$= \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_v$ pre molekulové teplá plynov za stáleho objemu dostávame podľa zložitosti ich molekúl $\frac{3}{2} R$, $\frac{5}{2} R$ a $3R$. Podľa Mayerovho vzťahu (12.7.4) je $C_p = C_v + R$. Podľa toho *Poissonove konštanty* jedno-, dvoj- a viacatómových plynov majú byť

$$\varkappa_1 = \frac{C_v + R}{C_v} = \frac{\frac{3}{2} R + R}{\frac{3}{2} R} = \frac{5}{3} = 1{,}67$$

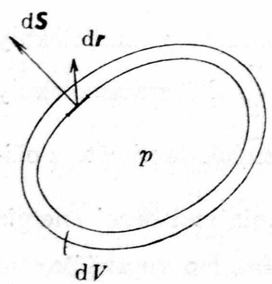
$$\varkappa_2 = \frac{\frac{5}{2} R + R}{\frac{5}{2} R} = 1{,}40 \quad \text{a} \quad \varkappa_3 = \frac{3R + R}{3R} = 1{,}33$$

Do akej miery skutočné plyny vyhovujú týmto vzťahom, vyplýva z *tabuľky 12.6*, v ktorej μ označuje molekulovú hmotnosť.

Tabuľka 12.6

Merné a molekulové teplá plynov

Plyn	μ	c_p	c_v	C_p	C_v	$\varkappa$	$C_p - C_v = R$
He	4,00	1,25	0,754	5,00	3,01	1,66	1,99
Ar	39,91	0,124	0,075	4,95	2,99	1,66	1,96
H_2	2,016	3,41	2,42	6,85	1,41	1,81	1,99
N_2	28,02	0,242	0,172	6,78	4,82	1,41	1,96
O_2	32,00	0,217	0,155	6,96	4,96	1,40	2,00
Cl_2	70,91	0,112	0,084	7,98	5,97	1,34	2,01
CO	28,00	0,243	0,172	6,81	4,82	1,41	1,99
CO_2	44,00	0,218	0,168	9,59	7,39	1,30	2,20
CH_4	16,03	0,593	0,449	9,51	7,20	1,32	2,31



Obr. 12.8

12.9. Práca pri izotermickej a adiabatickej expanzii plynu. Predstavme si, že nejaká vzduchová bublina, ktorá sa nachodí vo vode a stúpa k jej povrchu, zväčšuje svoj objem. Keď sa povrchový element bubliny dS *(obr. 12.8)* posunie o trať d$\boldsymbol{r}$, sila pôsobiaca na tento povrchový element, keď p je tlak vzduchu v bubline a $\boldsymbol{n}$ jednotkový vektor kolmý na povrch bubliny a orientovaný na vonkajšiu stranu, vykoná prácu $\mathrm{d}^2A' = p\,\mathrm{d}S\boldsymbol{n} \,.\, \mathrm{d}\boldsymbol{r} = p\,\mathrm{d}\boldsymbol{r} \,.\, \mathrm{d}\boldsymbol{S} = p\,\mathrm{d}^2V$.

Integráciou tohto výrazu po povrchu bubliny dostávame pre prácu, ktorú vykonal vzduch v bubline pri malom zväčšení jej objemu, vyjadrenie

$$\mathrm{d}A' = p \int \mathrm{d}^2 V = p\, \mathrm{d}V \tag{1}$$

Je zrejmé, že tento vzorec, ktorý sme na základe odvodenia pomocou pohybu piesta vo valci už niekoľko ráz použili, správne vyjadruje objemovú prácu pri zväčšovaní objemu akéhokoľvek telesa. Ďalšou integráciou výrazu $p\,\mathrm{d}V$ dostaneme prácu vykonanú telesom pri konečnom zväčšení jeho objemu.

Plyn môže zväčšovať svoj objem dvoma význačnými spôsobmi: 1. izotermicky a 2. adiabaticky.

Pri *izotermickej* expanzii ideálneho plynu, keďže jeho vnútorná energia závisí len od teploty, koná plyn prácu A' len premenou súčasne prijímaného tepla Q. Pri takejto expanzii je teda

$$A' = Q = \int_{V_1}^{V_2} p\,\mathrm{d}V = p_1 V_1 \int_{V_1}^{V_2} \frac{\mathrm{d}V}{V} = p_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = p_1 V_1 \ln \frac{p_1}{p_2} \tag{2}$$

pričom sme použili aj Boylov zákon, podľa ktorého je $pV = p_1 V_1 = p_2 V_2$.

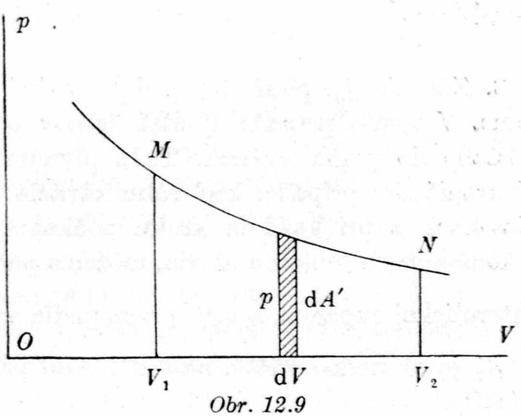
Pre prácu pri *adiabatickej* expanzii ideálneho plynu, ktorá sa — podľa vzťahu $\mathrm{d}Q = \mathrm{d}U + \mathrm{d}A' = 0$ — rovná úbytku $-\mathrm{d}U$ jeho vnútornej energie, použitím Poissonovej rovnice $pV^\varkappa = p_1 V_1^\varkappa = p_2 V_2^\varkappa$ vychodí:

$$A' = U_1 - U_2 = \int_{V_1}^{V_2} p\,\mathrm{d}V = p_1 V_1^\varkappa \int_{V_1}^{V_2} \frac{\mathrm{d}V}{V^\varkappa} = p_1 V_1^\varkappa \, \frac{V_2^{1-\varkappa} - V_1^{1-\varkappa}}{1-\varkappa} =$$

$$= \frac{1}{\varkappa - 1} (p_1 V_1 - p_2 V_2) \tag{3}$$

Poznámka: V technickej praxi sa tlak zvyčajne udáva v tzv. technických atmosférach, 1 at = kp/cm² a objem plynov v litroch. Práca počítaná podľa vzorcov (2) a (3) vychodí potom v technických literatmosférach, 1 litat = $10^{-3}\,\mathrm{m}^3 \,.\, \mathrm{kp}/10^{-4}\,\mathrm{m}^2$ = 10 kpm.

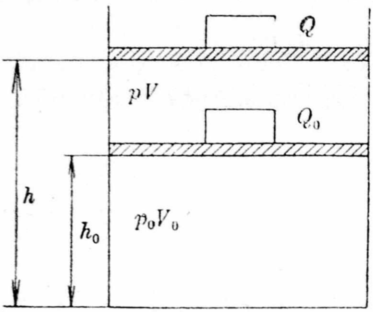
Predstavme si, že sa pri nejakej expanzii plynu jeho tlak zmenšoval spôsobom, ktorý vyjadruje čiara MN v tzv. *tlakovom diagrame plynu* na *obr. 12.9*.



Obr. 12.9

Elementárna práca plynu dA' pri malej zmene jeho objemu dV je $dA' = p\,dV$. Je teda správne znázornená úzkym, na obrázku vyšrafovaným pruhom nad úsečkou dV. Grafickým obrazom práce plynu pri zväčšení jeho objemu V_1 na hodnotu V_2 je preto zrejme plocha MV_1V_2N.

12.10. Vratné a nevratné deje. V čl. 12.5 sme nazvali tepelným strojom zariadenie, ktoré umožňuje vykonávanie práce len tým, že sa v jeho okolí teplota aspoň niektorých telies zmenšuje. Pre úplné pochopenie jeho funkcie oboznámime sa v tomto článku s pojmom *vratného (reverzibilného)* deja. Objasníme si obsah tohto pojmu najprv príkladom.



Obr. 12.10

Predstavme si valec s pohyblivým piestom, ktorý pri začiatočnom objeme V_0 obsahuje plyn pod tlakom p_0 *(obr. 12.10)*. Teplota plynu aj jeho okolia nech je T. Keď prierez piesta je q, plyn v objeme V_0 účinkuje na piest silou $P_0 = p_0 q$. Aby sa piest udržal vo svojej polohe, nech je zaťažený rovnako ťažkým závažím $Q_0 = P_0 = p_0 q$ (pre jednoduchosť predpokladáme, že tiaž samotného piesta je zanedbateľne malá). Začiatočný objem plynu V_0, pri ktorom je piest vo výške h_0 nad dnom valca, môžeme zväčšiť na objem V dvojakým spôsobom:

1. Nahradíme závažie Q_0 ľahším závažím $Q = P = pq = q\dfrac{p_0V_0}{V}$. V dôsledku zmenšenia vonkajšej sily plyn vydvihne piest, zaťažený len závažím $Q < Q_0$, do výšky h a vykoná prácu $A_1' = Q(h - h_0) = pq(h - h_0) = p(V - V_0) = \dfrac{p_0V_0}{V}(V - V_0) = p_0V_0\left(1 - \dfrac{V_0}{V}\right)$.

2. Závažie Q_0, použité v podobe veľmi tenkých lístkov, postupne zmenšujeme. V tomto prípade aj časť lístkov zodpovedajúcich rozdielu $Q_0 - Q$ sa dostane do polôh vyšších. Teda plynom vykonaná práca je teraz väčšia. V hraničnom prípade, keď váhu závažia zmenšujeme po nekonečne malých čiastkach a pri každom kroku počkáme, aby sa teplota plynu vyrovnala s konštantnou teplotou okolia, môžeme počítať prácu plynu ako prácu pri jeho intermickej expanzii, a táto práca podľa vzorca (12.9.2) je $A_2' = p_0V_0 \ln \dfrac{V}{V_0}$.

A_2' je skutočne väčšie ako A_1', lebo pri malom zväčšení objemu môžeme písať: