

Vnitřní energie a teplota podle kinetické teorie

Plyn jako mechanická soustava hmotných částic

-nejjednodušší na ideální plyn (molekuly na sebe nepůsobí silami)

-nulová potencionální energie

-molekuly bereme jako hmotné body (nejlépe jednoatomové – zanedbáváme rotaci)

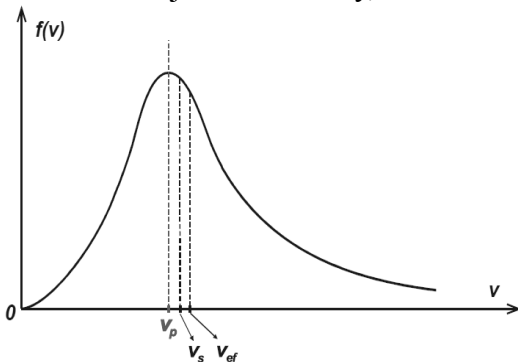
Neuspořádaný pohyb

směr a rychlost pohybu se neustále mění, rychlosti v intervalu $(0, +\infty)$

Maxwellovo rozdělení rychlostí

$$f(v) = \frac{dN}{dv} = 4\pi N \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{mv^2}{2kT}} v^2 \quad \text{rozdělovací funkce}$$

m – hmotnost jedné molekuly, k – Boltzmanova konstanta, T – absolutní teplota



v_p nejpravděpodobnější rychlost

$$v_p = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$$

v_{ef} efektivní rychlost

$$v_{ef} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$

Střední rychlost molekul ideálního plynu

$$\bar{v} = \frac{1}{N} \int_0^{\infty} v dN = \frac{1}{N} \int_0^{\infty} v f(v) dv = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} \quad v_s = \bar{v} = \frac{(v_1 + v_2 + \dots + v_N)}{N}$$

Energie jedné molekuly a celková energie soustavy

$$\bar{\epsilon} = \frac{3}{2} kT \quad \text{střední energie jedné molekuly}$$

$$U = E_{kin} = \frac{3}{2} vRT \quad \text{vnitřní energie ideálního plynu}$$

Význam teploty

Teplota je mírou kinetické energie neuspořádaného pohybu částic látky za stavu termodynamické rovnováhy (u ideálního plynu je přímo úměrná celkové energii).

Vlastnosti vnitřní energie jako stavové veličiny

existuje úplný diferenciál dU

$$\int_1^2 dU = konst. \quad \text{změna vnitřní energie závisí pouze na počátečním a koncovém bodu}$$

$$\oint dU = 0 \quad \text{při uzavřeném procesu se vnitřní energie nezmění}$$

Teplo, práce a první věta termodynamiky

Přijaté teplo a práce plynu jako procesní veličiny

Teplo je vnitřní energie předávaná srážkami částic

- je spojené s procesem (nikoli se stavem) => procesní veličina

Práce - pokud se mění objem plynu, koná práci

- také procesní veličina

Jeich vyjádření a základní vlastnosti

$$Q = cm \Delta T$$

$$dQ = cm dT$$

Teplo: $Q = cm \int_{T_1}^{T_2} dT = cm(T_2 - T_1)$ [J]

$$Q = cm \int_{T_1}^{T_2} dT = cm(T_2 - T_1)$$

c - měrná tepelná kapacita [$J kg^{-1} K^{-1}$]

$$dQ = cm dT = C \nu M_{mol} dT = \nu C dT$$

C - molární tepelná kapacita

$$IZOCHORICKÝ OHŘEV \quad dQ = \nu C_v dT$$

$$IZOBARICKÝ OHŘEV \quad dQ = \nu C_p dT$$

$$C_p = C_v + R \Rightarrow C_p > C_v \quad \text{Meyerův vztah}$$

$\oint dQ = Q \neq 0$ teplo přijaté látkou při kruhovém termodynam. Ději je vždy různé od 0

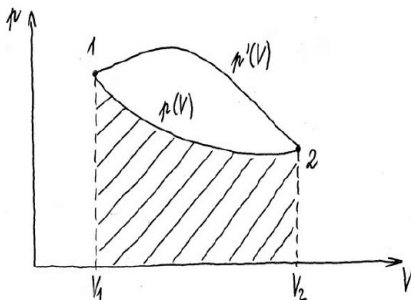
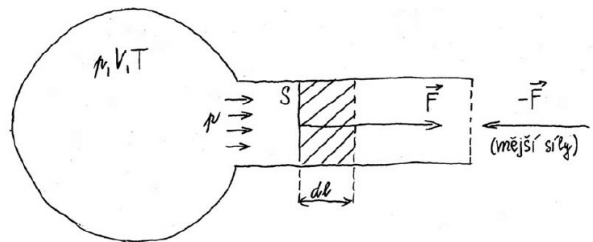
Práce:

$$\text{tlak plynu: } p = \frac{F}{S}$$

$$dA = F dl$$

$$dA = p S dl$$

$$da = p dV \quad \text{elementární práce plynu}$$



$$A = \int_1^2 dA = \int_1^2 p dV = \int_1^2 p(V) dV \quad \text{celková práce plynu}$$

$$\oint dA \neq 0 \quad (\text{obsah pod křivkou})$$

Práce vykonaná při kruhovém ději je vždy různá od nuly

1. věta jako zákon zachování energie v termodynamickém systému

$$dU = dQ - dA$$

$$\Delta U = Q - A$$

Teplo dodávané plynu zvyšuje jeho vnitř. energii, práce ji o stejnou hodnotu snižuje

Přeměna tepla na práci

$$A = Q - \Delta U$$

plyn může konat práci buď přeměnou z dodaného tepla, nebo na úkor své vnitřní energie

Perpetuum mobile 1. druhu

Práci je možné konat pouze přeměnou z jiných forem energie.

Tepelné stroje a vznik 2. věty termodynamiky

Přeměna tepla na práci v uzavřeném termodynamickém ději

$A = Q$ práce vykonaná při kruhovém termodynam. procesu se přímo rovná dodanému teplu

Tepelné stroje

Periodicky pracující tepelný stroj využívá při své činnosti uzavřený (kruhový) termodynamický proces (cyklus).

-nikdy nedosáhne 100% účinnosti (2. věta)

Slovní formulace 2. věty

Není možno sestrojiti periodicky pracující stroj, který by nezpůsobil nic jiného, než že by ochlazoval tepelnou lázeň a konal zároveň práci.

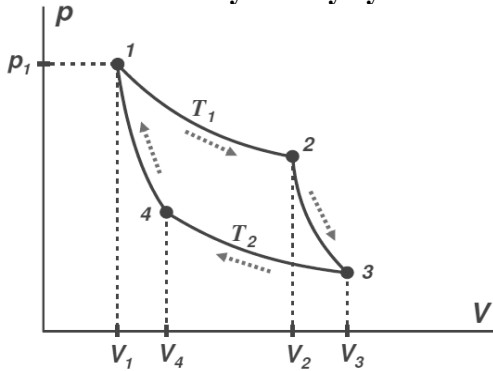
Není možné sestrojiti Perpetuum mobile 2. druhu.

Teplo nemůže samovolně přecházet ze studenějšího tělesa na teplejší.

Perpetuum mobile 2. druhu

-tepelný stroj, který by dokonale přeměňoval tepelnou energii na práci, NEEXISTUJE

Carnotův kruhový vratný cyklus



1. izotermická expanze (1-2) $T_1 = konst.$

$$A_1 = Q_1 = \int_1^2 p dV = \nu RT_1 \int_{V_1}^{V_2} \left(\frac{dV}{V}\right) = \nu RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} > 0$$

2. adiabatická expanze (2-3) -dokonalá tepelná izolace

$$A_2 = -\Delta U = \int_{T_1}^{T_2 - \nu C_v} dT = -\nu C_v (T_2 - T_1) > 0$$

3. izotermická komprese (3-4) $T_2 = konst.$

$$A_3 = Q_2 = \int_3^4 p dV = \nu RT_2 \int_{V_3}^{V_4} \left(\frac{dV}{V}\right) = \nu RT_2 \ln \frac{V_4}{V_3} < 0$$

4. adiabatická komprese (4-1) -dokonalá tepelná izolace

$$A_4 = -\Delta U = \int_{T_2}^{T_1 - \nu C_v} dT = -\nu C_v (T_1 - T_2) < 0$$

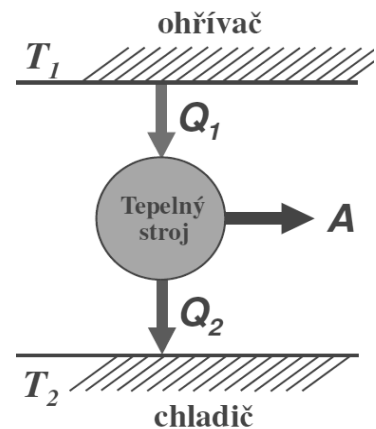
Energetická bilance a účinnost

a) $U_1 = \nu C_v T_1$
 $U_2 = \nu C_v T_2$ $U \Rightarrow konst.$

b) $A = \nu RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} + \nu RT_2 \ln \frac{V_4}{V_3} = \nu R \ln \frac{V_2}{V_1} (T_1 - T_2)$

c) $Q = Q_1 + Q_2$ Q_1 – teplo přijaté
 $A = Q = Q_1 + Q_2$ Q_2 – teplo odevzdané
 $Q_1 = A - Q_2$

účinnost vratného cyklu $\eta = \frac{(T_1 - T_2)}{T_1} = \frac{A}{Q_1}$



Carnotova věta

$\eta = \frac{A}{Q_1} < \frac{(T_1 - T_2)}{T_1}$ pro nevratný cyklus

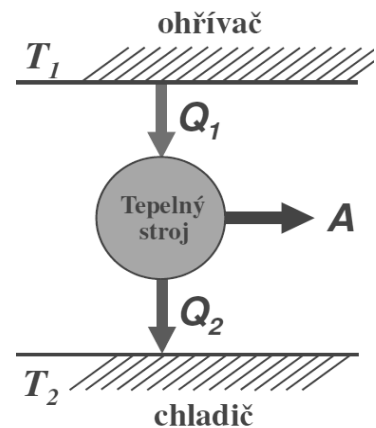
Druhá věta termodynamiky a její matematický tvar

Různé slovní formulace 2. věty

Není možno sestavit periodicky pracující stroj, který by pouze ochlazoval tepelnou lázeň a konal rovnocennou práci.

Nelze sestavit Perpetuum mobile 2. druhu.

Teplo nemůže samovolně přecházet ze studenějšího tělesa na teplejší.



Účinnost tepelných strojů

$$\eta = \frac{(T_1 - T_2)}{T_1} = \frac{A}{Q_1} \quad \text{vratný Carnotův cyklus}$$

$$\eta = \frac{A}{Q_1} < \frac{(T_1 - T_2)}{T_1} \quad \text{nevratný cyklus}$$

Redukovaná tepla

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0 \quad \text{podíl vratně přijatého tepla a teploty, při které k tomu došlo}$$

Clausiusův integrál

$$\oint \frac{dQ}{T} = 0 \quad \text{pro uzavřené vratné cykly}$$

$$\oint \frac{dQ}{T} < 0 \quad \text{pro nevratné cykly}$$

$$\oint \frac{dQ}{T} \leq 0 \quad \text{matematické vyjádření 2. věty termodynamiky}$$

Plymem dodané teplo se nemůže nikdy 100% přeměnit na práci, protože tento integrál dokazuje existenci Q_2 .

Maximální účinnost Carnotova cyklu

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{(Q_1 - Q_2)}{Q_1} \leq \frac{(T_1 - T_2)}{T_1} \quad \text{je ze všech vratných cyklů nejúčinnější}$$

Vyjádření 2. věty pomocí entropie

$dS \geq 0$ princip růstu entropie v izolované soustavě, matematický tvar 2. věty termodynamiky.

Roste a blíží se k rovnovážnému stavu.

V termodynamické rovnováze je entropie maximální.

Statistický smysl entropie

$S = k \ln w$ (+konst.) vztah entropie a pravděpodobnosti

w – termodynamická pravděpodobnost (počet mikrostavů daného stavu)

k – Boltzmanova konstanta

Směr nevratných procesů je odůvodněn vývojem termodynamické soustavy od méně pravděpodobných stavů ke stavům pravděpodobnějším.

Zpětný směr těchto procesů je principiálně nemožný, je však zanedbatelně málo pravděpodobný.

Entropie

Zavedení entropie jako stavové veličiny

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad \text{definice entropie (není definována velikost, ale přírůstek)}$$

$$dQ = \nu C_v dT + p dV$$

$$dQ = \nu C_v dT + \frac{(\nu RT dV)}{V}$$

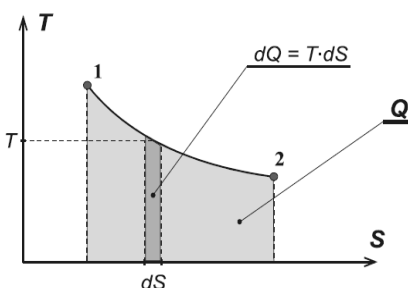
Její změna při vratných procesech

$$\Delta S = \nu \left(C_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{V_2}{V_1} \right) \quad \text{změna je přímo úměrná množství plynu}$$

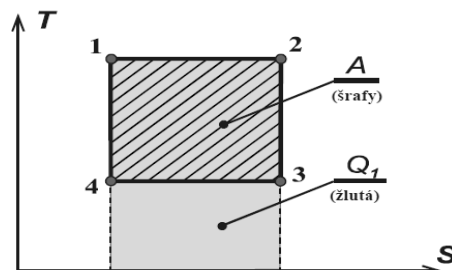
Výpočet dodaného tepla

$$Q = \int_1^2 dQ = \int_1^2 T dS$$

Tepelný diagram



speciálně pro Carnotův cyklus



Spojená formulace 1. a 2. věty

$$dU = T dS - p dV \quad \text{vyjadřuje přírůstek vnitřní energie}$$

Změna entropie při nevratných procesech

$$S_2 - S_1 = \Delta S > \int_1^2 \left(\frac{dQ}{T} \right)_{\text{nev.}} \quad \text{„míra nevratnosti“ termodynamického děje}$$

Princip růstu entropie v izolovaných soustavách

$$dS \geq 0 \quad \text{nejobecnější matematická formulace 2. věty termodynamiky}$$

Termodynamická rovnováha

V termodynamické rovnováze je entropie izolované soustavy maximální.

Souvislost entropie s pravděpodobností stavu termodynamického systému

2. věta termodynamiky je statistickým zákonem – platí jen pro velké množství prvků

Makrostav a mikrostavy

makrostav – stav celé soustavy

mikrostav – stav částice (poloha a rychlost)

Termodynamická pravděpodobnost vztahu

w – počet mikrostavů daného stavu

Boltzmannův vztah

$$S = k \ln w \quad \text{vztah entropie a pravděpodobnosti}$$