

Keďže pri používaní zriedených plynov je  $\frac{p - p_0}{p_0} = \frac{V - V_0}{V_0}$ , lebo je  $pV_0 = Vp_0$ , a keďže — okrem toho — koeficienty  $\gamma$  a  $\gamma'$  majú pri všetkých zriedených plynoch rovnakú a tú istú hodnotu, meranie teploty pomocou teplotnej rozťažnosti ktoréhokoľvek zriedeného plynu (vzorec 3) aj pomocou jeho teplotnej rozpínavosti (vzorec 4) vedie k rovnakému výsledku a teplota určená ktorýmkoľvek z týchto vzorcov sa volá Celziova plynová teplota.

Zo vzorcov (3) a (4) vyplýva aj to, že pri používaní Celziovej plynovej teploty závislosť objemu plynu od jeho teploty za konštantného tlaku je vyjadrená vzorcom

$$V = V_0(1 + \gamma t) \quad (5)$$

a závislosť jeho tlaku od teploty za konštantného objemu vzorcom

$$p = p_0(1 + \gamma t) \quad (6)$$

pričom  $\gamma$  je koeficient teplotnej rozťažnosti aj rozpínavosti zriedeného plynu.

Na rozdiel od Celziovej teploty ortuťovej Celziova teplota plynová splňuje aj druhú požiadavku kladenú na vyhovujúcu stupnicu teploty, t. j. že pri jej používaní fyzikálne vzťahy týkajúce sa tepelných javov majú jednoduchší tvar. V teoretických fyzikálnych úvahách sa preto pod Celziovou teplotou rozumie vždy Celziova teplota plynová.

Poznámka: V niektorých učebniciach sa rovnice (5) a (6) považujú za matematické vyjadrenia *Gay-Lussacovho* zákona, čo nie je celkom správne.

**10.3. Stavová rovnica zriedeného plynu.** Vzorce (5) a (6) z predošlého článku možno upraviť takto

$$\begin{aligned} V &= V_0(1 + \gamma t) = V_0 \left( 1 + \frac{t}{273,16 \text{ }^\circ\text{C}} \right) = V_0 \left( 1 + \frac{t}{T_0} \right) = \\ &= V_0 \frac{T_0 + t}{T_0} = V_0 \frac{T}{T_0} \end{aligned} \quad (1)$$

a podobne aj

$$p = p_0(1 + \gamma t) = p_0 \frac{T}{T_0} \quad (2)$$

keď sme položili  $T = T_0 + t = 273,16 \text{ }^\circ\text{C} + t$ , pričom  $t$  je *plynová teplota Celziova*. Veličina  $T = 273,16 \text{ }^\circ\text{C} + t$  sa nazýva *plynová teplota Kelvinova*, ktorá, ak bola určená pomocou ideálneho plynu, je totožná s tzv. *absolútnou teplotou*. Oboznámime sa s ňou v termodynamike. Jej jednotka je rovnako veľká ako  $1 \text{ }^\circ\text{C}$  a značí sa  $1 \text{ }^\circ\text{K}$ , takže  $T_0 = 273,16 \text{ }^\circ\text{K}$  je Kelvinova teplota zodpove-

dajúca teplotu  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  v Celziovej stupnici. Keďže  $1\text{ }^{\circ}\text{C} = 1\text{ }^{\circ}\text{K}$ , pre túto jednotku teploty používa sa aj skratka deg.

Zvolené množstvo zriedeného plynu v objeme  $V_0$  a pri Kelvinovej teplote  $T_0$ , nech je pod tlakom  $p_0$ . Keď napríklad v nezmenenom objeme zmeníme jeho teplotu na  $T$ , podľa vzorca (2) jeho tlak bude :

$$p^* = p_0 \frac{T}{T_0}$$

takže bude aj

$$p^*V_0 = p_0V_0 \frac{T}{T_0}$$

Keď dodatočne pri zmenenej už teplote  $T$  zmeníme aj objem plynu z  $V_0$  na  $V$ , výsledný tlak plynu bude určený Boyleovým zákonom  $pV = p^*V_0$ . Spojením posledných dvoch vzťahov dostávame rovnicu

$$pV = p^*V_0 = p_0V_0 \frac{T}{T_0}$$

alebo

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_0V_0}{T_0} \quad (3)$$

Keď zvolené množstvo plynu napríklad pri zvolenej teplote dáme do zvoleného objemu, bude tým tlak plynu v tomto objeme už úplne určený. Podobne keď pri zvolenej teplote objem zvoleného množstva plynu zmenšíme natoľko, aby tlak plynu bol  $p$ , množstvom plynu, jeho teplotou a tlakom úplne určený bude teraz objem plynu. Z týchto príkladov je zrejmé, že pri danom množstve plynu z troch premenných, stav plynu charakterizujúcich veličín  $p$ ,  $V$  a  $T$ , ktoré sa nachodia v rovnici (3), len dve možno voliť ľubovoľne. Ostávajúcu tretiu možno už vypočítať práve z tejto rovnice, ktorá sa preto nazýva aj *stavovou rovnicou* zriedeného plynu.

Pravda, skutočné plyny splňujú túto rovnicu len približne; odchýlkami sa budeme zaoberať neskoršie.

Konštanta  $p_0V_0/T_0$  v rovnici (3) závisí od množstva plynu, ktorému je úmerná. Podľa Avogadroho zákona grammolekuly\*) všetkých zriedených plynov pri rovnakej teplote a za rovnakého tlaku vyplňujú rovnaké objemy. Je preto výhodné vzťahovať túto konštantu pri všetkých plynch na 1 grammolekulu, lebo má potom pre všetky plyny rovnakú hodnotu. V tom prípade sa označuje pomocou písmena  $R$  a nazýva sa *plynová konštanta*. Jej hodnotu

\*) Grammolekula je toľko gramov chemickej zlúčeniny alebo prvku, z ktorých jednotiek pozostáva príslušná molekulová váha.

môžeme odvodiť napríklad z údajov platných pre kyslík ( $O_2 = 32$ ), ktorého merná hmotnosť pri  $0^\circ C$  a za tlaku 760 torrov je  $s_0 = 0,001\,429\text{ g/cm}^3$ . Grammolekula kyslíka a podľa Avogadrovho zákona aj ktoréhokoľvek iného plynu pri  $0^\circ C$  a za tlaku 760 torrov má teda objem, tzv. *molekulový objem*,

$$V_0 = \frac{32\text{ g}}{0,001\,429\text{ g}}\text{ cm}^3 = 22\,415\text{ cm}^3 = 22,415\text{ l}$$

Pomocou tohto výsledku pre plynovú konštantu dostávame:

$$R = \frac{p_0 V_0}{T_0} = 8,314\text{ joule deg}^{-1}$$

Teplo — ako už vieme — je však len názov pre energiu prechádzajúcu z telesa na teleso, keď sa ich teploty vyrovnávajú. Jednotku energie 1 joule môžeme preto vyjadriť aj pomocou tepelných jednotiek energie. Keďže jednotka tepelnej energie, teplo potrebné na ohriatie 1 g vody zo  $14,5^\circ C$  na  $15,5^\circ C$ , je 1 cal = 4,186 joule (pozri čl. 12.3), je  $1\text{ joule} = \frac{1}{4,186}\text{ cal}$ . Použitím tohto

vzťahu dostávame pre plynovú konštantu — najmä pre termodynamické výpočty — výhodné vyjadrenie

$$R = 8,314\text{ joule deg}^{-1} = \frac{8,314}{4,186}\frac{\text{cal}}{\text{deg}} \doteq 1,986\frac{\text{cal}}{\text{deg}} \doteq 2\frac{\text{cal}}{\text{deg}}$$

Pri použití plynovej konštanty  $R$  stavovú rovnicu 1 grammolekuly zriedeného plynu môžeme písať v tvare

$$pV = RT \quad (4)$$

a stavovú rovnicu  $n$  grammolekúl plynu v tvare

$$pV = nRT \quad (5)$$

Rovnica (5) sa nazýva aj spojeným *zákonom Boyle—Gay-Lussacovým*.

Ak hmotnosť nejakého množstva chemicky čistého plynu je  $m$  a jeho molekulová hmotnosť  $\mu$  (číslo vyjadrujúce, koľkokrát je hmotnosť molekuly zlúčeniny alebo prvku väčšia ako  $1/12$  hmotnosti atómu uhlíka  $C_6^{12}$ ), takže grammolekula tohto plynu je  $M = \mu\text{g}$ , potom zrejme platí:  $n = m/M$ . Rovnicu (5) môžeme teda písať aj takto:

$$pV = \frac{m}{M} RT \quad (6)$$

**Príklad 1.** Ako príklad na použitie stavovej rovnice odvodíme závislosť mernej hmotnosti plynu  $s = m/V$  od jeho teploty a tlaku. Ak objem plynu  $V$  vyjadríme zo stavovej rovnice

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_0 V_0}{T_0}$$

dostávame:

$$s = \frac{m}{V} = m \frac{p T_0}{p_0 V_0 T} = s_0 \frac{p T_0}{p_0 T} = s_0 \frac{p}{p_0} \frac{1}{1 + \frac{t}{T_0}} = s_0 \frac{p}{p_0(1 + \gamma t)} \quad (7)$$

**Úloha 1.** Plyn má pri teplote  $t = 25^\circ\text{C}$  a za tlaku  $p = 726$  torrov objem  $V = 32\text{ cm}^3$ . Aký veľký by bol objem tohto plynu  $V_0$  za normálnych podmienok?

Riešenie: Zo stavovej rovnice vyplýva, že hľadaný objem je

$$V_0 = \frac{pV}{T} \frac{T_0}{p_0} = \frac{726 \cdot 32\text{ cm}^3 \cdot 273,2}{298,2 \cdot 760} = 28,0\text{ cm}^3$$

**10.4. Brownov pohyb.** Roku 1827 zistil anglický botanik Brown, že peľové zrnká prítomné vo vode, ktorú pozoroval mikroskopom, nie sú v pokoji, ale v ustavičnom trhavom pohybe, ktorého smer sa celkom nepravidelne mení. Okrem toho zistil, že pozorovaný pohyb je tým živší, čím sú zrnká menšie. Brown sa pôvodne domnieval, že tento pohyb je prejavom života, t. j. že je pôvodu biologického. Ukázalo sa však, že *Brownov pohyb* možno pozorovať na všetkých čiastočkách podobnej veľkosti, ktoré sa vznášajú v nejakej kvapaline, ako aj na čiastočkách prachu vo vzduchu. Okrem toho sa zistilo, že rýchlosť Brownovho pohybu sa zväčšuje s teplotou. Mnoho rôznych dohadov o príčinách Brownovho pohybu muselo nakoniec ustúpiť výkladu založenému na tzv. tepelnom pohybe molekúl. Nielen Brownov pohyb, ale aj mnohé iné — priame aj nepriame — pozorovania nás presvedčujú o tom, že molekuly a atómy látok všetkých skupenstiev sú pri každej teplote v ustavičnom pohybe, ktorý je tým intenzívnejší, čím je teplota látky vyššia. Pri tomto pohybe, ktorý sa nazýva *tepelný pohyb*, molekuly alebo atómy pevných látok kmitajú okolo svojich stálych rovnovážnych polôh. Molekuly kvapalín kmitajú tiež okolo svojich rovnovážnych polôh, avšak tieto sa pomerne dosť často menia, takže každá jednotlivá molekula kvapaliny sa okrem toho, že koná kmitavý pohyb, ešte aj preplietá medzi ostatnými molekulami kvapaliny. Pohyb molekúl kvapalín predstavuje prechod medzi pohybom molekúl a atómov pevných látok a pohybom molekúl plynu. Zatiaľ čo molekuly pevných látok kmitajú okolo svojich stálych rovnovážnych polôh a molekuly kvapalín okolo rovno-