



Hustota plynů – jak ji změřit?

Petr Sládek, Lukáš Pawera
PdF MU

Veletrhu nápadů učitelů fyziky 19,
Cheb, 29.8 - 31. 8. 2014

Úvodem



- Kolik váží „chebský“ vzduch?
- A co jeho hustota?



$$\rho = \frac{m}{V}$$

- Zdánlivě jednoduchá úloha – zavřeme ho do krabice a šup s ním na váhu, pak stačí metrem změřit rozměry krabice

➤ A co na to pan Archimédés?

- Žákům se může zdát, že plynné látky mají zanedbatelnou hmotnost. Prostředí kolem nás je obklopeno vzduchem, a že na všechny tělesa působí kromě tíhy i vztlaková síla se často již opomíjí.
- V některých případech může sehrát hustota plynů důležitou roli, hlavně ve srovnání s hustotou vzduchu. Tuto skutečnost si žáci uvědomují snad u balónek a balónů.



Škola



- Ve školní praxi se téměř vždy stanovuje hustota pevných látek a kapalin, nicméně měření hustoty plynů bývá mlčky opomíjeno.
- Je to způsobeno jednak absolutní hodnotou hustoty plynů, kdy nemůžeme zanedbat vztakovou sílu, jednak závislostí objemu a zejména tlaku ve stavové rovnici.
- Pro plyny se hustota může měnit v širokém rozmezí, protože částice se mohou volně přibližovat a vzdalovat, což je dáno tlakem a objemem.

Teoretické východisko



- Nezbývá, než si na pomoc vzít další vztah pro plyny, ve kterém se vyskytuje hustota. Tím nejjednodušším je stavová rovnice.
- Vezmeme-li stavovou rovnici ve tvaru

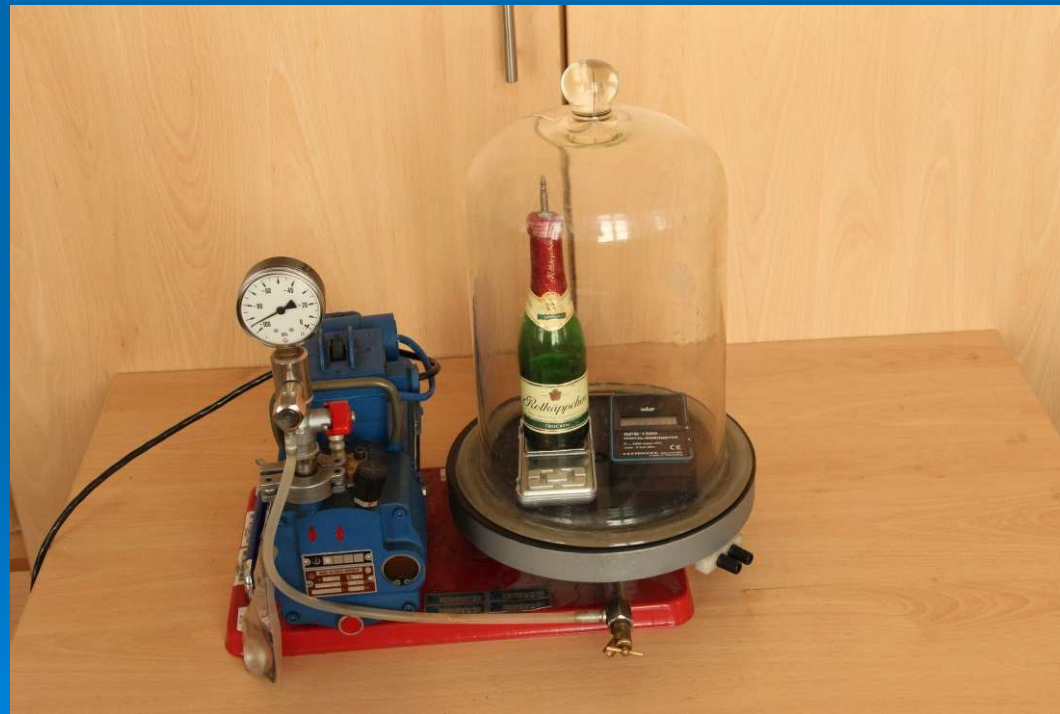
$$pV = \frac{m}{M_m} R_m T$$

- kde R_m je molární plynová konstanta, M_m molární hmotnost, pak vedle hmotnosti, objemu, je potřeba stanovit další fyzikální veličiny – **tlak, teplotu**. To za předpokladu, že známe molární hmotnost plynu.

Vakuum (nízký tlak) vně nádoby



- Uzavřená láhev s plynem je vložena do recipientu, ze kterého je postupně čerpán vzduch (pomocí rotační vývěvy, vodní vývěvy, vakuové pumpy).



Vakuum (nízký tlak) vně nádoby



Hmotnost láhve získáme z měření na vahách

$$M_L = m_L - (V_{EXT} - V_{INT}) \cdot \rho_0$$

M_L - údaj na váze při otevřeném uzávěru, m_L - skutečná hodnota

$$m_L = M_L + (V_{EXT} - V_{INT}) \cdot \rho_0$$

V_{INT} - objem uvnitř nádoby, V_{EXT} - objem vnějšího pláště uzavřené nádoby

Hmotnost láhve s uzavřeným vzduchem (plynem) uvnitř

$$m_{L+P} = m_L + m_p = M_L + (V_{EXT} - V_{INT}) \rho_0 + m_p \quad m_p = \rho_0 \cdot V_{INT}$$

m_p - hmotnost plynu v nádobě, ρ_0 - hustota vzduchu při atmosférickém tlaku

Hodnota na displeji váhy, resp. v režimu tára

$$M_{L+P} = m_L + m_p - V_{ext} \cdot \rho_{REC} \quad M_{L+P} - M_L = m_p + (V_{EXT} - V_{INT}) \rho_0 - V_{EXT} \cdot \rho_{REC}$$

Pro prostředí v recipientu platí

$$p_{REC} \cdot V_{REC} = \frac{m_{REC}}{M_{REC}} \cdot T \quad \rho_{REC} = \frac{m_{REC}}{V_{REC}} = p_{REC} \cdot \frac{M_{REC}}{T}$$

Dosazením do předchozího vztahu dostaneme

$$M_{L+P} - M_L = m_p + (V_{EXT} - V_{INT}) \cdot \rho_0 - V_{EXT} \cdot p_{EXT} \cdot \frac{M_{REC}}{T}$$

$$M_{L+P} - M_L = \rho_0 \cdot V_{INT} + \rho_0 \cdot V_{EXT} - \rho_0 V_{INT} - V_{EXT} \cdot p_{EXT} \cdot \frac{M_{REC}}{T}$$

Po úpravě

$$\frac{M_{L+P} - M_L}{V_{EXT}} = \rho_0 - p_{EXT} \cdot \frac{M_{REC}}{T}$$

- [1] Výhodou měření je, pokud místo změření ve dvou bodech $[M1;p1]$ a $[M2;p2]$, proměříme více bodů a provedeme proložení, v tomto případě přímkou
- [2]

$$\Delta M \cdot \frac{1}{V_{EXT}} = -\Delta p_{REC} \cdot \frac{M_{REC}}{T}$$

[3]

- resp.

$$\frac{\Delta M}{\Delta p_{REC}} = -\frac{M_{REC}}{T} \cdot V_{EXT}$$

[5]

Vakuum (nízký tlak) vně nádoby



- Pak směrnice nám umožní vyjádřit neznámé parametry plynu v rovnici [3]

$$\rho_{REC} = p_{REC} \cdot \frac{\Delta M_{REC}}{\Delta p_{REC}} \cdot \frac{1}{V_{EXT}}$$

- Hustota plynu, kterou tímto způsobem zjistíme, je hustota plynu v okolí tělesa v recipientu (v láhvi může být jakýkoliv obsah). Můžeme dosadit i atmosférický tlak.
- Objem nádoby můžeme stanovit z vážení vytlačené vody při ponoření láhve do nádoby s vodou. (Pozor rysky na odměrných válcích mohou být zatíženy chybou až 15%).

Veletrhu nápadů učitelů fyziky 19,
Cheb, 29.8 - 31. 8. 2014

<#>

Vakuum (nízký tlak) uvnitř nádoby



- Z uzavřené láhve s vakuometrem je postupně čerpán vzduch (pomocí rotační vývěvy, vodní vývěvy, vakuové pumpy). To můžeme obejít buď vytvořením vakua kolem nádoby s plynem (vakuum vně) nebo vyčerpáním plynu z nádoby (vakuum uvnitř).



Vakuum (nízký tlak) uvnitř nádoby



Tíha láhve s plynem uvnitř a působící vztlaková síla

$$G = m_{L+P} \cdot g \quad F_{VZ} = \rho_0 \cdot V_{EXT} \cdot g$$

Pak naměřená hodnota hmotnosti uzavřené láhve s plynem na vzduchu

$$M_{L+P} = m_{L+P} - \rho_0 \cdot V_{EXT}$$

Stavová rovnice uvnitř láhve při dvou tlacích p_1 , resp. p_2 a po odečtení rovnic:

$$p_1 V_{INT} = \frac{m_1}{M_m} RT \quad p_2 V_{INT} = \frac{m_2}{M_m} RT \quad \frac{\Delta m}{\Delta p} = \frac{M_m}{RT} \cdot V_{INT}$$

Vyneseme do grafu a směrnice nám umožní vyjádřit neznámé parametry plynu

Pro hustotu v láhvi $\rho_p = \frac{m_p}{V_{INT}}$, po dosazení z [10]

Jedná se o obdobný vztah,
jako v předchozím případě,
avšak tentokrát je měřena
hustota obsahu láhve.

$$\rho_P = p_p \cdot \frac{M_m}{RT} = p_p \cdot \frac{\Delta m}{\Delta p} \cdot \frac{1}{V_{INT}}$$

Vakuum (nízký tlak) uvnitř nádoby



Tento případ je méně náročný na provedení experimentu. Máme-li vhodnou transparentní vakuovou nádobu na uchovávání potravin, dostatečné vakuum vytvoříme i pomocí vakuové pumpy.

Veletrhu nápadů učitelů fyziky 19,
Cheb, 29.8 - 31. 8. 2014

<#>

Přetlak (vysoký tlak) uvnitř nádoby

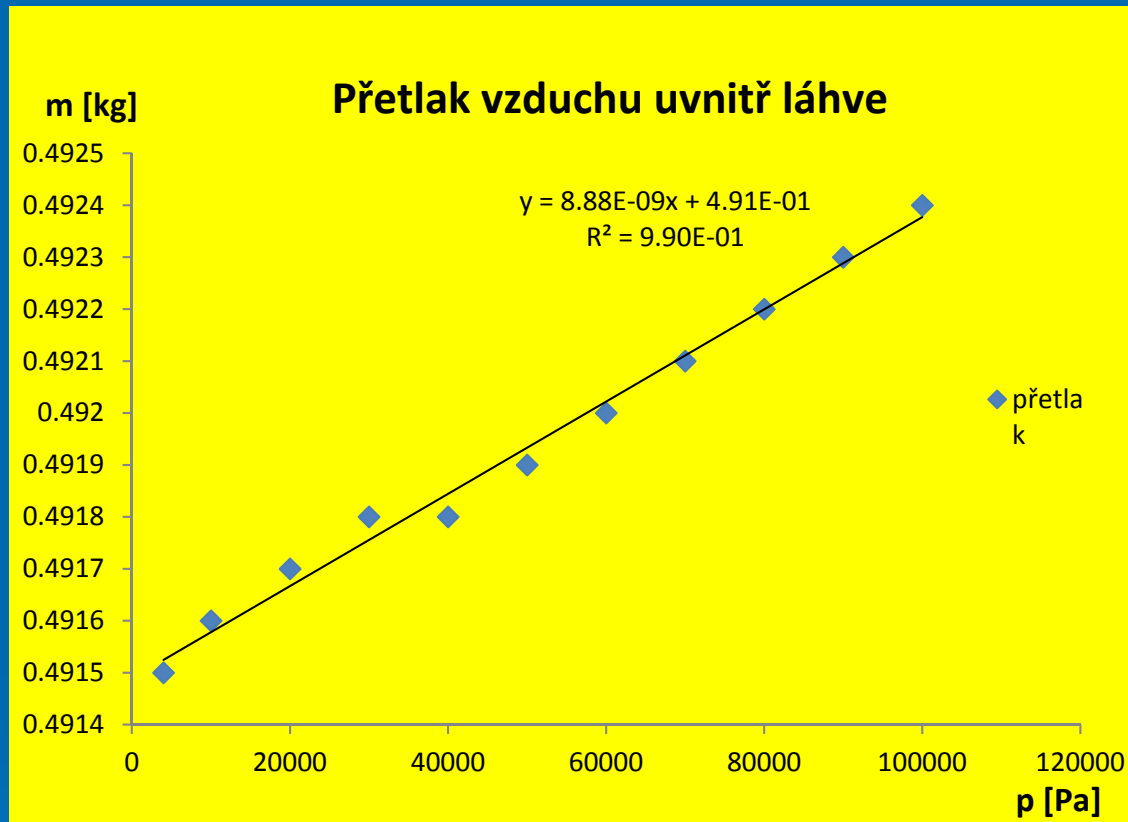


- Tato situace je obdobná jako v předchozím případě. Uzavřená láhev s manometrem je postupně tlakována vzduchem (pomocí kompresoru nebo hustilky). Výsledný vztah pro výpočet hustoty vzduchu má tvar jako vztah při čerpání obsahu láhve.

$$\rho_P = p_p \cdot \frac{M_m}{RT} = p_P \cdot \frac{\Delta m}{\Delta p} \cdot \frac{1}{V_{INT}}$$



Přetlak (vysoký tlak) uvnitř nádoby



$$\rho_P = 1,09 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

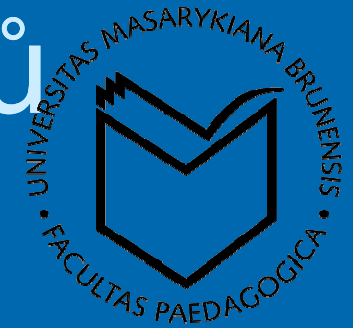
Odhadujeme, že při měření se dopoušíme nejistoty měření do 5%. Na rozdíl od případu b), byla teplota stlačovaného vzduchu zřejmě vyšší než teplota okolí, proto je získaná hodnota hustoty menší. Pro eventuální přepočítání na standardizovanou tabelovanou hodnotu 0°C použijeme stavovou rovnici.

Veletrhu nápadů učitelů fyziky 19, Cheb, 29.8 -

31. 8. 2014

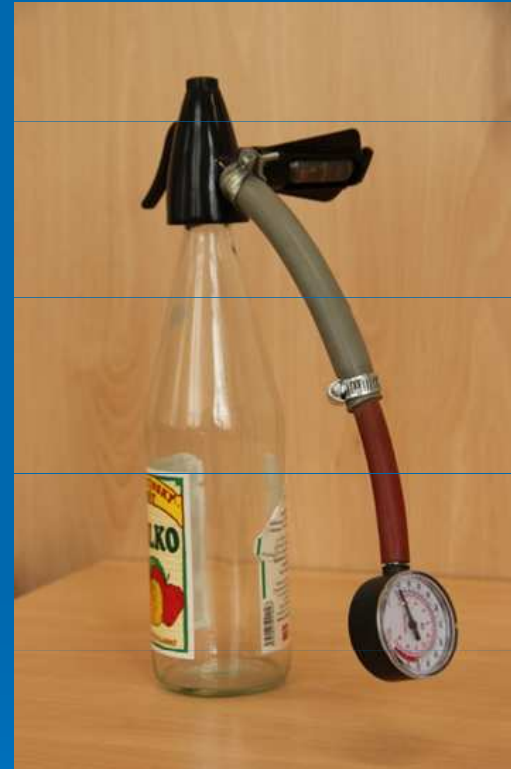
Určování hustoty plynů

CO₂ a N₂O

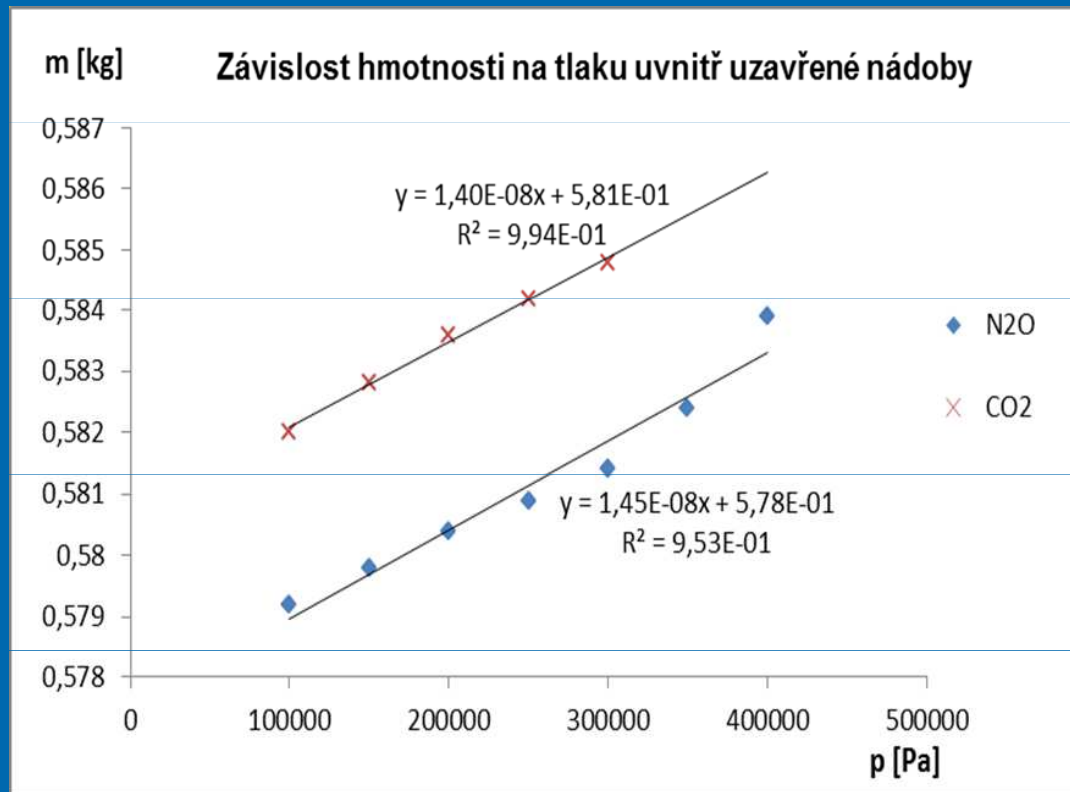


- Kritérium výběru těchto 2 plynů vychází ze snadné dostupnosti, protože mají využití v domácnosti. Jsou dostupné v malých bombičkách, ve kterých jsou uchovávány v tekutém stavu.
- Jako nádoba pro měření se použije láhev na výrobu sifonu (pokud není kovová, můžeme použít skleněnou, nejlépe se závitem – od šampaňského, jinak bychom byli nuceni měřit objem a modifikovat vztahy pro výpočet), která se předem vyčerpá.
- Lze použít oba případy, kdy je tlak v láhvi vyšší než atmosférický, nebo můžeme plyn čerpat a dosáhnout nižšího tlaku.

Určování hustoty plynů CO_2 a N_2O



Určování hustoty plynů CO₂ a N₂O



Pro hodnoty $p_0 = 101325 \text{ Pa}$; $V_{INT} = 7,76 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$; teplotu v místnosti 26°C dostáváme

pro hustotu CO₂ $\rho_{CO_2} = 1,83 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ po přepočítání na 0°C $\rho_{0 \text{ CO}_2} = 2,00 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

pro hustotu N₂O $\rho_{N_2O} = 1,89 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ po přepočítání na 0°C $\rho_{0 \text{ N}_2\text{O}} = 2,07 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Hodnoty hustoty plynů bývají tabelovány pro 0°C . Pro CO₂ pro 0°C a tlak $101,325 \text{ kPa}$ je tabelovaná hodnota hustoty CO₂ $1,9769 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a hustoty N₂O $1,9778 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Předpokládaná teplota plynů v láhvi po ustálení teploty je 26°C , proto je hodnota pro dané podmínky nižší.

Závěr

- V příspěvku jsme ukázali tři cesty, jak je možné naměřit hustotu vzduchu s poměrně velkou přesností v podmínkách školy.
- Při měření je potřeba dbát na dostatečně pomalé připouštění vzduchu do vakua a současně je nezbytné vyčkat na dostatečnou teplotu plynu v láhvi či recipientu.

Závěr

- Láhev musí být dostatečně tuhá, jak pro přetlak tak i podtlak, v opačném případě musíme do výpočtu zahrnout změny objemu, které měření a vyhodnocení zkomplikují.
- Experiment ukazuje na výhodnost využití proložení naměřených bodů přímkou a stanovení směrnice. Tento postup ukazuje žákům posun vyhodnocení experimentu na vyšší vědeckovýzkumnou úroveň.



Děkuji za pozornost

doc. RNDr. Petr Sládek, CSc.

Katedra fyziky, chemie a odborného vzdělávání PdF MU

Poříčí 7, 603 00 Brno, ČR

E-mail: sladek@ped.muni.cz

Telefon: + 420 549 496 841

Mgr. Lukáš Pawera

Katedra fyziky, chemie a odborného vzdělávání PdF MU

Poříčí 7, 603 00 Brno, ČR

E-mail: pawera@mail.muni.cz

Telefon: + 420 549 496 630

