pritisci i temperature reda sobne) ne zavisi od temperature, pritiska i zapremine, već samo od **vrste gase** (broja stepeni slobode).

219

Rad i toploca u termodinamičkim procesima

- Makroskopsko stanje** idealnog gasa je opisano preko 4 parametra:
 - pritisak p ,
 - zapremina V ,
 - temperatura T
 - količina gasa n *
- Unutrašnja energija** nekog sistema čestica (a to je zbir, pre svega, **kinetičke**, a zatim i potencijalne energije molekula) može se povećati na dva načina:
 - **dovodenjem toplice** • **vršenjem rada** nad tim sistemom čestica (gasa).
- U većini slučajeva od značaja pod **sistemom čestica** se podrazumeva **izvesna količina gasa** koji se približno ponaša kao **idealni** (zanemaruju se međusobne interakcije, a sudari između molekula su potpuno elastični).
- Važeći zakoni termodinamike su formulisani na osnovu proučavanja rada **toplotnih mašina** (parna mašina, motori sa unutrašnjim sagorevanjem, ...) u kojima je **radna supstanca gas** koji menja svoje stanje kada:
 - razmenjuje toploco sa okolnom sredinom, odnosno
 - kada **gas vrši rad ili kada se nad njim vrši rad**.
- Toplote mašine** su uređaji koji pretvaraju toplostnu energiju u neki drugi oblik (mehaničku, električnu, ...), tj. vrše koristan rad.

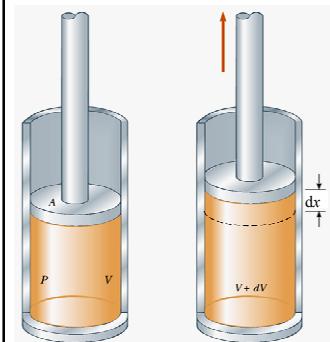
* Parametar n u sebi sadrži informaciju o masi gasa m i o vrsti gasa, preko molarne mase M .

220

Rad i toplota u termodinamičkim procesima

- U proučavanju promena gasnog stanja (usled razmene toplote ili rada sa okolinom) u toplotnim mašinama pretpostavlja se da je gas u unutrašnjoj **termodinamičkoj ravnoteži** – svi delovi gasa u nekoj zatvorenoj zapremini su **na istoj temperaturi i pritisku**.

Primer: Proučava se rad toplotne mašine na osnovu čega se može doći do izraza za razmenjenu količinu toplote ili rada sa okolinom – izvesna količina idealnog gasa koja se nalazi u cilindru toplotne mašine je sa jedne strane zatvorena pokretnim (u posebnom slučaju nepokretnim) klipom.



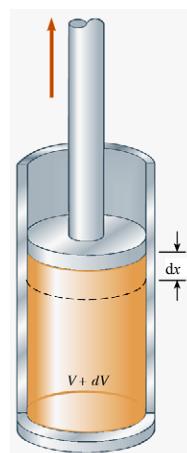
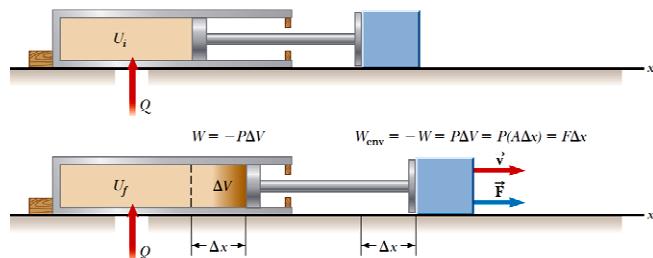
- Gas u cilindru ima zapreminu V i vrši pritisak p na zidove i na klip (čija je površina S), tj. deluje silom $F=pS$ na njega (slika).
- Prepostavimo da se **gas širi** u cilindru **kvazistatički – postepeno** povećava zapreminu tako da je uvek u nekom novom, ali **ravnotežnom** stanju.

221

Rad i toplota u termodinamičkim procesima

- Pri pomeranju cilindra za dx , gas prilikom **širenja**, tj. pri **elementarnom** povećanju zapremine, izvrši **elementarni rad** dA koji je **pozitivan** jer je pozitivna i promena zapremine:

$$dA = F \, dx = pS \, dx = p \, dV$$



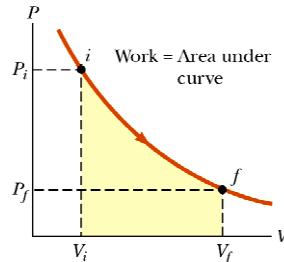
- Pri **sabijanju** gasa, promena zapremine je negativna (V se smanjuje), pa je i **rad** koji je izvršio gas pri pomeranju klipa **negativan** – u tom slučaju se kaže da je rad izvršen **nad** gasom.
- Dakle, **u termodinamici pozitivan rad je onaj koji vrši sistem**, tj. kada se energija prenosi okolini (izvan sistema).

222

Rad i toplota u termodinamičkim procesima

- **Ukupan** (mehanički) **rad** koji izvrši gas na pomeranju klipa kada se njegova zapremina povećava od V_1 do V_2 dobija se integracijom (sabiranjem) elementarnih radova:

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p \, dV$$

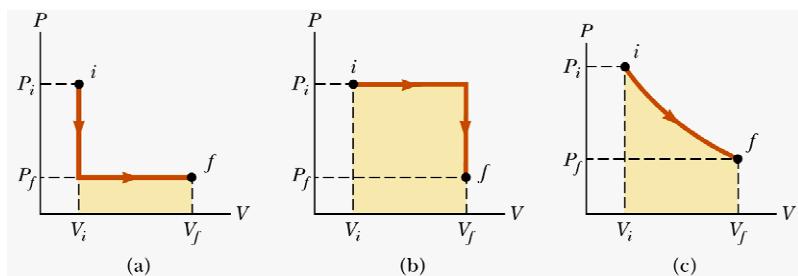


- **Vrednost izvršenog rada A** prilikom širenja gasa u cilindru predstavlja površinu ispod krive koja spaja početno i krajnje stanje na p - V dijagramu.
- Da bi se odredila razmenjena energija sa okolinom (izvršen rad, bilo od strane sistema ili nad sistemom čestica – gasom) neophodno je u svakom trenutku prilikom promene gasnog stanja poznavati parametre koji opisuju to stanje (ili njihove međuzavisnosti) – p , V , T i n (ako se eventualno menja i količina gasa).

223

Rad i toplota u termodinamičkim procesima

- U zavisnosti od **oblike krive na p - V dijagramu**, tj. od načina na koji se menja **gasno stanje** od početnog do krajnjeg, zavisiće i **razmenjena količina energije** sa okolinom (putem prenosa topline Q), tj. **rad A** koji izvrši gas (ako je A pozitivno), odnosno koji se izvrši nad gasom (ako je A negativno).



- Dakle, **u zavisnosti od puta** između istog početnog i krajnjeg stanja gasa na p - V dijagramu, odnosno **od procesa** u kojima gas menja svoje stanje, zavisiće i **razmenjena toplota Q** , odnosno **izvršen rad A** .

224

Prvi zakon termodinamike

- Prvi zakon termodinamike je specijalni slučaj **zakona održanja energije** koji obuhvata promene unutrašnje energije U (zbir kinetičke i potencijalne energije molekula) i razmenu toploće Q i rada A sa okolinom.
- Razmena **energije** sa okolinom se može vršiti na dva načina:
 - putem **vršenja rada**, gde je neophodno pomeranje tačke delovanja sile (ili pritiska);
 - putem **razmene toploće**, koja se vrši preko slučajnih sudara između molekula sistema.
- Za bolje razumevanje I zakona temodinamike, prepostavimo da idealni gas **postepeno menja svoje stanje** od nekog početnog (okarakterisanog parametrima kao što su pritisak p_1 i zapremina V_1) do nekog krajnjeg stanja (okarakterisanog pritiskom p_2 i zapreminom V_2), pri čemu on prima energiju putem toploće Q od okoline i istovremeno vrši rad A .

225

Prvi zakon termodinamike

- Kada sistem (gas) menja svoje stanje od nekog početnog do nekog krajnjeg stanja, tada je promena unutrašnje energije sistema (gasa) ΔU data razlikom između razmenjene toploće sa okolinom i izvršenog rada od strane gasa.

$$\Delta U = Q - A$$

- Ovo je **matematička formulacija I zakona termodinamike**. Vidi se da zakon povezuje razmenjenu toplotu Q i izvršeni rad A sa promenom unutrašnje energije (ΔU), koja je **osobina** sistema.
- Iako i razmenjena toploća Q i izvršeni rad A (od strane sistema ili nad njim) zavise od procesa u kojem se menja stanje gase, tj. od puta na p - V dijagramu, **promena unutrašnje energije ne zavisi** od puta kojim gas menja stanje od početnog do krajnjeg.
- Veličina Q je pozitivna ako sistem prima topotu, a negativna ako je otpušta, predaje okolini.
- Rad A je pozitivan kada sistem (gas) vrši rad nad okolinom, a negativan ako se rad vrši nad gasom.

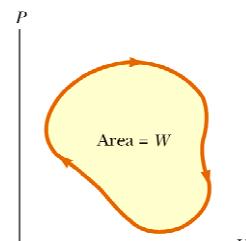
226

Neke primene I zakona termodinamike

Analiza nekih slučajeva termodinamičkih procesa sa gledišta I zakona termodinamike:

- Posmatrajmo, kao prvo, **izolovan sistem** – sistem koji ne interaguje sa okolinom. U tom slučaju je razmenjena toplota jednaka nuli ($Q=0$), pa je i rad koji vrši sistem jednak nuli ($A=0$). Sledi da je i promena unutrašnje energije jednak nuli ($\Delta U=0$), odnosno da **unutrašnja energija izolovanog sistema ostaje konstantna**.
- Sada posmatrajmo sistem koji **nije izolovan** i koji menja svoje stanje u **cikličnom procesu** (proses koji počinje i završava se **u istom stanju**; na p - V dijagramu je predstavljen zatvorenim linijom). I u ovom slučaju nema promene unutrašnje energije, a primljena toplota od okoline je jednak radu koji sistem izvrši:

$$\Delta U = 0 \quad Q = A$$

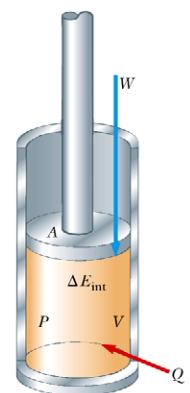


- Može se pokazati da je **rad** koji izvrši sistem u **cikličnom procesu** jednak površini ograničenoj krivom na p - V dijagramu.

227

Neke primene I zakona termodinamike

- Najčešći **termodinamički procesi** u kojima gas menja svoje stanje (okarakterisano sa 4 parametra: p , V , T i n) su:
 - izotermski ($T=\text{const.}$)
 - izobarski ($p=\text{const.}$)
 - izohorski ($V=\text{const.}$)
 - adijabatski (kada nema razmene toplote sa okolinom, $Q=0$).



- 1. **Adijabatski proces** – dešava se kada je sistem (gas) izolovan od okoline ili kada se dešava tako brzo, da nema vremena za razmenu toplote sa okolinom za vreme trajanja promene stanja sistema ($Q=0$).

- Iz I zakona termodinamike, za adijabatski proces sledi:

$$Q = 0 \quad \Rightarrow \quad \boxed{\Delta U = -A}$$

228

Neke primene I zakona termodinamike

- Ako se gas u **adijabatskom** procesu **širi**, tada je rad A pozitivan, a unutrašnja energija se smanjuje ($\Delta U < 0$; temperatura opada) – kaže se da sistem vrši rad na račun **smanjenja** unutrašnje energije.

$$A = -\Delta U$$

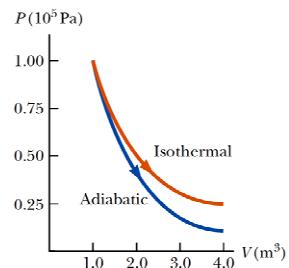
- Nasuprot tome, ako se vrši adijabatska **kompresija** (sabijanje) gasa, tada unutrašnja energija raste ($\Delta U > 0$; temperatura raste).
- Najznačajniji primjeri adijabatskih procesa se dešavaju u motorima sa unutrašnjim sagorevanjem, dizel motorima, rashladnim sistemima, ...
- Za **adijabatske** procese važi sledeća zakonitost:

$$pV^\kappa = \text{const.} \quad \kappa = \frac{c_p}{c_v} = \frac{i+2}{i}$$

- Veličina κ je **adijabatska konstanta** i zavisi od vrste gasa (preko broja stepeni slobode i).
- Pošto je promena unutrašnje energije data izrazom (slajd 218):

$$\Delta U = mc_v \Delta T = nC_v \Delta T \quad C_v = Mc_v$$

- **Rad u adijabatskom** procesu je: $A = -\Delta U = -nC_v \Delta T$



229

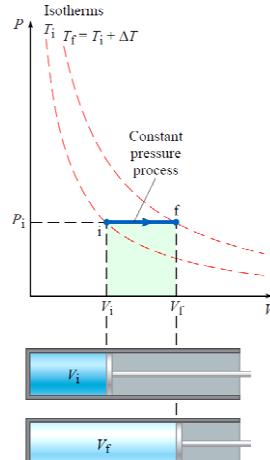
Neke primene I zakona termodinamike

- 2. **Izobarski proces** – proces u toku kojeg se pritisak gase ne menja ($p=\text{const.}$). I razmenjena toplota sa okolinom i izvršeni rad su različiti od nule.

- Na primeru gasa u cilindru sa **pokretnim klipom**, uvek su u ravnoteži konstantni pritisak gase u cilindru pod klipom, sa jedne strane, i atmosferski pritisak vazduha i težina klipa, sa druge strane.

- **Rad u izobarskom** procesu je:

$$A = p(V_2 - V_1)$$



Na p - V dijagramu linija koja opisuje stanje gase u svakom trenutku u **izobarskom** procesu je horizontalna, tzv. izbara.

230

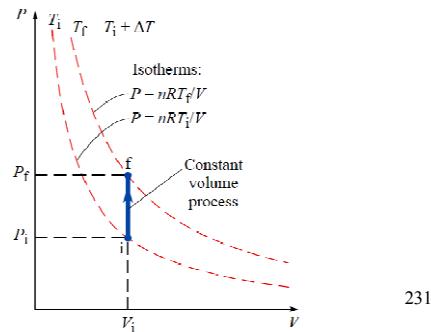
Neke primene I zakona termodinamike

3. Izohorski proces – proces u toku kojeg se zapremina gasa ne menja ($V=\text{const.}$) i usled toga nema vršenja rada ($A=0$) ni od strane gasa, ni nad gasom.

- Dakle, ako se toplota dovodi gasu u zatvorenom sudu, sa nepromenljivom zapreminom (klip cilindra je nepokretan), to uzrokuje samo povećanje unutrašnje energije ($\Delta U>0$), tj. iz I zakona termodinamike sledi:

$$A = 0 \quad \Rightarrow \quad \boxed{\Delta U = Q}$$

Na $p-V$ dijagramu linija koja opisuje stanje gase u svakom trenutku u izohorskom procesu je vertikalna, tzv. izohora.



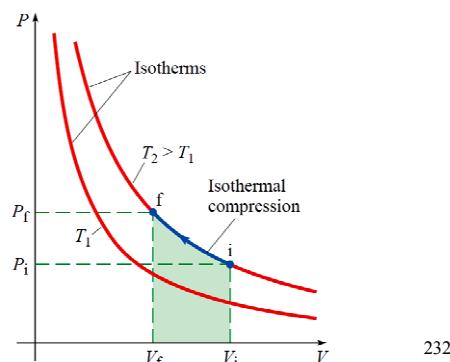
Neke primene I zakona termodinamike

4. Izoternski proces – proces u toku kojeg se temperatura gase ne menja ($T=0$) i usled toga nema promene unutrašnje energije, koja zavisi od temperature ($\Delta U=0$).

- Dakle, ako se toplota dovodi gasu u izoternskom procesu, ona će biti jednaka izvršenom radu:

$$\Delta U = 0 \quad \Rightarrow \quad \boxed{Q = A}$$

Na $p-V$ dijagramu linije koje opisuju stanje u svakom trenutku u izoternskom procesu su krive linije (hiperbole), tzv. izoterme.

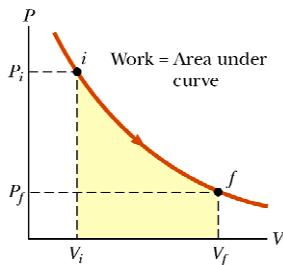


Neke primene I zakona termodinamike

- Pretpostavimo da se gas **širi** kvazistatički (dovoljno sporo), tako da je u svakom trenutku $T=\text{const}$.
- Da bi se našao **rad** u **izotermском** procesu iskoristi se jednačina stanja:

$$pV = nRT = \text{const.} \quad A = \int_{V_1}^{V_2} p dV = \int_{V_1}^{V_2} \frac{nRT}{V} dV = nRT \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V}$$

$$A = nRT \ln \frac{V_2}{V_1}$$



- Ovaj rad je **pozitivan** (vrši ga gas), ako je u pitanju **širenje** gasa ($V_2 > V_1$), a u slučaju **kompresije** (sabijanja) gasa ($V_2 < V_1$), rad je **negativan** (vrši se nad gasom).
- Na p - V dijagramu izvršeni rad je brojno jednak površini ispod hiperbole, između početne i krajnje zapremine (osenčeno).

233

I zakon termodinamike - rezime

proces	ΔU	Q	A
adijabatski	$nC_V\Delta T$	0	$-\Delta U$
izobarski	$nC_V\Delta T$	$nC_p\Delta T$	$p\Delta V$
izohorski	$nC_V\Delta T$	ΔU	0
izotermski	0	A	$nRT \ln \frac{V_2}{V_1}$
opšti slučaj	$nC_V\Delta T$	$\Delta U + A$	površina ispod krive u p - V dijagramu

234

Termodinamički procesi - podela

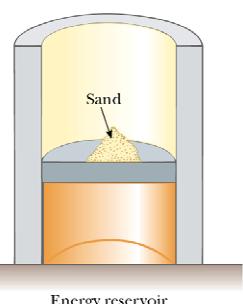
- Termodinamički procesi predstavljaju promene stanja sistema (to stanje je okarakterisano parametrima: p , V , T i n). U opštem slučaju, procesi mogu biti **ravnotežni** ili **neravnotežni**.
- **Ravnotežno stanje** nekog sistema je takvo stanje u kojem pri nepromenjenim spoljašnjim uslovima proizvoljno dugo vreme ostaju konstantne vrednosti parametara stanja sistema.
- Na dijagramu stanja (p - V , ili nekom drugom), koji prikazuje međuzavisnost parametara koji opisuju stanje sistema, ravnotežno **stanje** je prikazano **tačkom**.
- **Ravnotežni** termodinamički **procesi** su takve **promene stanja** sistema u kojima se promene parametara (p , V , T) tako **sporo** dešavaju da su u svakom trenutku **svi delovi** sistema praktično u ravnotežnom stanju. Kaže se da sistem menja svoje stanje prolazeći kroz **niz ravnotežnih stanja**.
- Na dijagramu stanja ravnotežni **proces** je prikazan **linijom** (krivom ili pravom), koju čini niz tačaka ravnotežnih stanja.
- **Brze** promene stanja uzrokuju da su u nekim delovima sistema pritisak i/ili temperatura različiti – tada je reč o **neravnotežnim** termodinamičkim **procesima**.

235

Termodinamički procesi – podela

Druga podela deli termodinamičke procese na **reverzibilne** (povratne) i **ireverzibilne** (nepovratne).

- **Reverzibilni procesi** su oni koji se mogu odvijati i u suprotnom smeru, pri čemu će sistem prolaziti kroz ista (ravnotežna) stanja, ali obrnutim redosledom. Takvi procesi mogu biti **samo ravnotežni** procesi.
 - Ako u reverzibilnom procesu u jednom smeru sistem prima toplotu i vrši rad, tada će pri obrnutom odvijanju procesa sistem oslobađati toplotu i nad njim će se vršiti rad.



- **Ireverzibilni procesi** su oni koji se mogu odvijati spontano samo u jednom smeru. Svi **neravnotežni procesi** su ireverzibilni.
 - Na kraju, u termodinamici postoje i takvi procesi kod kojih se sistem nakon niza promena i prolaska kroz različita stanja, vraća u prvobitno stanje – to su tzv. **kružni (ciklični) procesi**.

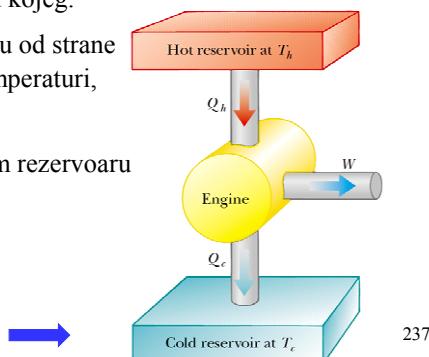
← Reverzibilna izoterska kompresija

236

Toplotne mašine i II zakon termodinamike

- **Toplotne mašine** su uređaji koji uzimaju toplotnu energiju iz spoljašnjeg izvora i delimično je pretvaraju u neki drugi oblik (mehaničku, električnu, ...), tj. vrše koristan rad.
- Primeri: mašine koje putem vodene pare pokreću turbine u termocentralama, motori sa unutrašnjim sagorevanjem (benzinski, dizel, ...), rashladne mašine, ...
- Toplotne mašine obavezno sadrže tzv. **radnu supstancu**, dok se njihov rad zasniva na **cikličnom procesu** u toku kojeg:
 - (1) radna supstanca apsorbuje toplotu od strane toplotnog rezervoara na višoj temperaturi,
 - (2) mašina vrši korisni rad, i
 - (3) deo energije se predaje toplotnom rezervoaru na nižoj temperaturi.

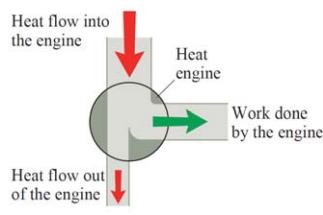
Šematski prikaz rada toplotne mašine



237

Toplotne mašine i II zakon termodinamike

- Primer: parna mašina – radna supstanca je voda u zatvorenom kotlu, koja prima toplotu usled sagorevanja goriva, isparava, a vodena para pokreće klip; nakon kondenzacije pare, voda se ponovo vraća u ciklus isparavanja i vršenja rada.
- Toplotna mašina prima količinu toplote Q_h od toplog rezervoara, vrši rad A i predaje ostatak toplote Q_c hladnom rezervoaru (okolini).
- Pošto je u cikličnom procesu, kroz koji prolazi radna supstanca toplotne mašine, krajnje stanje identično početnom – unutrašnja energija radne supstance je nepromjenjena na kraju jednog radnog ciklusa mašine:



$$\Delta U = 0$$

- Iz I zakona termodinamike sledi da je ukupan rad A koji izvrši toplotna mašina jednak razlici između primljene Q_h i predate Q_c količine toplote:

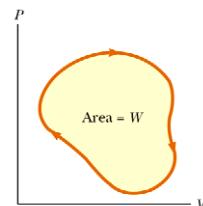
$$A = Q_h - Q_c$$

- Znak “–” ispred Q_c znači da toplota napušta sistem.
- U opštem slučaju, energija se ne mora obavezno razmenjivati sa okolinom putem **toplote**.

238

Toplotne mašine i II zakon termodinamike

- Rad A koji se izvrši u jednom radnom ciklusu toplotne mašine jednak je površini ograničenoj zatvorenom linijom na p - V dijagramu.
- Termička efikasnost toplotne mašine je izražena preko **koeficijenta korisnog dejstva** η – to je odnos između izvršenog rada A u toku jednog ciklusa rada mašine i dovedene količine energije (toplote) Q_h od toplijeg rezervoara:



$$\eta = \frac{A}{Q_h} = \frac{Q_h - Q_c}{Q_h} = 1 - \frac{Q_c}{Q_h}$$

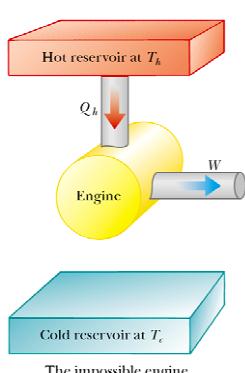
- Maksimalna vrednost koeficijenta korisnog dejstva od 100 % ($\eta=1$) u realnim uslovima nikad ne može biti dostignuta, jer to podrazumeva da se hladnjem rezervoaru ne predaje nimalo toplote ($Q_c=0$, tj. da nema gubitaka energije), odnosno da se celokupna energija koja se primi od okoline pretvori u koristan rad, što je nemoguće.

239

Toplotne mašine i II zakon termodinamike

II zakon termodinamike (Kelvin-Plankova formulacija):

- Ne postoji takva toplotna mašina, čiji se rad zasniva na cikličnom termodinamičkom procesu, koja celokupnu apsorbovanu energiju može pretvoriti u koristan rad.



- Maksimalni vrednost koeficijenta η toplotne mašine, čiji se rad zasniva na cikličnom procesu, je uvek manji od 1.
- Kao posledica činjenice da I zakon termodinamike **ne objašnjava smer toplotnih processa** i njihovu nereverzibilnost, pojavila se i druga, **Klauzijusova** formulacija II zakona termodinamike:
- Ako su dva sistema u termičkom kontaktu, toplota spontano prelazi samo sa tela više na telo niže temperature; obrnuto, prenos toplote sa hladnjeg na toplji sistem se ne može vršiti spontano, bez uloženog spoljašnjeg rada.

Nemoguća toplotna mašina

240

Karnoov ciklus

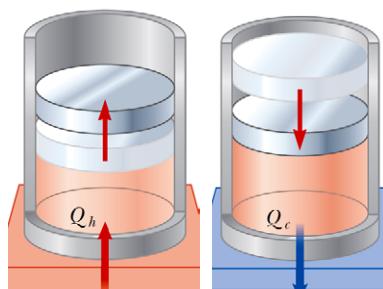
- Francuski fizičar Sadi Carnot je 1824. g. opisao rad idealne toplotne mašine čiji se rad zasniva na jednom složenom cikličnom procesu, koji se sastoji od **izotermiske i adijabatske ekspanzije** i od **izotermiske i adijabatske kompresije** radne supstance (gasa) – Karnoov ciklus.
- Pokazao je da toplotna mašina koja radi po takvom (Karnoovom) ciklusu ima najveći mogući koeficijent korisnog dejstva (efikasnost) u poređenju sa drugim mašinama i ciklusima.
- **Karnoova teorema:**

Ne postoji toplotna mašina koja bi radila između dva energetska (toplotna) rezervoara i imala veću efikasnost od Karnooove mašine koja bi radila između ista dva rezervoara.

241

Karnoov ciklus - pretpostavke

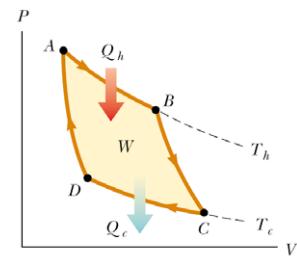
1. Radna supstanca u ovoj idealizovanoj toplotnoj mašini je **idealni gas** koji se nalazi zatvoren u cilindru sa pokretnim klipom (koji može da klizi bez trenja).
2. Postoje **dva toplotna rezervoara** stalnih, ali različitih temperatura (T_h i T_c , $T_h > T_c$); oni imaju velike kapacitete, tako da se njihove temperature ne menjaju prilikom predaje ili primanja toplote.
3. **Zidovi cilindra i klipa su termički neprovodni** – kada cilindar nije u kontaktu sa rezervoarom topline, on je idealno toplotno izolovan od okoline.
4. Kada se razmenjuje toplota između cilindra i toplotnog rezervoara, postoji **idealni toplotni kontakt** između njih.
5. Svi procesi su **reverzibilni**.



242

Karnoov ciklus

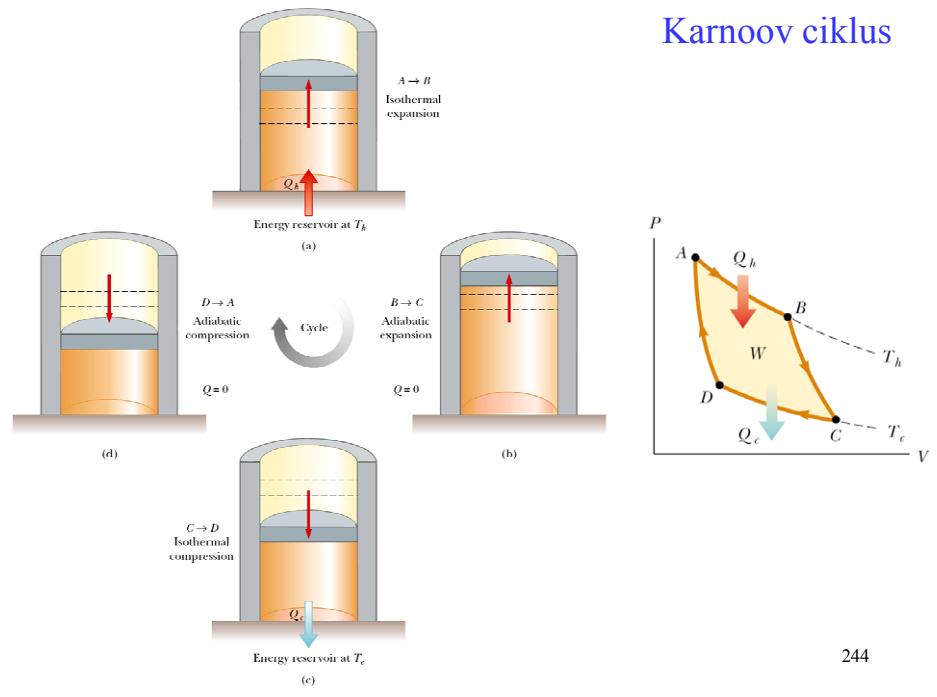
- Proces $A \rightarrow B$ je izotерmsка експанзија на температури T_h . Гас је у термиčком контакту са топлијим резервоаром, за време шијења апсорбује количину топлоте Q_h кроз основу цилиндра и врши корисни рад A_{AB} помеђујући клип.



- Proces $B \rightarrow C$ је адіјабатска експанзија. Основа цилиндра је замењена непроводним зидом и гас се адіјабатски шири. Топлота се не разменjuје са окolinом, а температура опада од T_h до T_c , при чему гас врши рад A_{BC} помеђујући клип.
- Proces $C \rightarrow D$ је изотермска компресија на температури T_c . Гас је у поново термиčком контакту са хладnjим резервоаром, и за то време предаје количину топлоте Q_c кроз основу цилиндра, а клип врши рад A_{CD} сабијајући гас.
- Proces $D \rightarrow A$ је адіјабатска компресија. Основа цилиндра је поново замењена непроводним зидом и гас се адіјабатски сабија. Топлота се не разменjuје са окolinом, а температура расте од T_c до T_h , при чему клип врши рад A_{DA} сабијајући гас.

243

Karnoov ciklus



244

Karnoov ciklus

- Izraz za koeficijent korisnog dejstva Karnoove, ali i bilo koje toplotne mašine je:

$$\eta = 1 - \frac{Q_c}{Q_h}$$

- Analizom razmenjenih količina toplote sa toplotnim rezervoarima i rada izvršenog od strane gasa ili nad gasom, može se pokazati da je:

$$\boxed{\frac{Q_c}{Q_h} = \frac{T_c}{T_h}}$$

- Sledi da je efikasnost Karnoove mašine:

$$\boxed{\eta = 1 - \frac{T_c}{T_h}}$$

- Koeficijent korisnog dejstva Karnoove mašine je uvek manji od jedinice, ako je $T_h > T_c$, bez obzira što se radi o idealizovanoj toplotnoj mašini. Jedino kada je $T_c = 0$ K, veličina η dostiže vrednost 1.
- U realnosti, toplotne mašine koje rade prema Karnoovom ciklusu imaju i izvesne gubitke, pa su procesi više ili manje ireverzibilni, a efikasnost je još manja.

