

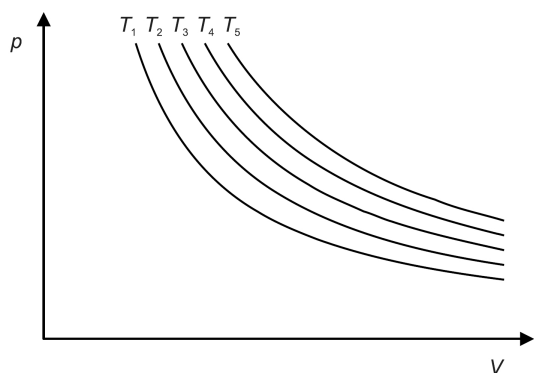
VZTAH TLAKU A OBJEMU PLYNU PŘI KONSTANTNÍ TEPLOTĚ

Obecná část

Máme-li n molů plynu, pak v termodynamické rovnováze (stejný tlak a teplota v celém objemu) můžeme jeho stav kompletně popsat pomocí tlaku p , objemu V a termodynamické teploty T . Vztah mezi těmito veličinami je dán stavovou rovnicí plynů pro ideální plyn:

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

kde $R = 8,314 \text{ J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ je univerzální plynová konstanta. Ideální plyn má vlastní objem molekul zanedbatelný vzhledem k objemu nádoby a přitažlivé (Van der Waalsovy) síly mezi molekulami lze zanedbat vzhledem k jejich kinetické energii.



Obr. 1 Izotermický děj pro různé teploty

Experimentálně je zjištěno, že reálné plyny při nízkých hustotách a vyšších teplotách tuto stavovou rovnici dobře splňují. Pokud některou z veličin p , V , T budeme udržovat konstantní, pak zbylé dvě budou vzájemně závislé. Při konstantní teplotě např. dostaneme:

$$pV = konst, \quad (2)$$

což je známý Boyleův-Mariottův zákon (Boyle 1662, Mariott 1676). Závislost tlaku na objemu můžeme zobrazit v p - V diagramu (obr. 1).

Zákon můžeme experimentálně ověřit pomocí tzv. plynového teploměru. Ten je tvořen skleněnou kapilárou, která je na dolním konci zatavena. Pomocí rtuťové zátky uzavřeme v kapiláře určité množství plynu. Rtuť je dostatečně viskózní a pohybuje se v kapiláře prakticky bez tření. Ruční vývěvou pak můžeme vytvořit na horní straně zátky tlak $p_0 + \Delta p$, kde p_0 je atmosférický tlak a Δp je podtlak vytvořený vývěvou (se záporným znaménkem). Samotná rtuť působí tlakem:

$$p_{\text{Hg}} = h_{\text{Hg}} \rho_{\text{Hg}} g, \quad (3)$$

kde h_{Hg} je výška zátky, $\rho_{\text{Hg}} = 13,6 \text{ g/cm}^3$ je hustota rtuti a $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ je gravitační zrychlení. Celkový tlak na plyn pod zátkou tak bude:

$$p = p_0 + \Delta p + p_{\text{Hg}}. \quad (4)$$

Objem V můžeme vypočítat z výšky sloupce plynu pod zátkou h a průměru kapiláry $d = 2,7 \text{ mm}$:

$$V = \frac{\pi d^2}{4} h. \quad (5)$$

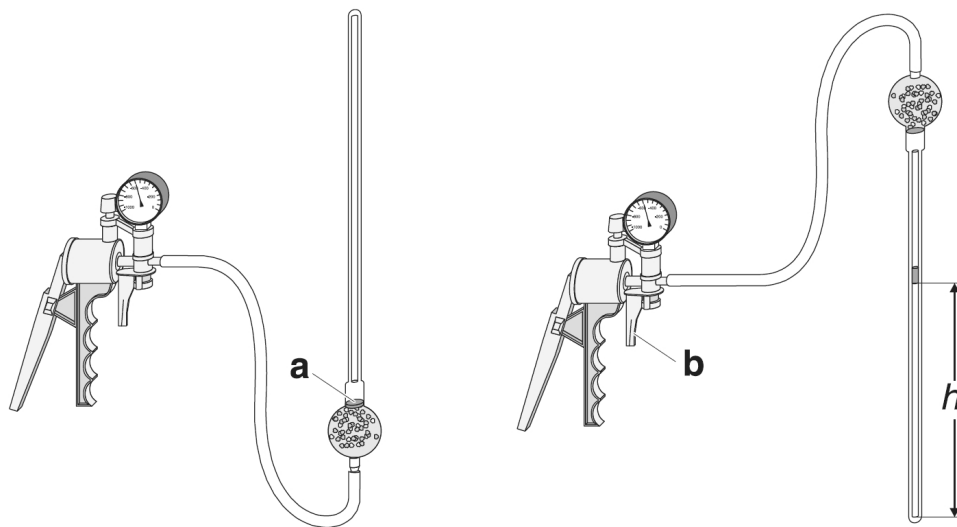
Příprava měření

Bezpečnostní upozornění: Plynový teploměr je skleněný a obsahuje rtuť.

Zacházejte s ním opatrně!

Čerpání prostoru nad zátkou se provádí ruční vývěvou. Šroub zavzdušňovacího ventilu je umístěn v přední části vývěvy. Je-li plně zašroubován, je ventil spolehlivě uzavřen a lze čerpat. Je-li vyšroubován a raménko se dotýká tělesa vývěvy, je plně otevřen a hadička je spojena s okolní atmosférou.

Pokud nedojde díky nesprávné manipulaci ke změně objemu uzavřeného plynu, nebo k roztržení rtuťového sloupce, není nutno tuto přípravnou proceduru



Obr. 2 Plynový teploměr – příprava k provozu

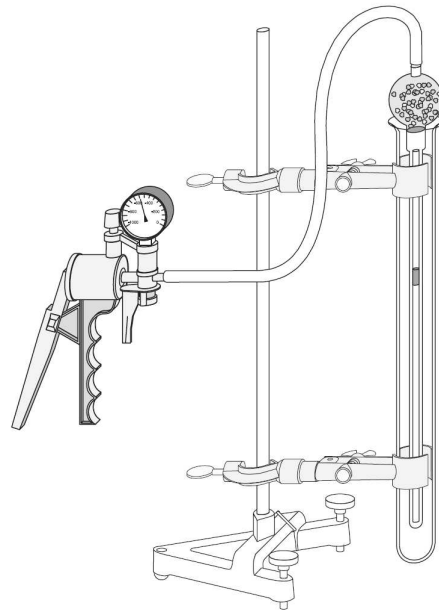
provádět. V opačném případě provádějte přípravu ve spolupráci s vyučujícím:

- otočte a držte teploměr baňkou dolů (obr. 2 vlevo)
- ruční vývěvou vytvořte maximální dosažitelný podtlak Δp (asi -850 hPa) a shromážděte rtuť v rozšířeném místě (a) při vstupu do kapiláry
- pokud v kapiláře stále zůstává rtuť, lehkým poklepáním se ji pokuste rozdělit do kuliček a setřást do místa (a).
- pomalu otočte teploměr baňkou nahoru, až rtuť nateče do kapiláry
- umístěte teploměr do stojanu a zafixujte hadičku do svěrky
- snižte pomalu podtlak Δp na nulu. Zavzdušnění musí probíhat velmi pomalu, zátka nesmí prudce “spadnout”, jinak se roztrhne na části. Šroub (b) je třeba otáčet velmi zvolna proti směru hodinových ručiček. Jakmile začne zátka klesat, ihned vraťte šroub o $\frac{1}{4}$ otáčky zpět. Pak lze opatrně pokračovat až na atmosférický tlak.
- dojde-li k roztržení rtuťové zátky, je třeba celý výše uvedený postup zopakovat

Měření

Zjistěte atmosférický tlak na zapisovacím barometru (závisí na počasí) a teplotu v místnosti. Změřte výšku rtuťové zátky pomocí stupnice teploměru. Pak postupně

generujete podtlak Δp a zaznamenávejte výšku h vzduchového sloupce pod zátkou. Zaměřujte spodní ostrou hranu válcové zátky. K dispozici je lupa. Po čerpání je třeba vždy vyčkat, než se tlak ustálí (a pohyb zátky zastaví). Při prudkém snižování tlaku totiž dochází k rychlé adiabatické expanzi plynu v systému nad zátkou (hadička + baňka), což vede ke snížení teploty a chvíli trvá, než se plyn opět ohřeje od okolí. Při tomto ohřívání pak jeho tlak mírně stoupá. Rovněž se může v systému vypařovat zkondenzovaná voda. Je-li třeba, můžete se s tlakem vrátit velmi opatrným použitím zavzdušňovacího ventilu (viz *Příprava měření*).



Obr. 3 Plynový teploměr při měření

Pracovní úkol

- 1) Proměřte závislost výšky h vzduchového sloupce uzavřeného pod zátkou na podtlaku Δp . Měřte v rozsahu 0 až -480 hPa s krokem 40 hPa, pak do -780 hPa s krokem 20 hPa a dále do -820 hPa s krokem 10 hPa. Naměřené hodnoty uveďte do vhodné tabulky. Dále změřte atmosférický tlak, výšku rtuťové zátky a teplotu v místnosti.
- 2) Stanovte přístrojové chyby měření výšky, podtlaku a atmosférického tlaku.
- 3) Sestrojte (doma) p - V diagram. Použijte na osy vhodné fyzikální jednotky¹⁾.
- 4) Naměřenými hodnotami proložte správnou křivku²⁾ (použijte Excel – spojnice trendu, Calc, Matlab, apod). Z konstanty získané tímto fitováním určete počet molů plynu (tj. vzduchu) pod rtuťovou zátkou.
- 5) Vypočítejte z naměřených dat součiny tlaku a objemu, z nich aritmetický průměr a statistickou chybu. Výsledek porovnejte s konstantou získanou fitováním.
- 6) Spočítejte chybu jednoho vybraného součinu tlaku a objemu (ze středu grafu). Započítejte chyby všech vstupních veličin (výška, průměr kapiláry, podtlak, atmosférický tlak, tlak sloupce rtuťové zátky), jsou-li významné³⁾.

Poznámky:

¹⁾ Zde jsou vhodné např. hPa (hektopascal) a cm^3 . Manometr u vývěvy je cejchován v hPa.

²⁾ V tomto případě se jedná o hyperbolu. Např. v Excelu je nutno zvolit typ trendu *Mocninný* a nechat zobrazit rovnici v grafu.

³⁾ Za nevýznamné můžeme označit ty chyby, jejichž celkový příspěvek ovlivní výslednou chybu o méně než 5 %.