

$$\frac{A_2'}{A_1'} = \frac{\ln \frac{V}{V_0}}{1 - \frac{V_0}{V}} = \frac{\ln \left(1 + \frac{V}{V_0} - 1 \right)}{\frac{(V - V_0)}{V}} = \frac{\frac{(V - V_0)}{V_0}}{\frac{(V - V_0)}{V}} = \frac{V}{V_0} > 1$$

Keďže v obidvoch prípadoch je plyn nakoniec v tom istom stave, je aj zmena jeho vnútornej energie v obidvoch prípadoch rovnaká. V druhom prípade teda väčšiu prácu mohol plyn vykonať len preto, že prijal viac tepla od svojho okolia.

Takým istým postupom, akým sme zväčšili objem plynu v druhom prípade, môžeme objem plynu — obrátením celého pochodu — aj zmenšiť na pôvodnú hodnotu V_0 . Ba obrátenie chodu deja na opačný môžeme docieľiť v každej jeho fáze ľubovoľnou malou zmenou vonkajšej sily, lebo tá sa stále rovná sile, ktorou účinkuje plyn na piest z jeho druhej strany. Na druhom mieste opísané zväčšenie objemu plynu nazývame preto *vratným*.

Všeobecne *vratným* (*reverzibilným*) nazývame každý dej v systéme látok, ktorý prebieha za ustavičnej rovnováhy vlastností systému a jeho okolia, lebo vtedy jeho priebeh ľubovoľne malou zmenou niektorej stavovej veličiny (tlaku, teploty, koncentrácie, elektrického napätia) môžeme kedykoľvek zmeniť na opačný.

Dej v sústave látok sme už v čl. 12.5 nazvali pozitívnym (pracovným), keď sa pri ňom produkuje energia vo forme mechanickej (alebo s ňou rovnocennej). Dejom negatívnym sme, naopak, nazvali dej, ktorý prebieha za spotreby takejto energie. Pozitívnym dejom je napríklad expanzia plynu, zatiaľ čo jeho kompresia je dej negatívny.

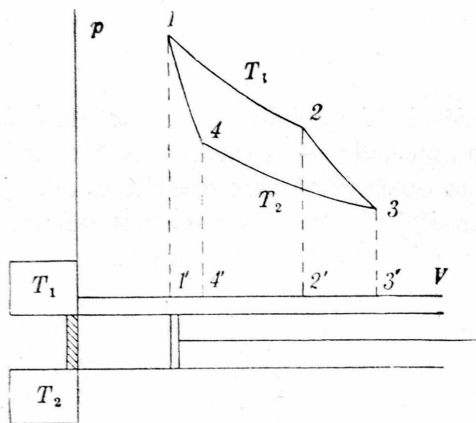
Keďže reverzibilný dej prebieha za ustavičnej rovnováhy síl systému a jeho okolia, je zrejmé, že pozitívny reverzibilný dej je spojený s uvoľnením najväčšieho množstva energie vo forme mechanickej alebo jej podobnej, a naopak negatívny reverzibilný dej na svoje uskutočnenie potrebuje najmenej energie tejto formy. Reverzibilné deje sa teda vyznačujú najväčšou pracovnou úsporou.

Pravda, dokonale reverzibilné deje sú len hraničné prípady konečnou rýchlosťou prebiehajúcich dejov *nereverzibilných*, a môžeme ich prakticky vykonávať len s väčším alebo menším priblížením. V skutočnosti všetky v prírode prebiehajúce deje sú viac alebo menej nereverzibilné (nevratné).

12.11. Carnotov kruhový dej. Keď stav látky alebo sústavy látok meníme tak, že stav konečný je totožný so stavom začiatočným, hovoríme, že sme vykonali s látkou kruhový dej. Môže prebiehať vratne aj nevratne. Význačný kruhový dej je *vratný kruhový dej* (cyklus) Carnotov, ktorý sa

skladá z dvoch dejov izotermických, prebiehajúcich pri teplotách T_1 a T_2 , a z dvoch dejov adiabatických.

Opíšeme Carnotov kruhový dej uskutočnený vratne s grammolekulou ideálneho plynu vo valci s pohyblivým piestom (obr. 12.11), pričom budeme predpokladať, že teplo prepúšťa len dno valca, zatiaľ čo jeho steny a piest sú zhotovené z dokonalých tepelných izolátorov. Jednotlivé časti Carnotovho cyklu nech sú:



Obr. 12.11

1. *Izotermická expanzia* plynu pri teplote T_1 (dno valca je v styku so stenou zásobníka tepla tejto teploty) z objemu V_1 na objem V_2 . Plyn vykoná v tejto časti vratne vedeného cyklu prácu danú plochou $1'-1-2-2'$,

$$A'_{12} = p_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

a pretože pri izotermickom deji vnútorná energia ideálneho plynu sa nemení, koná túto prácu tým, že súčasne od svojho okolia prijíma rovnako veľké množstvo tepla $Q_1 = A'_{12}$.

2. *Adiabatická expanzia* plynu z objemu V_2 na objem V_3 (dno valca je chránené doskou, ktorá neprepúšťa teplo). Keďže v tejto časti kruhového deja niet výmeny tepla s okolím, koná plyn objemovú prácu A'_{23} , danú plochou $2'-2-3-3'$, na účet svojej vnútornej energie. Táto práca je teda

$$A'_{23} = U_2 - U_3$$

a $Q = 0$. Teplota plynu súčasne klesne z hodnoty T_1 na T_2 .

3. *Izotermická kompresia* plynu pri teplote T_2 z objemu V_3 na objem V_4 (dno valca je v styku s chladičom teploty T_2), pričom objem V_4 je volený tak, aby nasledujúca adiabatická kompresia mohla previesť plyn do stavu začiatočného. Práca, ktorú vykoná plyn — teraz, pravda, záporná — je (plocha $3'-3-4-4'$)

$$A'_{34} = RT_2 \ln \frac{V_4}{V_3}$$

Plyn súčasne uvoľní teplo Q'_2 , ktoré sa rovná práci A_{34} vonkajšej sily, $Q'_2 = -A_{34} = -A'_{34} = RT_2 \ln \frac{V_3}{V_4} < A'_{12} = Q_1$.

4. *Adiabatická kompresia* plynu z objemu V_4 na pôvodný objem V_1 . Práca konaná plynom (plocha $A'-4-1-I'$) je

$$A'_{41} = U_4 - U_1$$

a $Q = 0$. Súčasne teplota plynu T_2 stúpne na začiatočnú hodnotu T_1 .

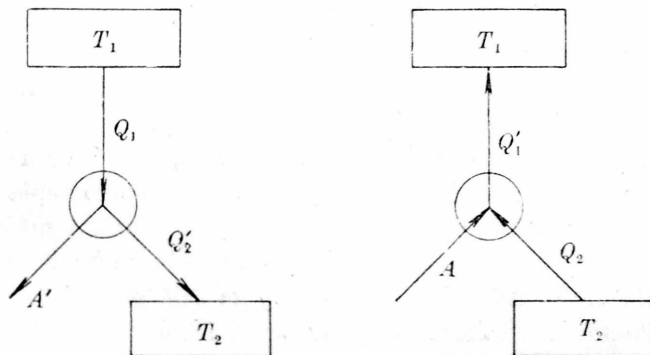
Pretože $U_2 = U_1$ a $U_4 = U_3$, je $A'_{23} + A'_{41} = 0$. Vcelku teda práca vykonaná plynom, daná plochou ohraničenou obidvoma izotermami a adiabaticami, je:

$$A' = A'_{12} + A'_{34} = RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} + RT_2 \ln \frac{V_4}{V_3}$$

a rovná sa rozdielu tepla Q_1 , ktoré plyn pri teplote T_1 prijal, a tepla Q'_2 , ktoré pri teplote T_2 odovzdal okoliu, $A' = Q_1 - Q'_2$, takže $Q_1 = A' + Q'_2$. Časť tepla Q_1 pri teplote T_1 prijatého sa zmenila na mechanickú energiu, druhá prešla do okolia s nižšou teplotou T_2 .

Kruhový dej vedený práve opísaným spôsobom bol *pozitívny*. Získala sa pri ňom mechanická energia A' rovnajúca sa rozdielu $Q_1 - Q'_2$. Jeho *účinnosť*, podiel získanej mechanickej energie A' a pri vyššej teplote prijatého tepla Q_1

$$\text{je } \eta = \frac{A'}{Q_1}.$$



Obr. 12.12

Keby sme chod jednotlivých dejov obrátili, práca plynom vcelku vykonaná bola by absolútne rovnako veľká, avšak záporná. Plyn by pri nižšej teplote T_2 prijal od svojho okolia teplo Q_2 rovnajúce sa predošlému teplu Q'_2 a svojmu okoliu pri vyššej teplote T_1 odovzdal teplo $Q'_1 > Q_2$. Takto vedený kruhový dej by bol *negatívny* a konaním rovnako veľkej práce A , aká sa v predošlom prípade získala, prešlo by na okolie teplo $Q'_1 - Q_2$, rovnajúce sa tejto práci,

$A = Q_1' - Q_2$, alebo $Q_1' = A + Q_2$. Činnosť pozitívne (vľavo) a negatívne (vpravo) vedeného tepelného stroja, v ktorom sa uskutočňuje Carnotov cyklus, je schematicky znázornená na obr. 12.12.

Výraz pre A' v podieli $\eta = \frac{A'}{Q_1}$ môžeme ešte upraviť. Podľa Boylovho a Poissonovho zákona pre jednotlivé štyri časti opísaného kruhového deja platia rovnice $p_1 V_1 = p_2 V_2$, $p_2 V_2' = p_3 V_3'$, $p_3 V_3 = p_4 V_4$ a $p_4 V_4' = p_1 V_1'$. Ich vynásobením a úpravou získanej rovnice vychádza $V_1 : V_2 = V_4 : V_3$. Preto

$A' = R(T_1 - T_2) \ln \frac{V_2}{V_1}$, a teda

$$\eta = \frac{A'}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2'}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (1)$$

kde T je teplota definovaná ideálnym plynom.

12.12. Druhá termodynamická veta. Podľa prvej vety termodynamickej pri všetkých premenách foriem energie jej celkové množstvo ostáva nezmenené. Táto veta však nič nehovorí o tom, či sa môžu jednotlivé formy energie premeniť úplne na iné, alebo či to nie je vždy možné. Touto otázkou sa zaoberá druhá veta termodynamická.

Zo skúsenosti vieme, že mechanická energia sa môže bez zvyšku použiť na ohrievanie telies, čím sa zväčšuje ich vnútorná energia. Napríklad na osi uložený a roztočený zotrvačnik trením ohrieva ložiská, ak nie sú naolejované. Presne obrátený pochod nie je však možný; zastavený zotrvačnik nemôžeme opäť roztočiť jednoducho tak, že by sme začali ohrievať jeho ložiská. Príčinou toho je, že vznik tepla trením je dej úplne nevratný.

Avšak aj pri vratne vedenom Carnotovom cykle, ktorým sme sa zaoberali v predošlom článku, len časť pri vyššej teplote prijatého tepla sa mení na mechanickú energiu; druhá časť sa musí odovzdať telesu s nižšou teplotou. Zaiste veľmi užitočný by bol stroj založený na vhodnom kruhovom deji (aby sa v ňom trvale nič nemenilo), v ktorom by sa celé prijaté teplo menilo na energiu mechanickú. Pri takom stroji by chladič bol zbytočný a na konanie práce potrebná mechanická energia by v ňom vznikala z tepla odoberaného z jediného zásobníka tepla. Pomocou takéhoto stroja by bolo možné získavať mechanickú energiu z nevyčerpatelných zásob tepla našej Zeme, takže by odpadla potreba pohonných látok, tzv. palív. Takýto stroj by v sebe dokonca spájal výhody pracovného aj chladiaceho stroja. Ostwald ho nazval *perpetuum mobile druhého druhu*. Pretože sa takýto stroj dosiaľ nikomu nepodarilo zostrojiť, oprávnene sa domnievame, že zásadne nie je to možné. Tento poznatok, t. j. nemožnosť perpetuum mobile druhého druhu je obsahom *druhej vety termodynamickej*, ktorú Planck formuloval takto: