

Úloha VIII.3 ... Svíčka zhasne

10 bodů; (chybí statistiky)

Jistě jste již viděli jev, kdy se plovoucí svíčka přiklopí sklenicí a když svíčka zhasne, nasaje se do sklenice voda. Tento experiment si může každý sám vyzkoušet.

Do hlubokého talíře nalijte vodu a položte na ni hořící čajovou svíčku. Svíčku poté přiklopte sklenicí tak, aby z ní neunikl žádný vzduch, a položte ji až na dno talíře. Změřte, do jaké výšky voda ve sklenici vystoupá, a pokuste se spočítat, o kolik se po dohoření svíčky změnil tlak ve sklenici oproti tlaku atmosférickému. Dávejte pozor také na fakt, že před zhasnutím se hladina vody ve sklenici od okolní hladiny také může lišit.

Při řešení jistě využijete Pascalova zákona, díky kterému víme, že v hloubce h vody je tlak $p = h\rho g$, kde ρ je hustota vody a $g = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. K němu můžete samozřejmě přičíst tlak vzduchu uvnitř sklenice a popsat tak rovnost mezi tlaky uvnitř a vně sklenice (ve stejné hloubce!) pro situace před dohořením a po něm. Pro přemýšlení si můžete připomenout i definici tlaku, jakožto síly na plochu $p = F/S$.

Teorie

Na začátek se podívejme, co se děje při hoření. Hořící svíčka spaluje vzdušný kyslík. Bez kyslíku (resp. s nedostatečnou koncentrací kyslíku) v okolí hořet nemůže – zhasne. Plamen uvolňuje velké množství energie v podobě světla a (pro náš experiment důležitějšího) tepla. Zahřívá tedy vzduch z okolí. A jak jistě víte, plyn, který se zahřívá, zvětšuje svůj objem.

Když přikryjeme svíčku sklenicí, svíčka zahřívá vzduch ve sklenici, čímž v ní zvyšuje tlak. Sklenice se svíčkou uvnitř se tedy pod vodou chová jako potápěčský zvon, kdy tlak teplého vzduchu uvnitř sklenice vyrovnává atmosférický tlak a tlak, kterým působí voda na úrovni okraje sklenice. Tlaky vzduchu uvnitř a vně sklenice se tak liší o tlak, kterým v úrovni okraje sklenice působí voda vně sklenice. Z Pascalova zákona tedy rozdíl tlaků vzduchu můžeme určit jako

$$p_1 = h\rho g,$$

kde h je výška hladiny vody v okolí měřená od úrovně okraje sklenice.

Svíčka ovšem nebude vzduch ve sklenici zahřívát věčně. Vzhledem k poměrně malému objemu sklenice koncentrace kyslíku uvnitř velmi rychle klesne pod úroveň, při které je svíčka ještě schopna hořet, a svíčka zhasne. V tento moment vzduch uvnitř sklenice začne chladnout, zmenší svůj objem, čímž sníží tlak ve sklenici, což způsobí nasátí vody. Vody se nasaje opět tolik, aby tlak vody uvnitř sklenice na výškové úrovni hladiny vně sklenice spolu s tlakem vzduchu uvnitř vyrovnal tlak atmosférický. Tlaky vzduchu uvnitř a vně sklenice se tak liší právě o tlak vodního sloupce nad hladinou vody mimo sklenici. To vyjádříme podobně jako v předchozím případě

$$p_2 = \Delta h\rho g,$$

přičemž Δh je rozdíl hladin uvnitř a vně sklenice¹. Povšimněte si také, že k určení kterékoli z veličin nepotřebujeme znát hodnotu atmosférického tlaku.

Nakonec se pro úplnost pozastavme ještě u chemie a přeměny kyslíku zmíněných v tomto procesu. Hlavní chemická reakce je (po dobu hoření svíčky):



¹Chceme vědět, jak vysoko je hladina ve sklenici nad hladinou okolní, tedy rozdíl jejich výšek.

tedy nejen, že je vzduch ohříván, ale také se mění jeho složení. Pokud bychom hledali přesné příčiny pro změnu tlaku, museli bychom také uvážit příspěvek vzniklého oxidu uhličitého a uhelnatého a jak vynahrazují tlak původního kyslíku ze vzduchu. Nicméně, i když je tento efekt měřitelný, není předmětem našeho experimentu, protože otázkou je, jak se změní celkový tlak vzduchu oproti atmosférickému. Pro další experimenty s hořící svíčkou bychom však měli na tuto reakci pamatovat.

Měření

Postupovat budeme podle návodu v zadání. Pro lepší viditelnost jevu můžeme vodu pro měření obarvit troškou inkoustu nebo potravinářského barviva. Protože se zároveň přímo v hlubokém talíři špatně měří pravítkem, na sklenici přilepíme dlouhý pruh průhledné izolepy, na který budeme vždy příslušnou výšku hladiny vyznačovat permanentním fixem.²

První výška hladiny, kterou pro každé měření označíme, bude výška vnější hladiny hned po přiklopení svíčky. Následně počkáme, až svíčka dohoří a ustálí se hladina vody ve sklenici, načež vyznačíme hladinu uvnitř sklenice i hladinu vně sklenice. Takto můžeme obě potřebné hodnoty (výšku hladiny na začátku i rozdíl hladin po dohoření) změřit na sklenici mimo talíř.

| $\frac{h}{\text{cm}}$ | $\frac{p_1}{\text{Pa}}$ |
|-----------------------|-------------------------|
| 1,8 | 177 |
| 1,7 | 167 |
| 1,8 | 177 |
| 1,8 | 177 |
| 1,8 | 177 |
| 1,9 | 186 |
| 1,8 | 177 |
| 1,7 | 167 |
| 1,7 | 167 |
| 1,9 | 186 |

Tab. 1: Naměřené hodnoty před zhasnutím svíčky

V tabulce 1 vidíme naměřené výšky hladiny vody před zhasnutím svíčky včetně přepočtu na rozdíl tlaků vzduchu vně a uvnitř sklenice (použito $g = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$). Nutno zdůraznit, že v tomto případě je vyšší tlak vzduchu *uvnitř* sklenice. Průměrný naměřený rozdíl tlaků je $\overline{p_1} = 176 \text{ Pa}$. Jako nejistotu měření pak použijeme absolutní odchylku všech naměřených rozdílů tlaků³ $\Delta p_1 \doteq 5,3 \text{ Pa}$.

V tabulce 2 jsou pro změnu shrnuty naměřené rozdíly hladin po zhasnutí svíčky a přepočet na rozdíl tlaků vzduchu vně a uvnitř sklenice. Tentokrát je vyšší tlak vzduchu *vně* sklenice. Průměrný naměřený rozdíl tlaků je $\overline{p_2} = 142 \text{ Pa}$ a absolutní odchylka $\Delta p_2 \doteq 15 \text{ Pa}$.

²Samozřejmě lze vyznačovat i přímo na sklenici, ovšem pro čištění je pohodlnější sloupnout izolepu a sklenici opláchnout.

³Jak na to najdete na našich stránkách: https://vyfuk.mff.cuni.cz/jak_resit/hokus_pokus.

| h | p_2 |
|-----|-------|
| cm | Pa |
| 1,2 | 118 |
| 1,3 | 128 |
| 1,5 | 147 |
| 1,8 | 177 |
| 1,4 | 137 |
| 1,2 | 118 |
| 1,6 | 157 |
| 1,4 | 137 |
| 1,5 | 147 |
| 1,6 | 157 |

Tab. 2: Naměřené hodnoty po zhasnutí svíčky

Závěr

Před dohořením svíčky je vzduch ve sklenici ohřátý. Ve sklenici je tedy vyšší tlak vzduchu než v jejím okolí a to o naměřených $p_1 = (176,0 \pm 5,3)$ Pa, do sklenice se tedy nedostává další voda a při provádění experimentu jsme dokonce mohli místy pozorovat unikající bublinky rozpínajícího se vzduchu, když tlak před zhasnutím svíčky dostatečně překročil tuto hodnotu a část rozpínajícího se vzduchu unikla.

Hořením svíčka spaluje kyslík, kterého je ve sklenici konečné množství. Svíčka tak musí nutně zhasnout jakmile jeho koncentrace dostatečně klesne. Vzduch uvnitř po zhasnutí již nic neohřívá, začne tedy chladnout a tlak vzduchu poklesne. Oproti tlaku v okolí bude nižší o naměřených $p_2 = (142 \pm 15)$ Pa, což způsobí nasátí vody do sklenice a vyrovnání tlaků.

Soňa Husáková

sona@vyfuk.mff.cuni.cz

Korespondenční seminář Výfuk je organizován studenty a přáteli MFF UK. Je zastřešen Oddělením propagace a mediální komunikace MFF UK a podporován Katedrou didaktiky fyziky MFF UK, jejími zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported.
Pro zobrazení kopie této licence navštivte <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.