

FYZIKA DĚJŮ A PROCESŮ

Molekulová fyzika a termodynamika



Molekulová fyzika a termodynamika

- Molekulová fyzika - studuje vlastnosti látek a fyzikální jevy na základě částicové struktury látek
- Termodynamika - studuje látky bez použití představ o vnitřní struktuře látek - vychází z popisu jevů a z měření veličin

Kinetická teorie stavby látek:

- a) Všechna tělesa se skládají z částic – molekul, atomů nebo iontů.
- b) Částice, ze kterých se skládá těleso, se neustále a neuspořádaně pohybují (tepelný pohyb).
- c) Částice, ze kterých se skládá těleso, na sebe navzájem působí přitažlivými a odpuzivými silami.

Molekulová fyzika a termodynamika

Fyzikální veličiny popisující soustavu částic

Atomová hmotnostní konstanta m_u :

1/12 klidové hmotnosti nuklidu uhlíku $^{12}_6\text{C}$: $m_u = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Relativní atomová hmotnost: $A_r = \frac{m_a}{m_u}$, kde m_a je klidová hmotnost atomu

Relativní molekulová hmotnost: $M_r = \frac{m_m}{m_u}$, kde m_m je klidová hmotnost molekuly

Avogadrova konstanta N_A udává počet atomů ve 12 gramech nuklidu uhlíku $^{12}_6\text{C}$: $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

Látkové množství n soustavy částic je definováno $n = \frac{N}{N_A}$, kde N je počet částic soustavy

Molekulová fyzika a termodynamika

Fyzikální veličiny popisující soustavu částic

Látkové množství $n = 1$ mol tedy obsahuje stejný počet částic, který udává Avogadrova konstanta

Molární hmotnost: $M_m = \frac{m}{n}$, kde m je hmotnost tělesa

Platí: $M_m = M_r \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ resp. $M_m = A_r \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$

Molární objem: $V_m = \frac{V}{n}$, kde V je objem tělesa

Avogadrův zákon: Stejné objemy plynů obsahují za stejného tlaku a teploty vždy stejný počet molekul.

Pro normální podmínky, tj. pro tlak 101 325 Pa a pro teplotu 273,15 K je molární objem každého plynu $V_m = 22,414 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$

Vnitřní energie soustavy

Vnitřní energie soustavy U je dána součtem $U = U_k + U_p$, kde

U_k – kinetická energie neuspořádaného pohybu částic, které tvoří soustavu,

U_p – potenciální energie částic, která vyplývá z jejich vzájemného silového působení

1) Změna vnitřní energie tepelnou výměnou, teplo

Tepelná výměna je děj, který nastává, když se dvě tělesa dotýkají. Pak neuspořádaně se pohybující částice jednoho tělesa narážejí na neuspořádaně se pohybující částice druhého tělesa a předávají nebo přijímají vnitřní energii. Mírou změny vnitřní energie je veličina teplo Q (J) Soustava přijala resp. odevzdala teplo, jestliže se její vnitřní energie zvětšila resp. zmenšila tepelnou výměnou.

Je tedy $\Delta U = Q$

Vnitřní energie soustavy

2) Změna vnitřní energie konáním práce

Posune-li vnější síla F píst válce, ve kterém je uzavřen plyn, dochází k jeho stlačování.

Tím se zvyšuje vnitřní energie plynu U . Zároveň síla F posouváním pístu koná práci.

Posune-li síla F píst o diferenciál dráhy (dráha, jejíž velikost se limitně blíží nule) ds , vykoná práci $dW = F ds$

O stejnou hodnotu vzroste vnitřní energie soustavy plynu, tj. $dU = dW$

Při posunutí pístu silou F o dráhu s je vykonaná práce rovna celkové změně vnitřní energie:

$$W = \int F \cdot ds = \Delta U$$

První věta termodynamická

- Popis děje, při kterém dochází současně k tepelné výměně i ke konání práce
- Teplo Q dodané soustavě se projeví zvýšením vnitřní energie soustavy o ΔU a prací W , kterou soustava vykoná:

$$Q = \Delta U + W$$

- Pro elementární výměnu energie v soustavě platí:

$$dQ = dU + dW$$

- Uvažujeme-li jako soustavu plyn, pak práce vykonaná rozpínajícím se plynem je: $W = \int_0^{\Delta V} p \cdot dV$

- První věta termodynamická pak nabývá tvaru:

$$Q = \Delta U + \int_0^{\Delta V} p \cdot dV$$

První věta termodynamická

Z první věty termodynamické vyplývá:

- 1. Když je soustava tepelně izolována (tj. nevyměňuje si teplo s okolními tělesy), je vyměněné teplo $Q = 0$ J. Potom pokud soustava koná práci, platí: $W = -\Delta U$. Soustava koná práci na úkor své vnitřní energie.**
- 2. Když soustava nekoná práci, tj. $W = 0$ a přitom přijímá teplo Q , platí $Q = \Delta U$. Přijaté teplo slouží pouze ke zvýšení vnitřní energie soustavy.**

Teplota

Pokud jsou uvedena dvě tělesa do vzájemného dotyku, mohou nastat dvě možnosti:

a) Mezi tělesy neproběhne tepelná výměna a vnitřní energie každého z nich zůstává stejná. V tomto případě jsou obě tělesa ve vzájemné tepelné rovnováze a oběma jim přiřazujeme stejnou teplotu.

b) Mezi tělesy probíhá tepelná výměna tak dlouho, dokud se nedostanou do vzájemné tepelné rovnováhy.

Pokud např. do teplého nápoje vložíme kousek ledu, nápoj se ochladí a led roztaje. Celá soustava se po určité době bude nacházet ve stavu tepelné rovnováhy – bude mít stejnou teplotu.

Teplota

- těleso, jehož vnitřní energie se během tepelné výměny zmenšila, mělo na počátku děje vyšší teplotu, než těleso, jehož vnitřní energie se během tepelné výměny zvětšila,
tj. těleso, které teplo odevzdává, má vyšší teplotu než těleso, které teplo přijímá. Po ukončení tepelné výměny mají obě tělesa stejnou teplotu
- měření teploty využívá poznatků o tepelné rovnováze. Do vzájemného dotyku je uvedeno těleso, jehož teplota je měřena, a těleso srovnávací – teploměr. Po vytvoření tepelné rovnováhy je teplota tělesa rovna teplotě teploměru
- při měření teploty je využíván fakt, že se změnou teploty se mění i některé další fyzikální veličiny, které popisují stav tělesa – např. objem, tlak, elektrický odpor aj.
- často se při měření teploty využívá např. teplotní objemová roztažnost kapalin

Teplotní stupnice

Celsiova teplotní stupnice

Je určena dvěma základními stavy:

1. rovnovážným stavem vody a ledu za tzv. normálního tlaku

$p_n = 101,325 \cdot 10^3 \text{ Pa}$. Tomuto stavu je přiřazena teplota $t_0 = 0 \text{ °C}$

2. rovnovážným stavem vody a její syté páry za normálního tlaku

$p_n = 101,325 \cdot 10^3 \text{ Pa}$. Tomuto stavu je přiřazena teplota $t_{100} = 100 \text{ °C}$

Mezi oběma uvedenými teplotami je stupnice rozdělena na 100 stejných dílků. Jeden dílek odpovídá 1 °C .

Teplotní stupnice

Termodynamická teplotní stupnice

Základní teplotní stupnice

Je určena pouze jedním základním stavem:

rovnovážným stavem ledu, vody a syté vodní páry. To je tzv. trojný bod vody a je mu přiřazena teplota $T_r = 273,16$ K (kelvinu)

Převodní vztah mezi Celsiovou teplotou t a termodynamickou teplotou T :

$$t = (T - 273,15) \text{ } ^\circ\text{C}$$

Teplotní roztažnost

- teplotní roztažnost – zvětšení rozměrů a tedy také objemů těles při zvýšení jejich teploty
- je-li V_1 objem tělesa při teplotě t_1 , potom při teplotě t_2 je objem tělesa V_2 dán lineárním vztahem: $V_2 = V_1 (1 + \beta \cdot \Delta t)$, kde $\Delta t = t_2 - t_1$ a β je součinitel teplotní objemové roztažnosti
- odtud změna objemu tělesa: $\Delta V = V_2 - V_1 = V_1 \cdot \beta \cdot \Delta t$
- pokud u nějakého pevného tělesa je jeden jeho rozměr mnohonásobně vyšší než ostatní dva (např. délka tyče oproti její šířce a tloušťce), předpokládáme namísto teplotní objemové roztažnosti tzv. teplotní délkovou roztažnost
- vztahy pro změnu délky s teplotou jsou analogické vztahům pro změnu objemu s teplotou:
 $l_2 = l_1 (1 + \alpha \cdot \Delta t)$ a $\Delta l = l_2 - l_1 = l_1 \cdot \alpha \cdot \Delta t$, kde α je součinitel teplotní délkové roztažnosti; $\beta \approx 3\alpha$

Kalorimetrie

- Teplo Q potřebné k tomu, aby látka hmotnosti m zvýšila svou teplotu o Δt je: $Q = m c \Delta t$, kde c je měrná tepelná kapacita dané látky
- Tj. platí: $c = \frac{Q}{m \Delta t}$
- Tepelná kapacita K tělesa (např. kalorimetru): $K = \frac{Q}{\Delta t}$
- Pro experimentální určení tepla Q , tepelné kapacity K nebo měrné tepelné kapacity c se používá kalorimetr
- Kalorimetr – tepelně izolovaná soustava – tj. soustava, která si nevyměňuje teplo se svým okolím.

Kalorimetrie

Měření tepla kalorimetrem:

- v kalorimetru o tepelné kapacitě K je kapalina o hmotnosti m_1 , měrné tepelné kapacitě c_1 a teplotě t_1
- dovnitř vložíme těleso hmotnosti m_2 , měrné tepelné kapacity c_2 a teploty t_2 , přičemž $t_2 > t_1$
- mezi kapalinou, kalorimetrem a vloženým tělesem proběhne tepelná výměna
- po vytvoření tepelné rovnováhy má soustava výslednou teplotu t , přičemž $t_2 > t > t_1$
- přitom platí tzv. kalorimetrická rovnice (zákon zachování tepelné energie pro tepelně izolovanou soustavu)
- v tepelně izolované soustavě je součet tepel přijatých tělesy roven součtu tepel vydaných ostatními tělesy soustavy:

$$m_1 c_1 (t - t_1) + K (t - t_1) = m_2 c_2 (t_2 - t)$$

Přenos tepla

- z oblastí s vyšší teplotou do oblastí s nižší teplotou

a) Vedení tepla – především u látek pevného skupenství
(např. kovová lžička nad plamenem svíčky)

- Podstata tepelné výměny: částice zahříváné části tělesa mají vyšší vnitřní energii, rychleji se pohybují, narážejí do okolních částic a tím jim předávají část své vnitřní energie

b) Proudění - při zahřívání kapaliny nebo plynu zdola

- Chladnější kapalina nebo plyn má větší hustotu, klesá dolů a tím vytlačuje vzhůru teplejší kapalinu nebo plyn

- Proudící tekutina tímto způsobem přenáší teplo z teplejší oblasti do oblasti chladnější

c) Tepelné záření tělesa – vyzařování určitého spektra elektromagnetického záření

- zvýšení vnitřní energie tělesa, na které záření dopadá

Ideální plyn

- zjednodušený model plynu reálného splňující 3 následující předpoklady:

a) Rozměry molekul ideálního plynu jsou zanedbatelně malé ve srovnání s jejich vzájemnými vzdálenostmi

b) Molekuly ideálního plynu na sebe navzájem nepůsobí přitažlivými silami

c) Vzájemné srážky molekul ideálního plynu a jejich srážky se stěnami nádoby, v níž se nacházejí, jsou dokonalé pružné

- ideální plyn: těleso nestálého tvaru, dokonale stlačitelné a bez vnitřního tření

- za běžných podmínek (tj. dostatečně nízkého tlaku a vysoké teploty) lze každý reálný plyn považovat za téměř ideální

Ideální plyn

- vzájemné srážky molekul \Rightarrow stále se mění směr a velikost jejich rychlostí

Střední kvadratická rychlost v_k :

Kdyby všechny molekuly plynu měly stejnou rychlost a vnitřní energie plynu (tj. i teplota) by zůstala zachována, potom rychlost molekul by byla právě střední kvadratická rychlost.

$$v_k = \sqrt{\frac{3R_m T}{M_m}}, \text{ kde } R_m \text{ je molární plynová konstanta } (R_m = 8,314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$$

Střední kinetická energie molekuly: $u = \frac{1}{2} m_0 v_k^2 = \frac{1}{2} s k T$, kde

s je počet stupňů volnosti ($s = 3$ pro jednoatomové molekuly, $s = 5$ pro dvouatomové molekuly, $s = 6$ pro troj- a víceatomové molekuly) a

$k = \frac{R_m}{N_A}$ je Boltzmannova konstanta ($k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$)

Celková vnitřní energie soustavy s N molekulami:

$U = N u = N \frac{1}{2} s k T = \frac{1}{2} s n R_m T$, kde n je látkové množství plynu

Stavová rovnice ideálního plynu

- plyn je charakterizován třemi stavovými veličinami – teplotou T , tlakem p a objemem V

Stavová rovnice ideálního plynu: $p V = n R_m T$

Pokud množství plynu zůstává konstantní, pak pro dva různé stavy plynu platí: $p_1 V_1 / T_1 = p_2 V_2 / T_2 = \text{konst.}$

- za normálních podmínek, tj. normálního tlaku $p_n = 101\,325$ Pa a normální teploty $T_n = 273,15$ K zaujme 1 mol plynu normální molární objem $V_{mn} = 22,414 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{mol}$

- potom je stavová rovnice pro 1 mol ideálního plynu:

$$\frac{p_n V_{mn}}{T_n} = \frac{p_1 V_{m1}}{T_1} = \frac{p_2 V_{m2}}{T_2} = R_m = 8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

- pro látkové množství n molů je stavová rovnice:

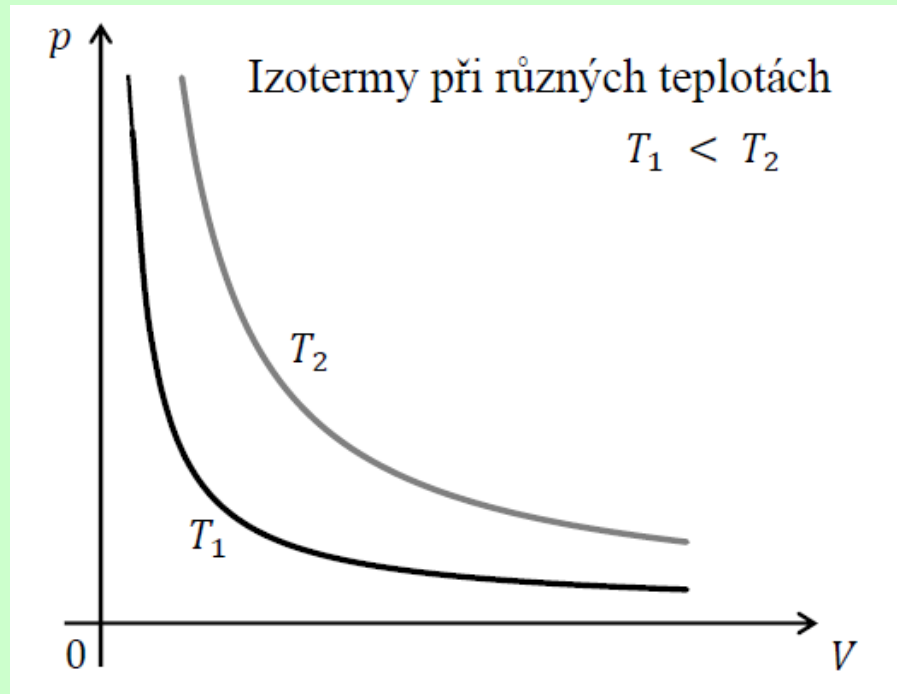
$$\frac{p_n V_n}{T_n} = \frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = n R_m$$

Stavové změny v plynech

- obecně platí, že se změnou hodnoty některé stavové veličiny, se mění hodnoty obou dvou veličin ostatních
- v některých případech se však při určitém ději v plynu změní pouze dvě stavové veličiny a třetí zůstává konstantní

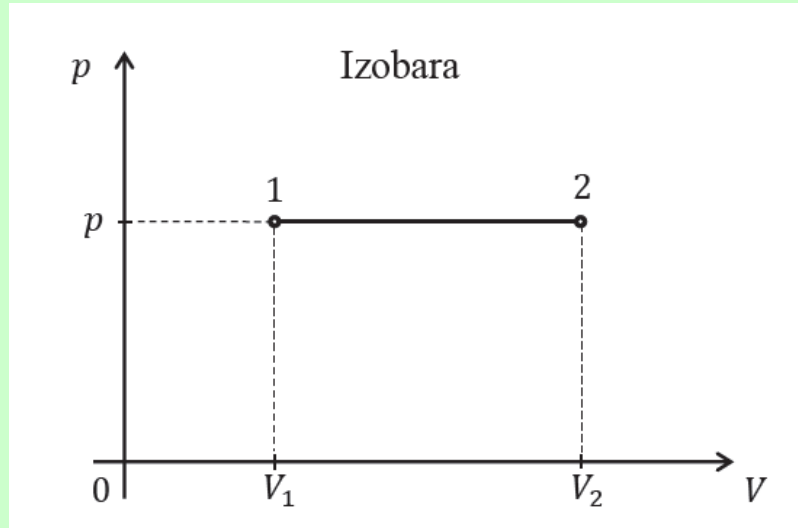
Jsou to děje:

a) děj *izotermický*: $T = \text{konst.} \Rightarrow p_1 V_1 = p_2 V_2 = \text{konst.}$

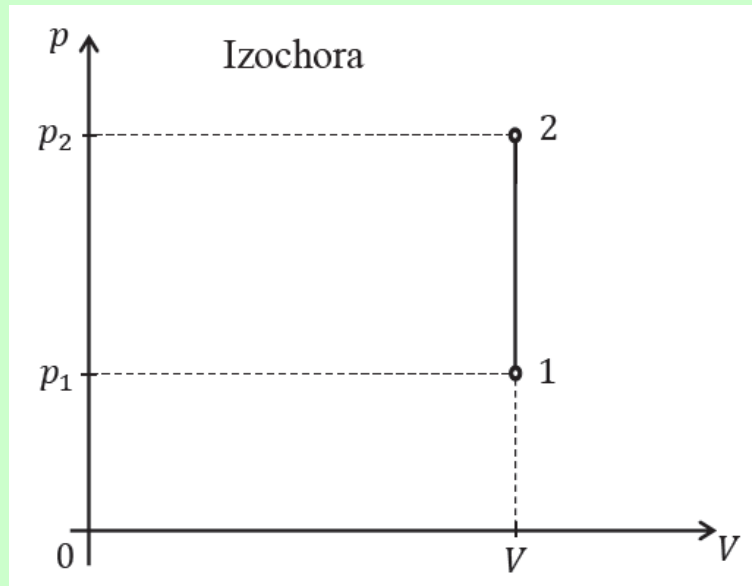


Stavové změny v plynech

b) děj *izobarický*: $p = \text{konst.} \Rightarrow V_1 / T_1 = V_2 / T_2 = \text{konst.}$



c) děj *izochorický*: $V = \text{konst.} \Rightarrow p_1 / T_1 = p_2 / T_2 = \text{konst.}$



Stavové změny v plynech

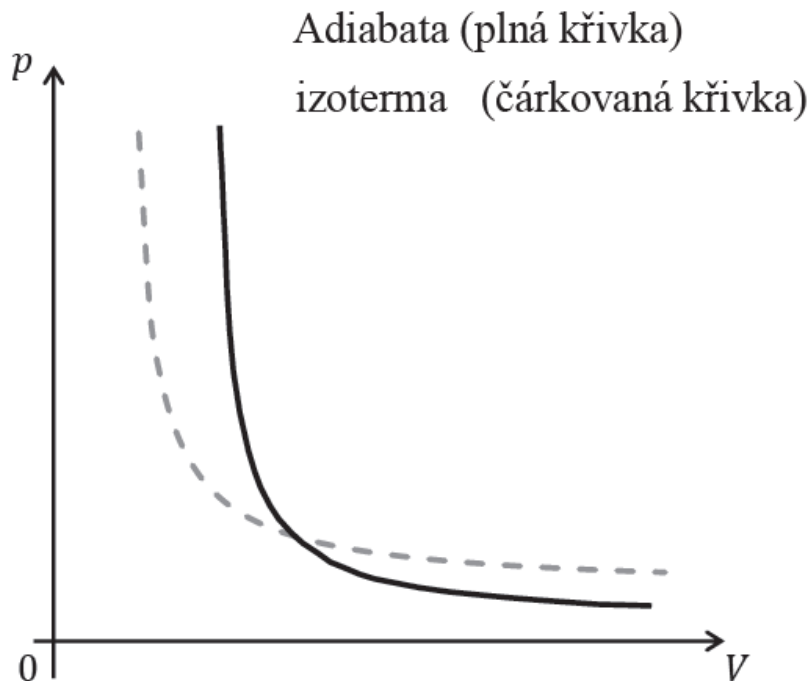
Adiabatický děj

- změna stavu plynu, který je dokonale tepelně izolován
- nedochází k výměně tepla mezi soustavou a okolím

Platí: $p_1 V_1^\kappa = p_2 V_2^\kappa = \text{konst.}$, kde κ je Poissonova konstanta,

$\kappa = c_p / c_v$, kde c_p je měrná tepelná kapacita plynu při konstantním tlaku a c_v je měrná tepelná kapacita plynu při konstantním objemu

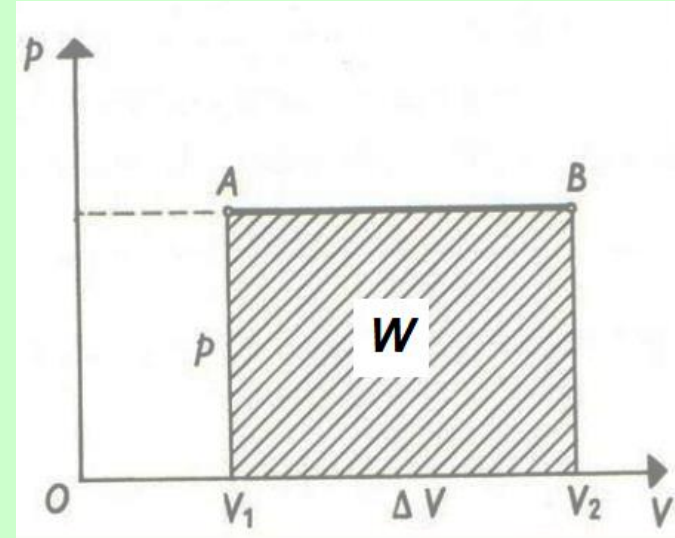
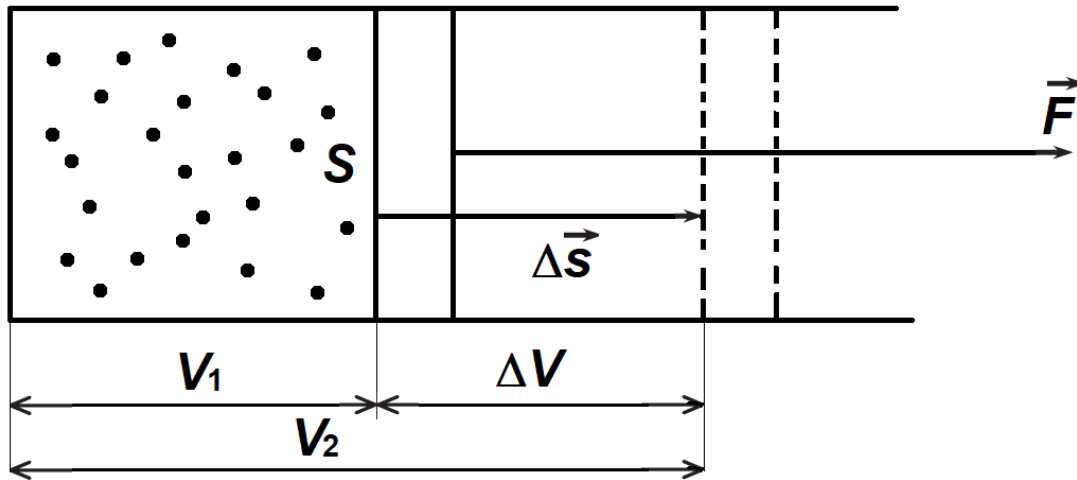
- pro každý plyn platí $c_p > c_v \Rightarrow \kappa > 1$



Práce plynu

a) Práce plynu při *izobarickém* ději

- plyn v nádobě s pohyblivým pístem má tlak p a objem V :



- na píst o ploše S působí tlaková síla o velikosti $F = p \cdot S$

- tlak plynu je konstantní \Rightarrow tlaková síla F je konstantní

Plyn vykoná práci: $W = F \cdot \Delta s = p \cdot S \cdot \Delta s = p \cdot \Delta V$

První věta termodynamická platí ve tvaru: $Q = \Delta U + W$

Práce plynu

b) Práce plynu při *izochorickém* ději

- při izochorickém ději se objem plynu nemění, tj. $\Delta V = 0 \Rightarrow$
 \Rightarrow plyn práci nekoná ani nespotřebovává, práce plynu je nulová

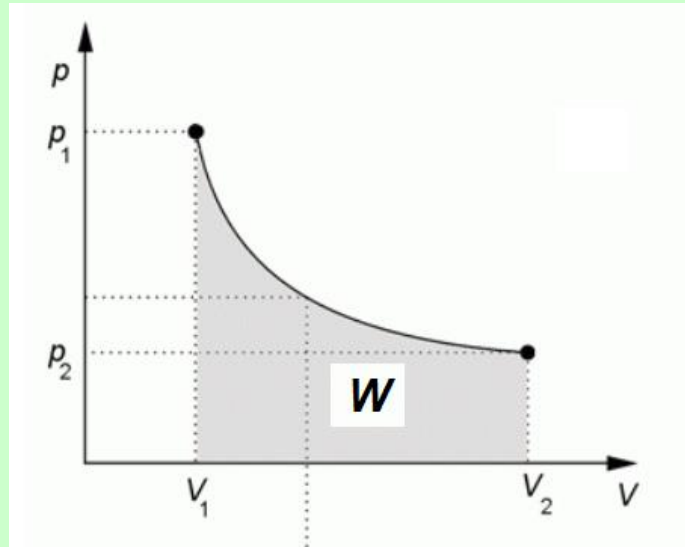
První věta termodynamická platí ve tvaru: $Q = \Delta U \Rightarrow$

\Rightarrow dodané teplo se spotřebuje jen na zvýšení vnitřní energie plynu

Práce plynu

c) Práce plynu při *izotermickém* ději

- tlak plynu není konstantní \Rightarrow není konstantní ani tlaková síla, která působí na píst (tlak nelze dát před integrál)



Plyn vykoná práci: $W = \int_{V_1}^{V_2} p \, dV = \int_{V_1}^{V_2} \frac{nR_m T}{V} \, dV = nR_m T \ln \frac{V_2}{V_1}$

- teplota plynu je konstantní $\Rightarrow \Delta U = 0$

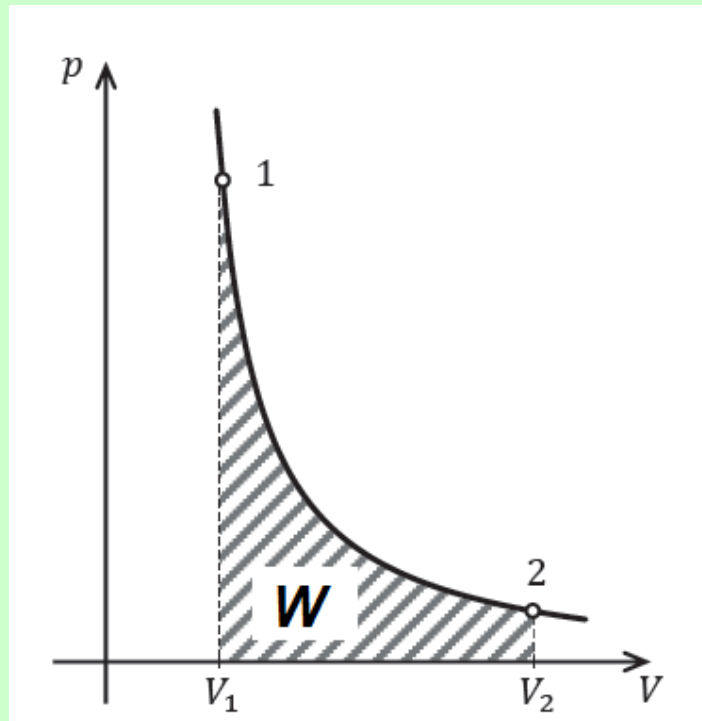
První věta termodynamická platí ve tvaru: $Q = W$

- vyměněné teplo se spotřebuje jen na konání práce

Práce plynu

d) Práce plynu při *adiabatickém* ději

- neprobíhá tepelná výměna mezi plynem a okolím $\Rightarrow Q = 0$ (dodané teplo)



První věta termodynamická platí ve tvaru: $W = -\Delta U$

- plyn koná práci na úkor své vnitřní energie

Carnotův kruhový děj

- skládá se ze dvou izotermických a ze dvou adiabatických dějů \Rightarrow
 \Rightarrow čtyři dílčí vratné děje

a) *Izotermická expanze:*

- plyn je ve styku s ohřívačem o teplotě T_1
- plyn má počáteční objem V_1 , tlak p_1 , a teplotu T_1
- proběhne izotermická expanze $A \rightarrow B$, tím plyn zvětší objem z V_1 na V_2 , zmenší tlak na z p_1 na p_2 a teplota zůstává T_1
- plyn odebere ohřívači teplo Q_1 a vykoná tak práci W_1

b) *Adiabatická expanze:*

- plyn je tepelně izolován
- proběhne adiabatická expanze $B \rightarrow C$, tím plyn zvětší objem z V_2 na V_3 , zmenší tlak z p_2 na p_3 a ochladí se na teplotu T_2 chladiče
- plyn vykoná práci W_2 na úkor své vnitřní energie

Carnotův kruhový děj

c) *Izotermická komprese:*

- plyn je ve styku s chladičem o teplotě T_2
- plyn je izotermicky stlačen – změna C \rightarrow D, tím plyn zmenší objem z V_3 na V_4 , zvětší tlak z p_3 na p_4 a teplota zůstává T_1
- plynu je dodána práce W_3 , kterou plyn dodá chladiči jako teplo Q_2

d) *Adiabatická komprese:*

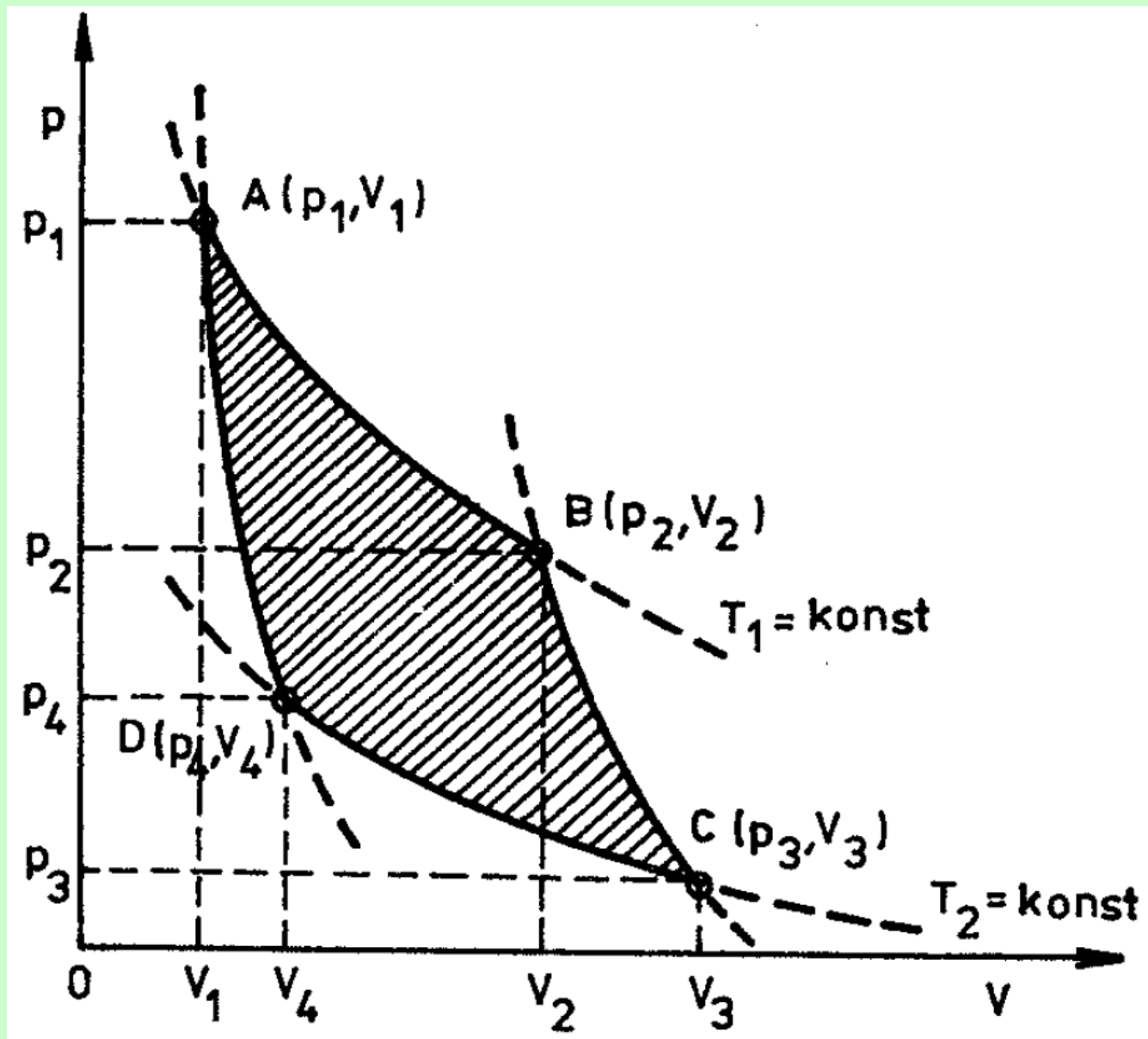
- plyn je tepelně izolován
- plyn je adiabaticky stlačen – změna D \rightarrow A, tím plyn zmenší objem z V_4 na V_1 , zvětší tlak z p_4 na p_1 a ohřeje se na teplotu T_1 ohříváče
- plynu je dodána práce W_4 , který tím zvětší svoji vnitřní energii
- cyklus je uzavřen

Celková práce vykonaná plynem: $W = W_1 + W_2 - W_3 - W_4$

Účinnost Carnotova kruhového děje: $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$

- závisí pouze na teplotách ohříváče a chladiče

Carnotův kruhový děj



Druhá věta termodynamická

Výsledek Carnotova kruhového děje ukazuje:

- nelze sestrojít periodicky pracující stroj, který by veškeré dodané teplo přeměnil na práci, část tepla je vždy odevzdána chladicí lázni**
- teplo nemůže samovolně přejít z tělesa studenějšího na těleso teplejší**
- není možné sestrojít perpetuum mobile druhého druhu**
- je nemožné získat ze soustavy neživých látek kruhovým dějem práci jen tím způsobem, že by se nějaká látka ochlazovala na teplotu nižší než je teplota nejstudenějšího místa v okolí**

Druhá věta termodynamická

Veličina entropie S:

Míra neuspořádanosti systému \Rightarrow čím větší neuspořádanost systému, tím větší jeho entropie

Formulace druhé věty termodynamické se zavedením entropie:

Existuje stavová funkce entropie S , pro jejíž přírůstek platí:

$$dS \geq \frac{dQ}{T},$$

kde dQ je elementární přírůstek dodaného tepla, které uzavřený, tepelně homogenní systém přijme od okolí,

T je termodynamická teplota, při které děj probíhá

Při přechodu systému ze stavu [1] do stavu [2] je celková změna entropie:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_{[1]}^{[2]} dS \geq \int_{[1]}^{[2]} \frac{dQ}{T}, \text{ kde } S_1 \text{ resp. } S_2 \text{ je entropie systému ve stavu [1] resp. ve stavu [2]}$$

Druhá věta termodynamická

V tepelně izolované soustavě platí:

$\Delta S = S_2 - S_1 > 0$ pro nevratné procesy a

$\Delta S = S_2 - S_1 = 0$ pro vratné procesy

- teplo může samovolně přecházet pouze z teplejšího tělesa na těleso studenější, nikoliv obráceně

Prošla-li soustava kruhovým dějem (tj. dějem, při němž je konečný stav soustavy totožný s počátečním stavem), platí:

$$\oint \frac{dQ}{T} \leq 0$$

Tepelné stroje a termodynamické zákony:

<https://www.youtube.com/watch?v=rmYpAmVY9h4>

Jak funguje tepelné čerpadlo:

<https://www.youtube.com/watch?v=vqP0OhxwJAU>