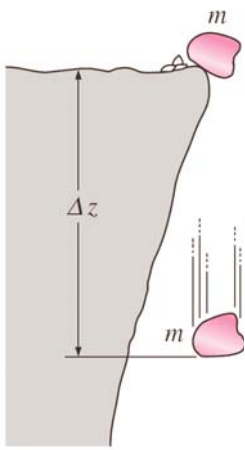
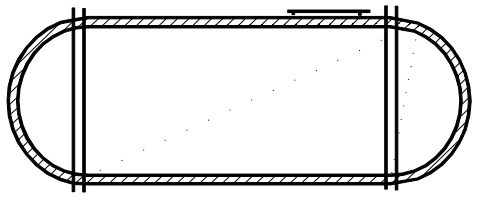


5. PRVI PRINCIP TERMODINAMIKE

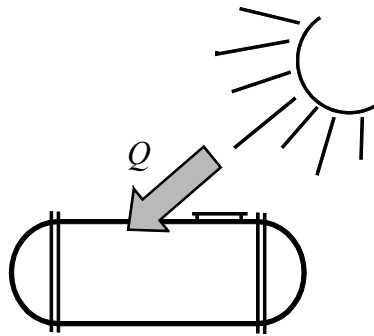
5.1 Uvod

- Prvi princip termodinamike je apsolutni prirodni zakon koji važi za sve pojave koje se odigravaju na svim prostornim nivoima (mikro, makro i mega svetu)
- Zasnovan je na brojnim analizama, posrednim i neposrednim dokazima, eksperimentima o odnosima različitih vrsta energije
- Neke od formulacija:
 - „Energiju nije moguće niti stvoriti, niti uništiti. Ona samo može da menja svoje pojavne oblike“
 - „Ukupna energija svemira je nepromenljiva“
 - ...
- U termodinamici – termodinamički (termo-mehanički) sistem
 - „Ukupna energija izolovanog termodinamičkog sistema je nepromenljiva“

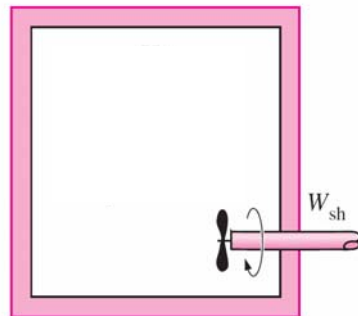
	 $\Delta E_{\text{sist}} = 0$
Slika 5.1. Mehanički sistem	Slika 5.2. Izolovan termo-mehanički sistem

5.2 Načini razmene energije zatvorenog termomehaničkog sistema sa njegovom okolinom

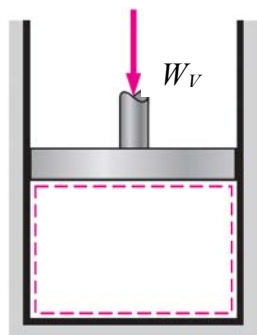
- Toplotom - toplotnim energetskeim dejstvom
- Radom
 - Mehaničkim – mehaničkim energetskeim dejstvom
 - rad vratila
 - rad promene zapremine
 - rad opruge
 - (rad elastičnih deformacija)
 - (Nemehanički)
 - električnim energetskeim dejstvom
 - (magnetnim energetskeim dejstvom)



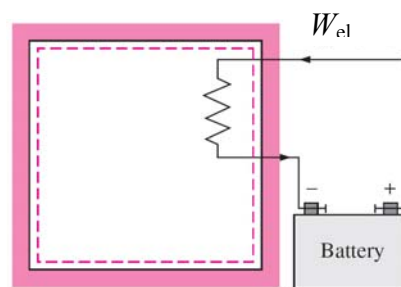
Toplotnim energetskeim dejstvom



Rad vratila



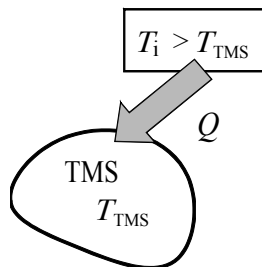
Rad promene zapremine



Električnim energetskeim dejstvom

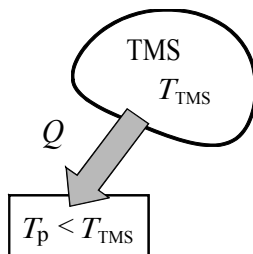
5.3 Toplota ("toplotiranje", "toplotovanje")

- Energetsko dejstvo sistema i njegove okoline - veličina procesa
- Proces prenošenja energije kroz granice termodinamičkog sistema izazvan isključivo razlikom temperatura termomehaničkog sistema i njegove okoline



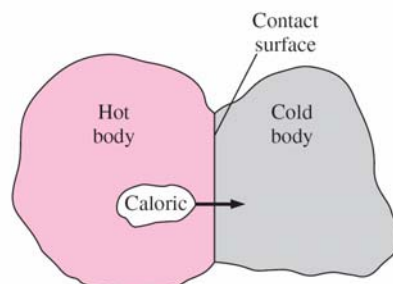
„Izvor“ toplote ili toplotni izvor

Q [J] - količina toplote (količina energije) koju, usled razlike međusobnih temperatura, toplotni izvor preda termodinamičkom sistemu

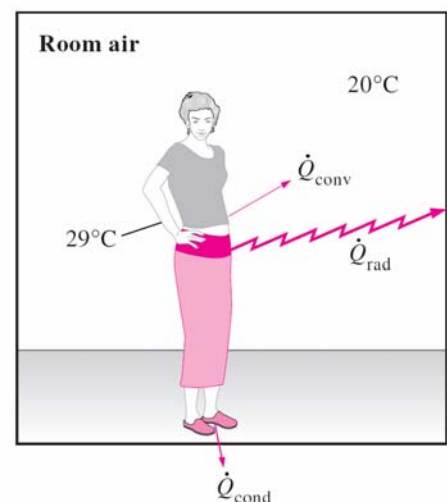


Q [J] - količina toplote (energije) koju usled međusobne razlike temperatura termodinamički sistem, preda tzv. toplotnom ponoru

- Toplota se kao proces prenošenja energije, izazvan razlikom temperatura, može odvijati i između radnih supstancija unutar jednog termodinamičkog sistema, kao i unutar same radne supstancije, ukoliko ona nije u temperaturskoj ravnoteži



- Toplota, kao proces prenošenja (unutrašnje) energije, uzrokovana razlikom temperatura, neposredno je povezana sa intezitetom kretanja, aktivnošću molekula, atoma i drugih mikro čestica koje sačinjavaju supstancu, tj. ona predstavlja direktnu posledicu ovih kretanja
- Razlikujemo tri „mehanizma“ prenošenja toplote - prenošenje unutrašnje (termičke) energije: kondukcija, konvekcija i radijacija.



• Osnovni termini

- Količina toplote Q [J];
- Toplota – „veličina procesa“ - ne poseduje osobinu totalnog diferencijala

δQ a ne dQ

$$\int_1^2 \delta Q = Q_{1-2} \text{ - količina toplote predate tokom procesa 1-2}$$

$$\int_1^2 \delta Q = \cancel{Q_2 - Q_1} \text{ - netačno !}$$

- Toplotni protok (fluks) $\Phi = \frac{\delta Q}{dt}$ [W]; opšte
 $\Phi = \frac{Q_{1-2}}{t_2 - t_1} = \frac{Q_{1-2}}{\Delta t}$ [W]; ustaljeni uslovi
- Specifični količina toplote $q = \frac{Q}{m}$ [J/kg];

- Površinski toplotni protok (toplotni protok sveden na jedinicu površine)

$$\varphi = \frac{\Phi}{A} \left[\text{W/m}^2 \right] \text{ - važi za uniformnu raspodelu toplotnih protoka po nekoj površi,}$$

- Podužni (linijski) toplotni protok (toplotni protok sveden na jedinicu dužine) – (cevi, kanali, žice, i drugi linijski objekti)

$$\phi_l = \frac{\Phi}{l} \left[\text{W/m} \right] \text{ - za uniformnu raspodelu toplotnih protoka}$$

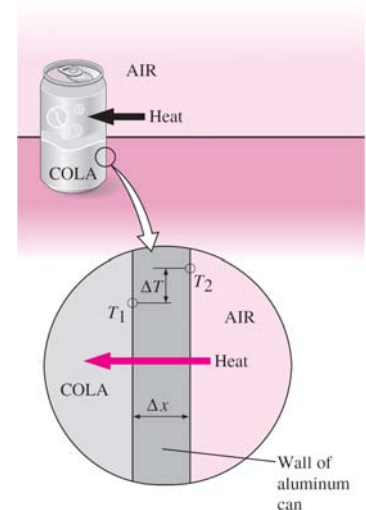
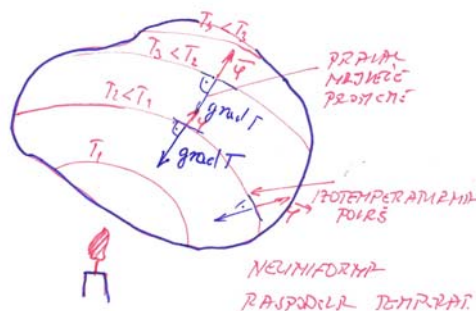
KONDUKCIJA – provođenje toplote

- Karakteristična za supstancijaje u čvrstom stanju, ali se ostvaruje i kod fluida
- I kod fluida-molekuli sa većom „aktivnošću“ – intezitetom kretanja sudaraju se sa onim sa manjom aktivnošću, prenoseći im tako i povećavajući unutrašnju energiju (temperaturu)

Furijeva hipoteza (Fourie)

$$\vec{\varphi} = -\lambda \text{ grad} T$$

- vektor površinskog toplotnog protoka



- Opšte:
 λ - toplotna provodljivost (provodnost) tenzor drugog reda
- U ovom kursu radi se samo λ - skalar, $\lambda = \text{const}$ [W/(mK)]

Ravan beskonačan zid

- Površinski toplotni protok

$$\varphi = \frac{\lambda}{\delta} (T_{s1} - T_{s2}) \quad [\text{W/m}^2]$$

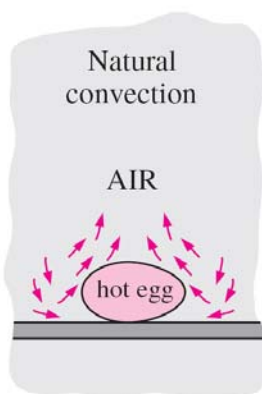
Beskonačan cilindričan zid

- Linijski toplotni protok

$$\varphi_l = \frac{(T_{s1} - T_{s2})}{\frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}} \quad [\text{W/m}]$$

KONVEKCIJA – prelaženje toplote

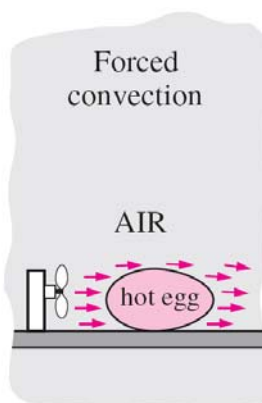
- konvekcija → prenošenje unutrašnje (termičke) energije strujanjem fluida



- prirodna konvekcija – prirodno prelaženje toplote - Kada energija, kondukcijom sa čvrste površine, dospe u prvobitno miran fluid, temperatura fluidnih delića uz površinu se poveća, izazivajući i lokalno širenje fluidnih delića, tj. smanjenje njihove gustine. Zbog postojanja gravitacijom izazvanog gradijenta pritiska u fluidu, „prošireni“ fluidni delići, manje gustine uzdižu se i menjaju svoj položaj, stvarajući lokalno strujanje fluida.

Usled nastalog kretanja fluida, pored kondukcije, u fluidu se javlja i prenošenje energije, makro kretanjem fluida, tj. konvekcijom.

Takvo prostiranje energije u fluidu, čije je makro kretanje izazvano samo toplotnim dejstvom naziva se prirodna konvekcija ili prirodno prelaženje toplote.



- prinudna konvekcija – prinudno prelaženje toplote - U slučaju kada se fluid već nalazi u kretanju (pogonjen ventilatorom, pumpom ili kompresorom ...) energija koja kondukcijom (mikrokretanjima) dospe sa čvrste površine u fluid se prvenstveno prenosi kretanjem fluida, tj. konvekcijom. Takav slučaj prenošenja energije naziva se prinudna konvekcija

Njutnova (Newton) hipoteza

- Površinski toplotni protok:

$$\varphi = h (T_s - T_f) \quad \text{za} \quad T_s > T_f$$

$$\varphi = h (T_f - T_s) \quad \text{za} \quad T_f < T_s$$

- Koeficijent prelaženja toplote:

$$h \left[\text{W}/(\text{m}^2\text{K}) \right]$$

$$h = f(\text{geometrije}, x, y, z; w_x, w_y, w_z; \lambda_f, \rho_f, c_p, \text{režima strujanja} \dots)$$

RADIJACIJA – zračenje

Sve supstance, ukoliko se nalaze na temperaturi višoj od 0 K emituju u svoju okolinu elektromagnetne talase. Ovi talasi ili fotoni (talasno-korpuskularna priroda elektromagnetnog zračenja), nastaju pri prelasku elektrona sa energetski viših na energetski niže nivoe.

Raspodela emitovanih energija po talasnim dužinama (spektar zračenja) zavisi od temperature same supstancijaje. (Spektar zračenja prostire se od γ zračenja preko, x -zračenja, ultravioletnog, vidljiva svetlost, toplotnog-infra crvenog, pa sve do radio talasa).

Ukoliko se dve supstancije nalaze na istim temperaturama (površni tih supstancija) ukupno razmenjena energija pomoću elektro-magnetnih talasa – zračenjem je jednak nuli.

Ova dinamička ravnoteža narušava se u slučaju da supstancije imaju međusobno različite temperature (površni). U tom slučaju, ovu vrstu razmene energije nazivamo zračenjem (ili toplotnim zračenjem, zračenjem toplote).



- Izgled osnovnog izraza za izračunavanje razmenjene energije zračenjem

$$\Phi = C_c \varepsilon_{\text{red}} H_{1,2} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

- Konstanta zračenja crnog tela C_c
- Efektivna površina uzajamnog zračenja $H_{1,2}$ i geometrijski faktori zračenja $\varphi_{1,2}, \varphi_{2,1}$ - tabela 8.5.5, str 147.

$$H_{1,2} = \varphi_{1,2} A_1$$

- Redukovana emisivnost ε_{red}

$$\varepsilon_{\text{red}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right) \varphi_{1,2} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \varphi_{2,1}}$$

- Emisivnost površina $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ - tabela 8.5.2, str 143, tabela 8.5.3, str 145, tabela 8.5.4, str. 146.

5.4 Radovi

- Energija koja prolazi kroz granicu termomehaničkog sistema, pri čemu se kao jedina posledica u termomehničkom sistemu, ili okolni termomehaničkog sistema, javlja, ili bi moglo da se javi podizanje nekog tereta (Carnot - 1824).

5.4.1 Mehanička energetska dejstva

- Uređenim kretanjem neke pokretne čvrste površi, strukturne čestice supstance u TDS bivaju pomerane (na „uređen“ način), te im se tako povećava intezitet kretanja, odnosno prenosi energija. (Toplota – na „haotičan“ i „neuređen“ način utiče na povećanje inteziteta kretanja molekula, atoma i dr. mikro čestica).

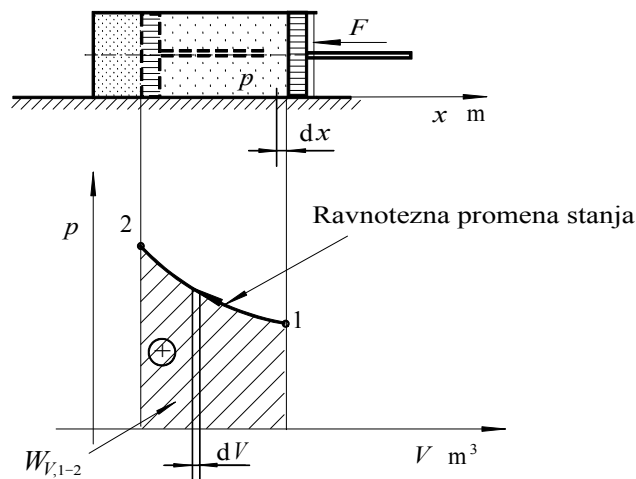
- Mehanički rad

$$W_{1-2} = \int_1^2 \delta W = \int_1^2 \vec{F} d\vec{s}$$

$$W_{1-2} = \int_1^2 \delta W = \cancel{W_2 - W_1}$$

* Ne postoji totalni diferencijal rada, jer je rad veličina procesa (a ne veličina stanja supstance)

- a) **Zapreminski rad** – (rad usled promene zapremine, apsolutni rad, rad pokretne granice sistema)



Izvršeni zapreminski rad

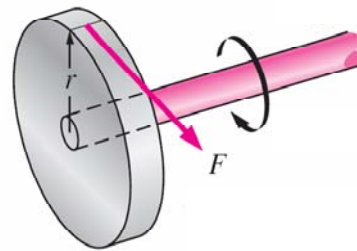
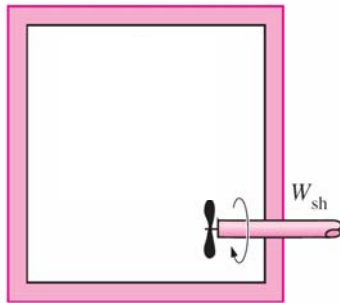
(elementaran zapreminski rad pri ravnotežnoj promeni stanja $\delta W_V = -p dV$)

$$W_{V,1-2} = \int_1^2 \delta W_V = - \int_1^2 p dV \quad [\text{J}]$$

snaga

$$P_V = \frac{\delta W_V}{dt} \quad [\text{W}]$$

b) **Rad vratila** - W_{sh} [J] („Shaft“)



• Izvršeni rad vratila

(elementaran rad vratila $\delta W_{sh} = M d\alpha$, moment $M = F r$)

$$W_{sh,1-2} = \int_1^2 \delta W_{sh} = \int_1^2 M d\alpha \quad [\text{J}]$$

snaga

$$P_{sh} = M \omega \quad [\text{W}]$$

ugaona brzina

$$\omega = \frac{d\alpha}{dt}$$

U slučaju zatvorenog termodinamičkog sistema, radna supstancija u sistema može izvršiti zapreminski rad nad okolinom i obrnuto, okolina može izvršiti zapreminski rad nad supstancijom u termodinamičkom sistemu.

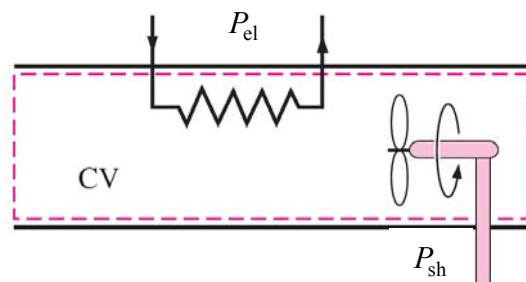
Za razliku od zapreminskog rada, rad vratila je moguće samo izvršiti nad termodinamičkim sistemom.

U zatvorenom termodinamičkom sistemu, rad vratila se po pravilu pretvara ili u tzv. rad viskoznih sila ili u rad sila suvog trenja (disipacija).

$$\delta W_\mu = \tau_\mu A dx$$

$$\delta W_{tr} = F_{tr} dx$$

Pravo značenje rada vratila uočljivo je kod protočnih termodinamičkih sistema – ventilatora, kompresora, turbine,...

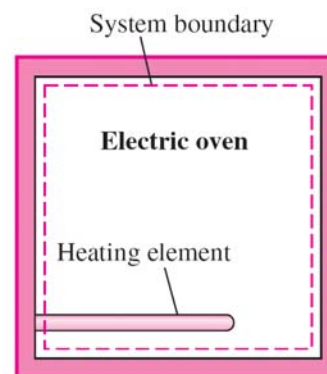
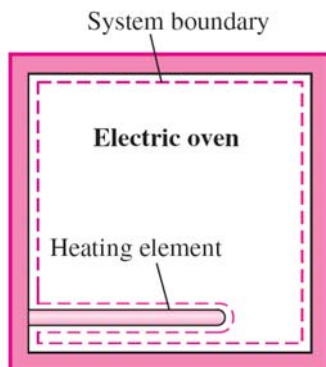
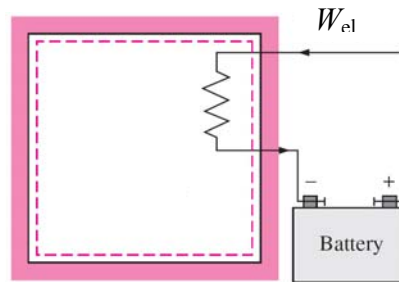


5.4.2 Nemehanička energetska dejstva

- Električno energetske dejstvo

$$\delta W_{\text{el}} = I \cdot U \cdot dt - \text{za jednosmernu struju}$$

$$\delta W_{\text{el}} = I \cdot U \cdot \cos \varphi \cdot dt - \text{za naizmeničnu struju (} \cos \varphi - \text{tzv. faktor snage)}$$

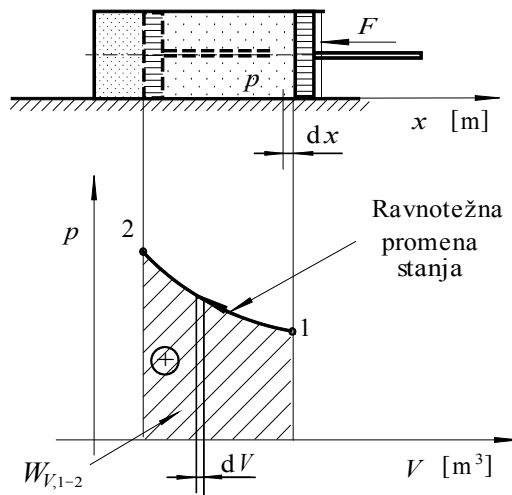


Nekoliko činjenica vezanih za toplotu i rad

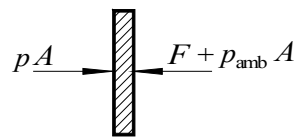
- Telo ne poseduje ni rad ni toplotu kao energiju, jer su to vidovi prenošenja energije
- Telo može da poseduje unutrašnju, kinetičku i potencijalnu energiju (i izvedenu veličinu entalpiju)
- Rad i toplota nisu veličine stanja
- I rad i toplota nemaju totalne diferencijale δW , δQ
- Toplota je u poređenju sa radom „nekvalitetniji“ oblik energetske dejstva. Rad uvek i u potpunosti možemo pretvoriti u toplotu, a toplotu možemo samo delimično pretvoriti u rad.

5.5 Zapreminski i zapreminski koristan rad

- **Zapreminski rad** – rad usled promene zapremine



- Sile koje deluju na klip



- Za ravnotežne promene stanja

$$p \approx \frac{F + p_{\text{amb}} \cdot A}{A} = \frac{F}{A} + p_{\text{amb}}$$

- Mehanički rad

$$\delta W = \vec{F} \cdot d\vec{s}$$

Izražava se preko veličina stanja

$$\delta W_V = -(F + A \cdot p_{\text{amb}}) \cdot dx$$

$$\delta W_V = -p \cdot A \cdot dx = -p dV$$

→ izvršeni rad

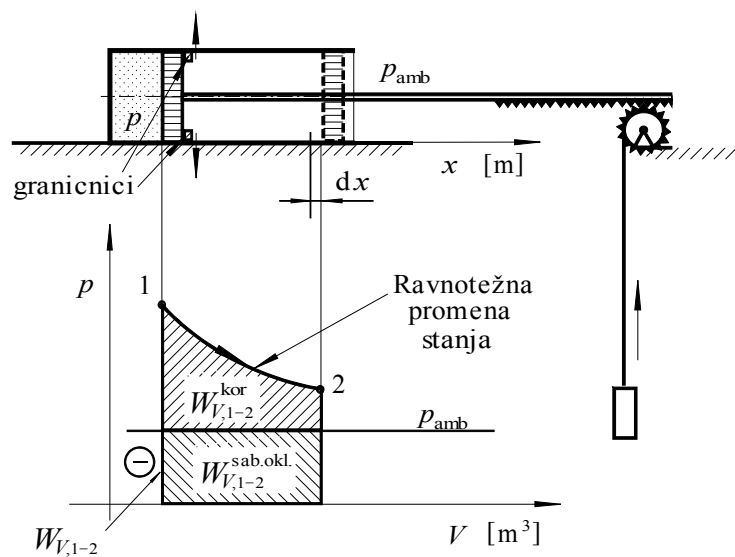
$$W_{V,1-2} = \int_1^2 \delta W_V = -\int p dV$$

- **Koristan zapreminski rad**

Pri sabijanju gasa, i okolina pritiskom p_{amb} sabija gas, na taj način i ona delom obavlja rad nad sistemom ($dV < 0$, sabijanje)

Pri širenju gasa ($dV > 0$) deo rada se ("troši") koristi za sabijanje okoline.

$$W_{V,1-2} = W_{V,1-2}^{kor} + W_{V,1-2}^{sab.okol.}$$



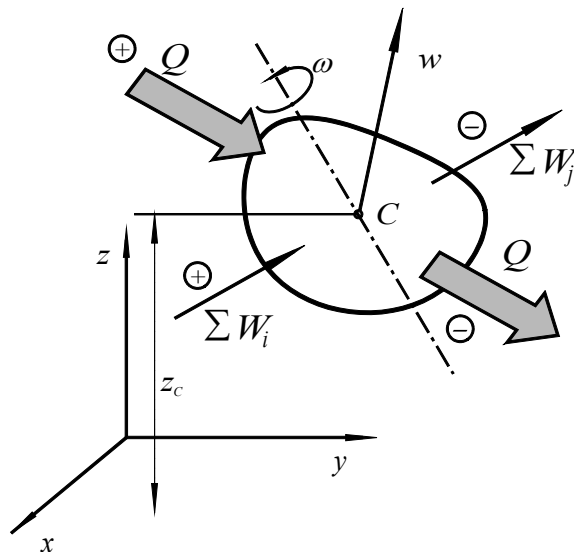
$$W_{V,1-2} = -\int_1^2 p dV = -\int_1^2 \left(p_{amb} + \frac{F}{A} \right) dV$$

$$W_{V,1-2} = -\int_1^2 p_{amb} dV + W_{V,1-2}^{kor}$$

$$W_{V,1-2}^{sab.ok} = -\int_1^2 p_{amb} dV = -p_{amb} (V_2 - V_1)$$

- širenje $dV > 0$ $W_{V,1-2}^{sab.ok}$ $(-)$
- sabijanje $dV < 0$ $W_{V,1-2}^{sab.ok}$ $(+)$

5.6 Prvi princip termodinamike za zatvoreni termo-mehanički sistem



- Ako se sistem nalazi u polju fizičke sile (gravitaciona sila)

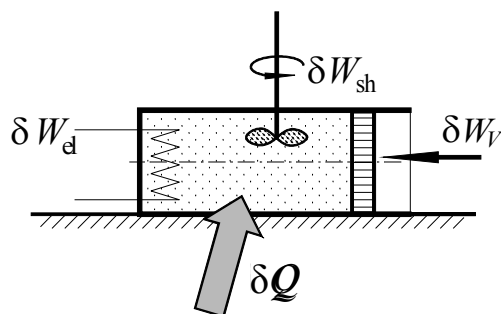
$$E_p$$

- Kretanje (translacija, rotacija)

$$E_k$$

- I princip TD za zatvoren termodinamički sistem u diferencijalnom obliku

- Ukoliko je termodinamički sistem nepokretan



$$dE_k = 0 \quad dE_p = 0$$

$$\delta Q + \sum \delta W_i = dU$$

$$\sum \delta W_i = \delta W_V + \delta W_{sh} + \delta W_{el}$$

- „Prost“ zatvoren termodinamički sistem – poseban slučaj zatvorenog i nepokretnog termodinamičkog sistema, kada od svih radova postoji samo W_V ($\delta W_{sh} = 0$, $\delta W_{el} = 0$)

$$\boxed{\delta Q + \delta W_v = dU}$$

integracijom

$$\boxed{Q_{1-2} + W_{v1-2} = U_2 - U_1}$$

- u slučaju da je proces promene stanja ravnotežan

$$\delta Q - p dV = dU$$

$$\delta Q - p dV + V dp - V dp = dU$$

$$\delta Q + V dp = dU + d(pV)$$

$V dp$ - u posebnom slučaju ovaj izraz predstavlja tzv. elementarni tehnički rad δW_{teh} , ili rad usled promene pritiska

$$\delta Q + \delta W_{\text{teh}} = dH$$

integracijom

$$Q_{1-2} + W_{\text{teh},1-2} = H_2 - H_1$$

W_{teh} - nema fizičko utemeljenje u slučaju zatvorenog termodinamičkog sistema.