

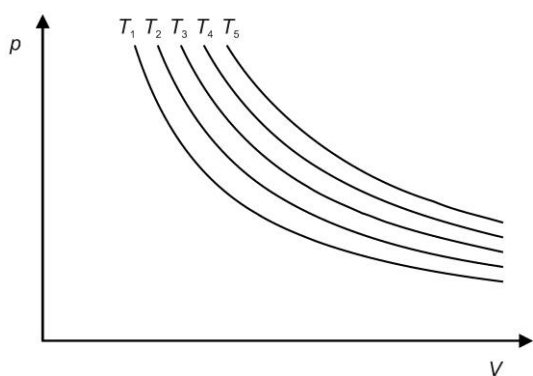
VZTAH TLAKU A OBJEMU PLYNU PŘI KONSTANTNÍ TEPLITĚ

Obecná část

Máme-li n molů ideálního 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 ideálního plynu:

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

kde $R = 8,314 \text{ J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ je univerzální plynová konstanta. Ideální plyn je fyzikální model plynu, kde vlastní objem molekul je nulový a nejsou mezi nimi žádné přitažlivé (Van der Waalsovy) síly. Experimentálně je zjištěno, že reálné



Obr. 1 Izotermický děj pro různé teploty

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:

$$pV = \text{konst}, \quad (2)$$

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 $d = 2,7 \text{ mm}$:

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

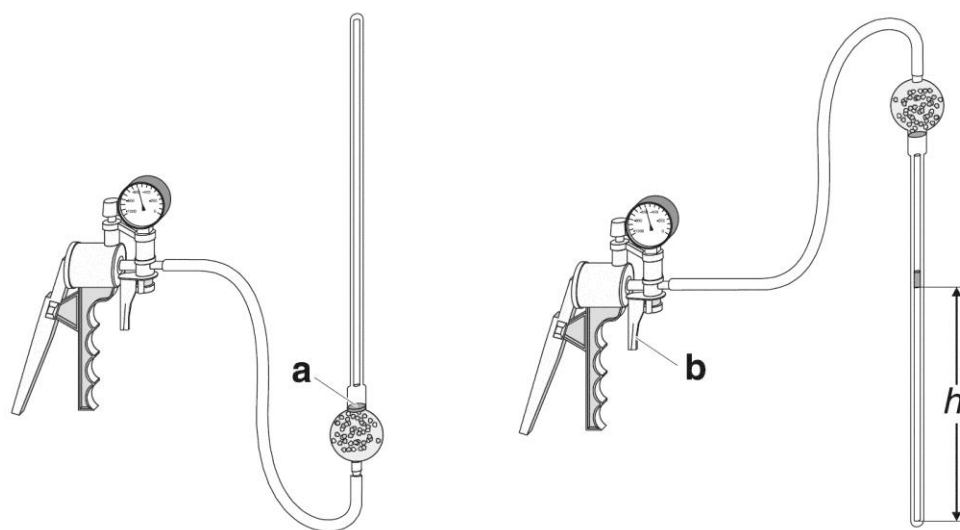
Příprava měření

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

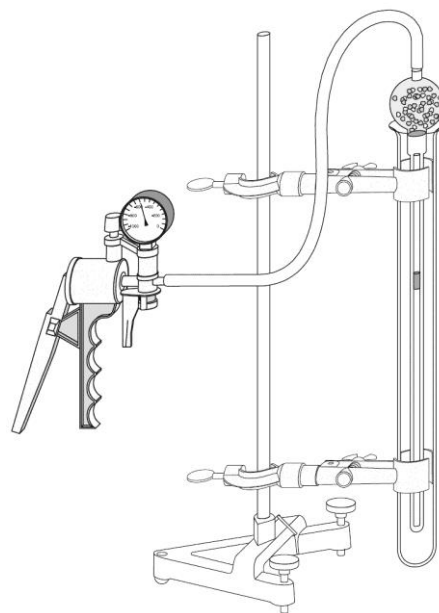
provádět. V opačném případě provádějte přípravu ve spolupráci s vyučujícím:

- 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 poklepáváním 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 (již doma) p - V diagram. Použijte na osy vhodné fyzikální jednotky¹⁾.
- 4) Do dalšího grafu vyneste tlak v závislosti na veličině $1/V$. Naměřenými hodnotami pak proložte správnou funkci²⁾ (použijte Excel – spojnicí trendu, Calc, Matlab, apod). Z parametru získaného fitování určete počet molů plynu (tj. vzduchu) pod rtuťovou zátkou.
- 5) Vyberte si jeden řádek tabulky a vypočítejte součin tlaku a objemu.
- 6) Spočítejte chybu tohoto součinu pomocí věty o přenosu chyby (str. 17 a 18 skript). Započítejte chyby všech vstupních veličin (výška, průměr kapiláry, podtlak, atmosférický tlak). Chybu tlaku od rtuťové zátky můžete zanedbat, protože vzhledem k ostatním vychází malá.

Poznámky:

¹⁾ Zde jsou vhodné např. hPa (hektopascal) a cm^3 . Manometr u vývěvy je cejkován v hPa. U dalšího úkolu, kde se fituje funkce, je lepší použít základní jednotky.

²⁾ Ze stavové rovnice plynu je zřejmé, že to má být přímka **procházející počátkem**. V Excelu je proto nutno volit "**Hodnota Y=0**".