

Termodynamika kruhových tepelných strojov

Juro Tekel

juraj(dot)tekel(at)gmail(dot)com

Poznámky k prednáške o tom, ako po teoretickej stránke funguje tepelné stroje ako zo termodynamiky vyplývajú ich obmedzenia a preto vlastne ani nemáme veľa rôznych možností.

Jun 2010

Lazy pod Makytou 2010

Contents

1	Uvod	1
2	Poznámky k termodynamike a dejom s plynmi	1
3	Dynamika dejov s plynmi a vnútorná energia, prvá veta termodynamická	4
4	Základná myšlienka, jednoduché príklady a účinnosť tepelných strojov	6
5	Jeden zložitejší príklad tepelného stroja	8
6	Adiabatické deje	10
7	Carnotov stroj po teoretickej a praktickej stránke	11
8	Za obzorom týchto poznámok	11
9	Použitá a odporúčaná literatúra	12

1 Uvod

Zdroje príkladov ako aj odporúčané citanie k tejto problematike je uvedené na záver textu.

Príklady pochádzajú zväčša zo zbierok FKS, FX, Naboja FKS a úloh Fyzikálnej Olympiady, autorom ktorých patrí veľká vďaka.

2 Poznámky k termodynamike a dejom s plynmi

V celej prednáške budeme pracovať iba s ideálnymi plynmi. V tomto prípade zanedbávame akúkoľvek interakciu medzi molekulami, z ktorých sa plyn skladá a predpokladáme dokonalú stlačiteľnosť. Plyn ako taký dokonale vyplní akúkoľvek nádobu, do ktorej ho dáme. Pohyb molekúl a ich nárazy o steny nádoby spôsobujú, že plyn tlačí na nádobu. Takto sa dostávame k trom veličinám, ktoré charakterizujú stav, v ktorom sa plyn nachádza. Sú to objem V , tlak p a teplota T . Tieto však nie sú nezávislé a pre ideálny plyn v ustálenom stave spĺňajú stavovú rovnicu

$$pV = NkT = nRT \quad (1)$$

kde k je Boltzmanova konstanta a R je univerzalna plynova konstanta. V prípade že sa zaujímame o stále ten istý plyn, je N , respektive n , konstanta a dostávame

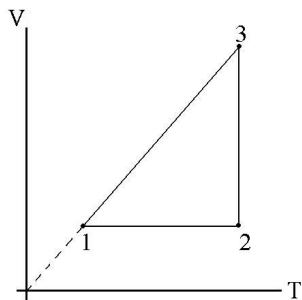
$$\frac{pV}{T} = \text{const}$$

V nasledujúcom texte budeme často krasliť závislosti týchto veličín pri nejakých konkrétnych zmenách, ktorá sa s plynom deje. V dvoch rozmeroch máme niekoľko možných závislostí, avšak uvidíme že jedna konkrétna, p vs. V , bude najužitočnejšia.

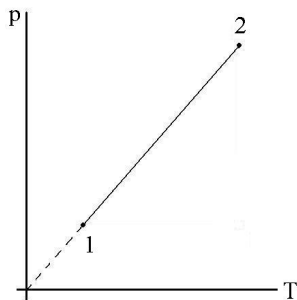
Ako sme povedali, stavová rovnica plynu platí iba pre plyn, ktorý je v ustalenom stave. Avšak ďalej budeme používať stavovú rovnicu aj v prípadoch, keď sa stav plynu bude meniť. To nám umožňuje predpoklad, že deje, ktorými plyn prechádza sú pomalé. Čo to presne znamená? Predpokladáme, že počas deja má plyn dostatok času vyrovnať svoje stavové veličiny v celom svojom objeme a to v každom momente. To si možno predstaviť tak, že stav plynu veľmi málo zmeníme, počkame kým sa plyn ustáli a opäť veľmi málo zmeníme jeho stav. Oprávnenosť tohto predpokladu je v obrovskej rýchlosti, ktorou sa pri obvyklých teplotách molekuly plynu pohybujú. Tie sú veľmi veľké v porovnaní s rýchlosťami, akými sa menia rozmery nádoby prípadne ine parametre.

Nasleduje niekoľko úloh pre lepšie ujasnenie si, čo stavová rovnica vlastne znamená.

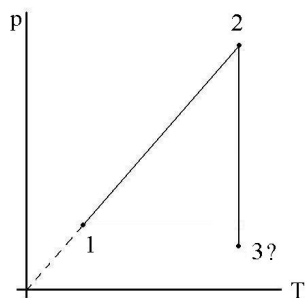
Príklad 1. Prekreslite nasledujúci dej s plynom z $T - V$ diagramu do $T - p$ diagramu.



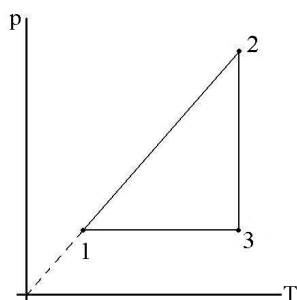
Riesenie. Pozrime sa najskôr na časť $1 \rightarrow 2$. Ako vidíme, plyn má pri tomto deji neustále rovnaký objem, avšak zväčšuje sa jeho teplota. To znamená, že molekuly v ňom sa hybu rýchlejšie, na steny nádoby narazajú silnejšie a tlak plynu sa zväčšuje. Ako konkrétne sa zväčšuje nám povie stavová rovnica. Keďže $V = \text{const}$, dostávame že $p = \text{const} \times T$ a teda grafom bude priamka, ktorá prechádza cez pociatok. Zatiaľ máme teda.



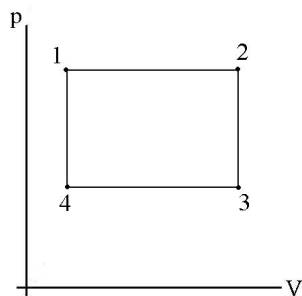
V časti $2 \rightarrow 3$ má plyn stále rovnakú teplotu. Keďže sa však jeho objem zväčšuje, frekvencia narazov na steny sa bude znižovať a rovnako sa bude znižovať aj tlak plynu. Grafom teda bude zvislá čiara.



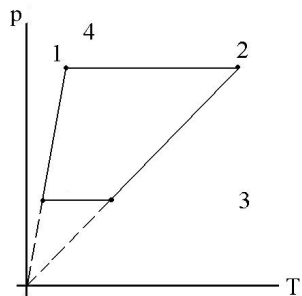
Ostava teda zistiť, kde bude bod 3. Z grafu vidíme, že v časti $3 \rightarrow 1$ pre plyn platí $V = \text{const} \times T$, čo po dosadení do stavovej rovnice dáva $p = \text{const}$. Takže v novom grafe bude časť $3 \rightarrow 1$ rovná čiara a ao výsledok dostávame.



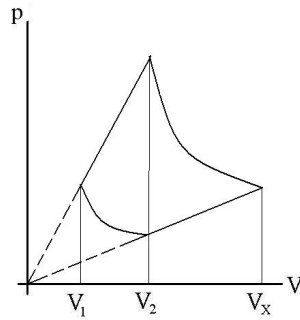
Příklad 2. *Prekreslite nasledujúci dej s plynom z $V - p$ diagramu do $T - p$ diagramu.*



Riesenie. V časti $1 \rightarrow 2$ sa pri zväčšujúcom sa objeme tlak nemení, preto musí teplota rásť a grafom je vodorovná čiara smerom do prava od bodu 1. V $2 \rightarrow 3$ pri nemeniacom sa objeme klesá tlak, preto musí klesať teplota. Pre $V = \text{const}$ dostávame ako v predchádzajúcom prípade $p = \text{const} \times T$ a ako graf priamku prechádzajúcu stredom. Pre procesy $3 \rightarrow 4$ a $4 \rightarrow 1$ platí analogická argumentácia opačným smerom a riešenie potom vyzera nasledovne.



Příklad 3. V nasledujúcom deji určite neznámy objem V_x ak poznáte V_1, V_2 . Cesty $2 \rightarrow 3$ a $4 \rightarrow 1$ sú izotermy.



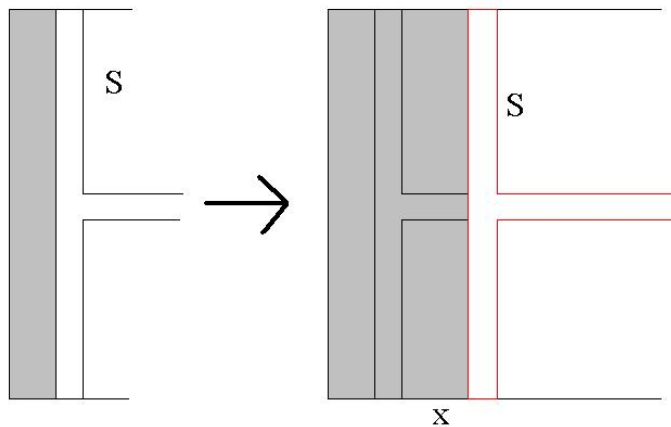
Výsledok.

$$V_x = V_2^2 / V_1$$

3 Dynamika dejov s plynmi a vnútorná energia, prvá veta termodynamická

V úlohách predchádzajúcej časti sme sa nezaujímalí, čo spôsobuje zmenu stavu plynu a čo presne sa s plynom pri týchto zmenách deje.

Keďže plyn pôsobí tlakom na steny nádoby, v ktorej sa nachádza, na jeho stlačenie musíme vykonať prácu. Rovnako pri rozpínaní plynu sa kona práca na nádobe. Všetky veličiny, ktoré budeme teraz popisovať, budú vždy z pohľadu plynu. Takže pri kladnej práci plyn prácu kona, pri zápornej je práca konaná na plyne. Zvyčajná úvaha a zvyčajný obrazok dávajú pre malú prácu, ktorú plyn vykona pri malom posunutí piestu Δx



$$W = F \Delta x = p \Delta V$$

Ak sa teda objem plynu zmení o ΔV , plyn vykona na svojom okolí (nádobe) takúto prácu. Ak sa plyn sťaci, okolo vykonalo prácu na plyne, nakoľko v tomto prípade $\Delta V < 0$.

Túto prácu nazývame makroskopickou, nakoľko sa kona viditeľnou zmenou polohy objektov. Plyn však môže konať aj mikroskopickú prácu, t.j. prácu, ktorá nie je konaná makroskopickým presunom. To sa stáva v prípade, keď molekuly plynu pri narazoch na stenu nádoby získavajú alebo strácajú

nejaku energii. Inak povedane ak je plyn v kontakte s objekom, ktorý ma mensiu, prípadne vacšiu teplotu. Tejto práci sa hovorí teplo, označuje sa Q , vykonáva sa ak je plyn v tepelnom kontakte s okolím a prejavuje sa zmenou teploty plynu. Plyn kona kladné teplo keď prijíma tepelnú energiu a ohrieva sa, plyn kona záporné teplo keď sa tepelnú energiu odovzdáva a ochladzuje sa.

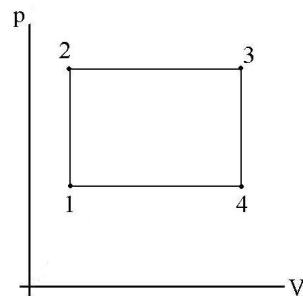
Keďže molekuly, ktoré tvoria plyn, sú v neustalom pohybe, každá z nich nesie nejakú energiu. Tuto energiu priamo nevidíme a preto sa jej hovorí vnútorná energia plynu. Tento názov má naznačovať, že energia je istým spôsobom uložená vo vnútri plynu. Pre ideálny plyn je táto energia jednoducho súčtom kinetických energií všetkých molekúl. Tu je dôležité uviesť si, že pre ideálny plyn je preto vnútorná energia nezávislá od objemu a je funkciou iba teploty¹. Vnútornú energiu označujeme U .

Pri dejoch s plynmi musí sa zachovávať energia. Ak plyn prijíma nejaké teplo, musí sa to prejavovať na zmene jeho vnútornej energie (ohreje sa) alebo sa vykona makroskopická práca na okolí. Píšeme teda

$$Q = \Delta U + p\delta V$$

Tejto rovnici sa hovorí prvá veta termodynamická a netreba zabúdať, že vlastne vyjadruje zákon zachovania energie. Schopnosť plynov premieňať teplo na makroskopickú prácu sa ukáže čoskor kľúčová po teoretickej ako aj po praktickej strane. Este raz treba zdôrazniť, že všetky veličiny sú z pohľadu plynu, takže $Q > 0$ ak plyn teplo prijíma a $\Delta V > 0$ sa plyn rozpína a kona prácu. Skutek sa zamyslieť, ako by rovnica vyzerala pri iných konvenciách.

Priklad 4. Akú prácu plyn vykona pri prechode $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 1$ v nasledujúcom diagrame?



Riesenie. V časti $1 \rightarrow 2$ sa objem plynu nemení a teda plyn prácu nekona. V časti $2 \rightarrow 3$ plyn pri konštantnom tlaku p_2 zmenil svoj objem z V_1 na V_3 a teda vykonaná práca je $p_2(V_3 - V_1)$. V časti $3 \rightarrow 4$ sa práca nekona a v časti $4 \rightarrow 1$ plyn vykona prácu $p_1(V_1 - V_3) = -p_1(V_3 - V_1)$. Táto práca je záporná a preto plyn prácu prijíma, okolie ju kona na nom. Výsledná práca je teda

$$W = (p_2 - p_1)(V_3 - V_1)$$

Tu si všimime veľmi dôležitú vec. Práca, ktorú plyn vykonal, je daná plochou, ktorú uzatvára krivka grafu deja. Toto sa ukáže byť univerzálnym pravidlom a bude platiť pre ľubovoľný dej.² Presne pre túto vlastnosť sú $V - p$ diagramy dôležitejšie, ako ostatné možnosti. Tiež si treba všimnúť, že keby bol plyn konal opačný dej, vykonaná práca by bola záporná a museli by sme na plyne prácu vykonať. Toto sa ukáže byť základ fungovania chladničiek.

Priklad 5. Vypocítajte, akú prácu vykona plyn v nasledujúcich dejoch.

Navod. Plocha vymedzeného útvaru je hľadanou prácou.

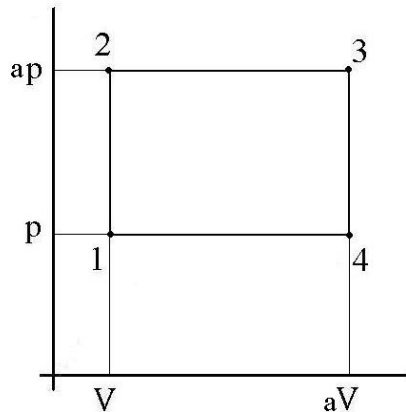
¹Pre neideálne plyny potom pribúda energia interakcie molekúl plynu medzi sebou. Pri väčšom objeme sú vzdialenosti medzi molekulami väčšie a preto sa mení aj vnútorná energia plynu

²Tu ide vlastne o integrovanie výrazu $p dV$ pre meniace sa p .

4 Zakladna myslienka, jednoduche priklady a ucinnost tepelnych strojov

V predchadzajucem casti sme videli, ze plyn pri moze prejsť dejom, pri ktorom sa vrati spat do svojho povodneho stavu a pri tom vykona nejaku pracu. Odkial sa vsak tato praca vzala? Plyn mohol venovat cosi zo svojich vlastnych rezerv, teda z vnutornej energie. Ked sa vsak prizrieme blizsie, zistime, ze plyn bol iba mediom na premenu tepla na makroskopicku pracu.

Priklad 6. *Urcite, v ktorych castiach nasledujuceho deja je potrebne plynu dodavat teplo a vypocitajte, kolko tepla mu je potrebne dodat. Rovnako urcite v ktorych castiac sa plynu teplo odobera a kolko tepla sa plynu odobralo.*



Riesenie. V casti $1 \rightarrow 2$ sa plyn pri nemeniacom objeme zohrieva, plyn teda nekona ziadnu pracu a iba teplo prijima. Zo stavovej rovnice je teplota v bode 2 rovna aT , kde $T = pV/nR$. Zmena teploty je tada $(a-1)T$. Ak teraz definujeme tepelnú kapacitu ako konstantu umernosti v zavislosti $Q \propto \Delta T$, dostavame

$$Q_{12} = C_V \Delta T$$

kde C_V oznacuje tepelnú kapacitu plynu pri nemeniacom sa objeme.³

V casti $2 \rightarrow 3$ sa plyn ohrieva (vyplyva zo stavovej rovnice) a kedze okrem toho kona pracu, musime mu teplo isto dodavat.⁴ Teplota v bode 3 je a^2T a pre dodane teplo dostavame

$$Q_{23} = C_p a(a-1)T$$

kde C_p je tepelná kapacita plynu pri nemeniacom sa tlaku. Dostavame teda ze celkove teplo, ktore plyn prijime je

$$Q = (C_V + kC_p)(a-1)T = (C_V + aC_p)(a-1)\frac{pV}{nR}$$

Pri tomto deji vypoka plyn pracu $(a-1)^2 pV$ (obsah plochy). Aby sme videli, v akom vzťahu je tato praca k dodanemu a odobranemu teplu, potrebujeme vediet cosi viac o tepelných kapacitách C_p, C_V .

Ak sa objem plynu nemeni $C_V = 0$ a dostavame

$$Q = C_V \Delta T = \Delta U$$

³Uvidime, ze je dolezite rozlisovat rozne tepelne kapacity.

⁴Je dolezite si uvedomit, ze prlyn moze pri zvsyjucej sa teplote teplo odovzdavat, avsak v tomto pripade by na nom musela byt konana praca.

Je dolezite si uvedomit, ze pre idealny plyn vnutorna energia nie je funkciou objemu a teda zmena vnutornej energie pri procesoch, kde sa objem plynu menuje bude rovnaka, ako ked sa objem plynu nemeni. Vzťah $\Delta U = C_V \Delta T$ je preto pre idealny plyn univerzalny.

Ak je tlak plynu konstantny, potom

$$Q = C_p \Delta T = \Delta U + p \Delta V = C_V \Delta T + nR \Delta T$$

Tu sme vyuzili predchadzajuci fakt a stavovu rovniciu, z ktorej pri nemeniacom sa tlaku $p \Delta V = nR \Delta T$. Dostavame teda

$$C_p = C_V + nR$$

Tomuto sa hovori Mayerov vzťah. Je dolezite si uvedomit, preco su tieto kapacity rozne. Ak ohrievame plyn pre konstantnom tlaku, plyn sa rozpina a kona pracu. Preto na ohriatie o dany teplotny rozdiel potrebujeme dodat o tuto pracu viac tepla ako v pripade, ked ma plyn fixny objem.

A na zaver pride este jeden fakt, ktorym bude ekviparticny teorem. Ten hovori, ze vnutorna energia sa rozdeli rovnomerne medzi stupne volnosti plynu a pri ohriati plynu o ΔT sa jeho vnutorna energia na kazdy stупen volnosti zvacsi o $Nk\Delta T/2$. Zmena vnutornej energie je potom

$$\Delta U = \frac{i}{2} Nk\Delta T$$

z vocho dostavame priamo

$$C_V = \frac{i}{2} nR \quad , \quad C_p = \frac{i+2}{2} nR$$

Teraz sa uz mozme pozriet, v akom vzťahu je vykonana pracu a dodane teplo v priklade 6. Z vysledku prikladu dostavame pre dodane teplo

$$Q = (C_V + aC_p)(k-1) \frac{pV}{nR} = \left(\frac{a+1}{2} i + a \right) (a-1) pV$$

Vykonana pracu je $W = (a-1)^2 pV$. Pomer tychto dvoch hodnot je

$$\frac{W}{Q} = \frac{a-1}{a + \frac{a+1}{2} i}$$

Je zrejmé, ze tento pomer je mensi ako 1 pre luobovolne $a > 1$. Znamená to, ze plyn vykona mensiu pracu ako je teplo, ktore sme mu dodali.

Zrekapitulujme si, co sa presne pri tomto deji s plynom stalo.

Najskor sme ho ohrievali pri fixovanom objeme a potom sme ho za staleho ohrievania nechali rozpinat a konat pracu. Ak ho vsak chceme vratit do povodneho stavu, musime ho naspät stlacit, pritom vykonat nejaku pracu. Aby tato pracu bola mensia ako pracu, ktoru plyn vykonal, musime plyn schladit a tym zmensit jeho tlak. Ked ho teraz stlacime, vykoname mensiu pracu ako vykonal plyn, ktory je teraz navyse v povodnom stave, pripraveny opät pracovat.

Toto je vzdy zakladna myslienka akehokolvek tepelneho stroja. Na jeho pracu teda potrebujeme ohrievac, tj. teleso z ktoreho odoberame tepelo a chladic, ktory v vhodnom okamihu schladi plyn, aby sa nam jednoduchsie stlacial a dostaval do povodneho stavu. Pomer W/Q sa nazýva ucinnostou tepelneho stroja, nakolko charakterizuje ako dobre sa dodane teplo premenilo.

Priklad 7. *Vypocitajte ucinnost nasledujucich dejov.*

Vysledok.

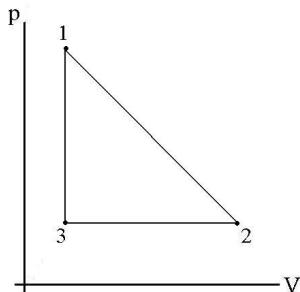
V casti 7 si ukazeme, ze ani teoreticky nemožno zostrojít tepelny stroj s luobovolne velkou ucinnostou a existuje horna hranica, dana teplotami ohrievaca a chladica, cez ktoru sa neda prejst.

Najskor sa ale pozrime na jeden o cosi zlozitejsi priklad a potom na jeden o cosi zlozitejsi dej s plynom.

5 Jeden zložitejší príklad tepelného stroja

Aj keď je nasledujúci príklad veľmi zaujímavý, je veľmi náročný a pri ceste za cieľom tejto prednášky sa da preskocit.

Príklad 8. Pri akom objeme je teplota v plyne v nasledujúcom deji najvyššia?



Riesenie. Keď sa pozrieme, ako v grafe vyzerajú izotermy maximum očakvame niekde na sivej čiare. Tá je dana vzťahom

$$p = \frac{p_2 - p_1}{V_2 - V_1}(V - V_1) + p_1$$

Použitím tohto a stavovej rovnice dostavame pre teplotu

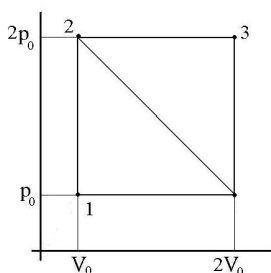
$$T = \frac{p_2 - p_1}{(V_2 - V_1)nR}V^2 + \frac{1}{R} \left(p_1 - \frac{p_2 - p_1}{V_2 - V_1}V_1 \right) V$$

Co je kvadratický výraz, ktorého grafom je parabola a maximum bude mať predne medzi koreňmi predchádzajúceho výrazu. Dostavame

$$V = -\frac{1}{2} \left(p_1 - \frac{p_2 - p_1}{V_2 - V_1}V_1 \right) \left(\frac{V_2 - V_1}{p_2 - p_1} \right)$$

Ako vidíme, v prípade tohto deja bude zložitejšie vypočítať aké teplo bolo dodané.

Príklad 9. Vypočítajte pomer účinnosti dejov $1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 1$ a $2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 2$ ak pracovnou látkou je dvojomový plyn.



Riesenie. Úloha je zo zbierky FX, takže pre jej úplné vzorové riešenie hľadajte tam.

V oboch prípadoch vykonáme prácu $p_0V_0/2$.

Pozrime sa na teplo dodané v prvom z dejov. V časti $1 \rightarrow 2$ sa vnútorná energia zvýši o $5/2nRT = 5/3p_0V_0$. Keďže plyn nekona prácu, toto je aj dodané teplo. Prichádza druhá, náročnejšia časť. Dosadením do výsledku predchádzajúcej úlohy zistíme, že teplota plynu je maximálna v strede

usecky. Avsak ako to bude s dodavanim tepla (plyn moze prijimat teplo aj ked sa ochladzuje, nakolko kona pracu).

Zavedieme preto parameter x pozdl usecky tak, ze

$$p = (2 - x)p_0 \quad , \quad V = (1 + x)V_0$$

Takze $x = 0$ je bod 2 a $x = 1$ je bod 4. Teraz sa pozerame co sa bude diat, ak sa plyn dostane z x do $x + dx$, konkretne ci sa na tuto zmenu musi teplo odobrat alebo prijat. Dostavame

$$dU = \frac{5}{2} \left[\underbrace{Nk(T + dT)}_{po} - \underbrace{NkT}_{pred} \right] = \frac{5}{2} p_0 V_0 (1 - 2x) dx$$

$$dW = pdV = p_0 V_0 (2 - x) dx$$

a teda

$$\delta Q = p_0 V_0 \left(\frac{9}{2} - 6x \right) dx$$

Takze ak oznacime $x_1 = 3/4$ potom pre $x < x_1$ sa teplo prijima a pre $x > x_1$ sa teplo odovzdava. Tento bod si ozacme X . Teplo prijate na useku $2 \rightarrow X$ je

$$W_{2X} + U_x - U_B = p_0 V_0 \frac{2 + (2 - x_1)}{2} x_1 + \frac{5}{2} [(1 + x_1)(2 - x_1) - 2] p_0 V_0$$

Prvy clen je obsah lichobeznika v grafe, druhy je prepisanim $5/2 Nk(T_x - T_B)$. Vo zvysnej casti deja sa teplo odovzdava, prijate teplo je teda pre prvý z dejov

$$Q_1 = \frac{p_0 V_0}{2} [(4 - x_1)x_1 + 5(1 + x_1 - x_1^2)]$$

Podobne uvahy budu aj pre druhy z dejov. Na useku $2 \rightarrow 3$ prijime teplo $7/32 p_0 V_0 = C_p \Delta T$. Teplo prijimame potom iba na useku $4 \rightarrow X$, ktore vyjadrimo podobne ako v predchadzajucom pripade

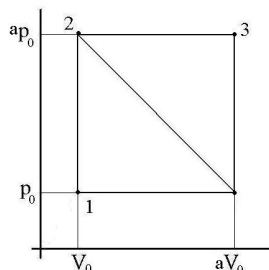
$$Q_2 = \frac{p_0 V_0}{2} [(1 + 4x_1 - x_1^2) + 5(2 + x_1 - x_1^2)]$$

Vysledny pomer ucinnosti je potom

$$\eta_1/\eta_2 = Q_2/Q_1 = 115/67$$

Nadseny citatel isto rad prepocita ten isty priklad vo vseobecnom sate.

Priklad 10. Vypocitajte pomer ucinnosti dejov $1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 1$ a $2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 2$.



6 Adiabaticke deje

Tri zakladne deje s plynmi uz pozname. Su to deje, pri ktorych sa jedna zo stavovych velicin nemeni a zvsne dve sa menia podla stavovej rovnice. Avsak plyn moze konat aj oveľa zložitejšie deje (ako sme videli v predchádzajúcej ulohe). Jedným z takýchto dejov je taký, pri ktorom si plyn nevymieňa teplo so svojim okolím. Toto môže nastať ak je plyn tepelne izolovaný od svojho okolo alebo sa jeho stav mení tak rýchlo, že si so svojim okolím teplo jednoducho vymieňať nestíha.⁵

Takýto dej budeme nazývať adiabaticky.

Platí pri $Q = 0$ a teda z prvej vety termodynamikkej

$$dU + pdV = C_V dT + pdV = 0$$

Zo stavovej rovnice

$$dpV + pdV = nRdT$$

a preto

$$(C_V + nR)pdV + C_V dpV = 0 \quad , \quad \frac{dp}{p} = -\frac{C_p}{C_V} \frac{dV}{V}$$

Pomer tepelných kapacít pri nemiach sa tlaku a nemiach obojeme sa označuje zväčša κ . Integráciou tejto rovnice dostávame dobre známou adiabaticku formulu

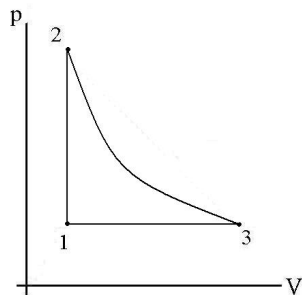
$$pV^\kappa = \text{const}$$

Niekoľko uloh na zoznamenie

Priklad 11. Jednoatomový plyn, ktorý má hodnoty stavových velícín p, V, T prudko stlačíme prácou W . Aká bude jeho nová teplota?

Výsledok. $T \left(1 + \frac{2W}{3pV} \right)$

Priklad 12. Jednoatomový plyn prejde nasledovným dejom (krivka je adiabatou). Ak viete hodnoty p_1, T_1, T_2 určte hodnoty ostatných stavových velícín.



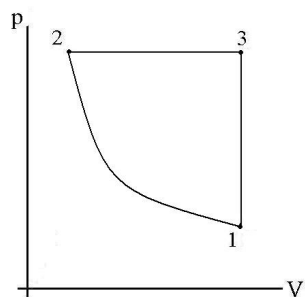
Priklad 13. Dvoatomový plyn prechádza nasledovným kruhovým dejom (krivka je adiabatou). Teplota plynu v bode 1 je T . Vypočítajte

a. neznáme stavové velíciny v krajných bodoch

⁵V uvode sme hovorili, že budeme deje považovať za pomalé, aby sme mohli stále používať stavovú rovnicu. Tu zas hovoríme o veľmi rýchlych dejoch. Takže ako to je? Na tomto mieste sa pod rýchlym myslí už spomínaný dej, pri ktorom si plyn nevymieňa teplo s okolím. Taký plyn však môže byť stále dosť pomalý na to, aby sa stavové velíciny stihli vyrovnáť v celom objeme. Kľúčovým slovom je tu opät obrovská rýchlosť molekúl plynu.

b. dodane teplo a vykonanu pracu

c. ucinnost takeho tepelneho stroja



7 Carnotov stroj po teoretickej a praktickej stranke

8 Za obzorom tychto poznatok

9 Pouzita a odporucana literatura

- Zbierky riesenych uloh Naboja FKS, 1999 az 2009
- Zbierka riesenych uloh FX, 1. a 3. rocnik
- Archiv uloh Fyzikalneho Korespondencneho Seminaru
- Archiv uloh Fyzikalnej Olympiady
- Studijne texty ceskej FO - Přemysl Šediv y - KRUHOV DEJ S IDELNIM PLYNEM
- Vladimir Cerny - skripta a ulohy k prednaske Termodynamika a Statisticka Fyzika