

## Pokusy na Malé Hrašticí – tentokrát s teplem

LEOŠ DVOŘÁK

Katedra didaktiky fyziky, Matematicko-fyzikální fakulta UK, Praha

Příspěvek popisuje: 1) Jednoduchou demonstraci adiabatického děje, resp. rozdílu mezi adiabatickým a izotermickým dějem, dokonce s možností přibližně určit velikost Poissonovy konstanty  $\kappa \cdot \left(\frac{C_p}{C_v}\right)$ . 2) Skupinu pokusů na demonstraci a měření přenosu tepla zářením, a to jak pomocí prostředků ICT („dataloggeru“), tak jednoduchými pomůckami za pár korun.

### Úvod – oč jde na Malé Hrašticí

Jarní soustředění pro budoucí učitele fyziky a „spřízněné duše“ se konají již od roku 1997. Tradičně je pořádáme začátkem května v táborové základně u vesničky Malá Hrašticí nedaleko Dobříše. Soustředění trvá 4–5 dní a účastní se ho asi 15–25 účastníků. Většinou jde o posluchače učitelství fyziky z naší fakulty včetně doktorandů, ale přijíždějí i absolventi, kteří už učí na školách a občas i další hosté.

Soustředění je velice neformální a zcela *dobrovolné*. Studenti za účast nedostávají žádné kredity ani nic jiného. Na Hrašticí se prostě jezdíme bavit fyzikou. A také (protože nejen fyzikou živ je člověk) mimoodborným programem, který je se soustředěním neodmyslitelně spjat. Odborná část programu se převážně realizuje formou *miniprojektů*. Dvojice, trojice či libovolné skupinky účastníků si prostě vyberou témata, která je zaujmou a zkoušejí v nich něco „vybádat“. Samozřejmě nejde o objevení nějaké „nové fyziky“, ale o to, vyzkoušet si nějaký pokus, vymyslet jeho novou variantu nebo zkusit něco naměřit. A udělat to ne v prostředí školního praktika či vědecké laboratoře, ale doslova „v polních podmínkách“, kde musíme improvizovat, využívat jednoduché materiály a hledat nestandardní řešení. Že to trénuje kreativitu, fyzikální cit a nejrůznější dovednosti, je jasné. Výsledky si pak účastníci neformálně prezentují. Výsledkem přitom může být, stejně jako ve skutečném vědeckém výzkumu, i negativní zjištění typu „tudy cesta nevede“, „je to složitější, než jsem si myslel“, případně „na tohle se ještě budeme muset pořádně podívat“.

Podrobnosti o soustředění a miniprojektech mohou zájemci najít v článku [1]. Zde bych chtěl upozornit na jeden důležitý aspekt: soustředění umožňuje vyzkoušet si spoustu věcí a přináší nápady a inspiraci pro nové pokusy či jejich varianty a nové jednoduché přístroje a pomůcky. Řada námětů, které vznikly či byly prvně odzkoušeny právě na Malé Hrašticí, již byla publikována i ve sbornících Veletrhu nápadů, viz např. [2], [3].

V roce 2008 bylo hlavním tématem odborného programu *Teplo*. V dalším textu popíšu dva příklady pokusů, které jsem si tam vyzkoušel.

## Adiabatický a izotermický děj v malém a názorně

Izotermický a zejména adiabatický děj se ve středoškolské fyzice často zavádějí jen teoreticky. Následující jednoduchý pokus umožňuje jednoduše demonstrovat jejich rozdíl – a dokonce přibližně určit i velikost Poissonovy konstanty  $\kappa$ .

Princip pokusu ukazují obrázky 1 a 2. Hrdlem láhve prochází trubička, v ní je několikacentimetrový sloupec vody. V láhvi je vzduch. Je-li trubička vodorovně (obrázek 1), je v láhvi atmosférický tlak.



Obr. 1: Je-li trubička vodorovně, je v láhvi stejný tlak, jako v okolní atmosféře

Otočíme-li láhev s trubičkou do svislé polohy (obrázek 2), zvýší se tlak v láhvi o hydrostatický tlak daný výškou vodního sloupce. Vzduch v láhvi se trochu stlačí a sloupeček vody se posune níž.

A kde je slibovaný **rozdíl mezi izotermickým a adiabatickým dějem?**

Provedeme-li pokus, hned to uvidíme:

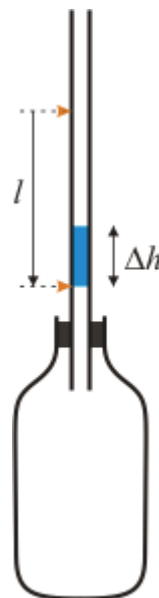
Sloupec vody nejprve rychle „spadne“ o určitý kus a pak pomaleji „dobíhá“.

To úvodní „spadnutí“, tedy úvodní stlačení vzduchu v láhvi, je děj tak rychlý, že se při něm teplota vzduchu v láhvi ještě nestíhá vyrovnat s okolím. Probíhá tedy stejně, jako by vzduch v láhvi byl tepelně izolován – to znamená, že jde o děj **adiabatický**. Při něm tlak při stlačování roste rychleji, než by to bylo při ději izotermickém. Proto stačí menší stlačení (menší pokles sloupečku vody) k tomu, aby přetlak v láhvi daný sloupec vody udržel. Vzduch v láhvi se přitom trochu zahřeje, ale to v pokusu nijak neměříme ani neucítíme.

Teplota vzduchu se ovšem během několika následujících sekund vyrovná s okolím, takže je stejná jako na začátku. Proto pro výsledný objem vzduchu v láhvi můžeme použít známý vztah pro **izotermický děj**:  $p \cdot V = \text{konst.}$  Ale i bez počítání, z „fyzikálního názoru“, je jasné, že když vzduch v láhvi zase zchladl, jeho objem se zmenší a sloupeček vody v trubičce se tedy posune dolů.

### Trocha kvantitativních odhadů a výpočtů

Začněme **izotermickým dějem**. Ze vztahu  $p \cdot V = \text{konst.}$  by šlo „vysokoškolským způsobem“ pomocí derivování resp. diferenciálů odvodit pro změnu objemu vztah



Obr. 2: Ve svislé poloze se v láhvi tlak zvýší

$\Delta V \doteq -\left(\frac{V}{p}\right) \cdot \Delta p$ . Ale zkusme to jednodušeji, otázkou, kterou lze položit i žákům:

Jestliže stoupne tlak  $p$  o 1 %, o kolik musí klesnout objem  $V$ , aby zůstal součin  $p \cdot V$  konstantní?

Jistě, objem musí klesnout také asi o 1 %. (Ať už o tomhle žáky přesvědčíte tím, že si na kalkulačce vydělí 1 číslem 1,01 nebo vynásobí čísla 1,01 a 0,99 nebo jinak. Je asi dobře žáky upozornit, že tohle platí jen pro malé změny tlaku, tedy že při zvýšení tlaku o 200 procent rozhodně objem o 200 procent neklesne. ☺)

Přírůstek tlaku o 1 % nastane pro vodní sloupec vysoký 10 cm. (Bud' jej můžeme spočítat pomocí vztahu  $\Delta p = \Delta h \cdot \rho \cdot g$ , nebo žákům připomeneme, že 10 cm je setina z 10 m, tedy z výšky vodního sloupce, kterou „unes“ atmosférický tlak.) Má-li láhev objem 0,5 l a trubička má vnitřní průměr 4,4 mm (tedy plocha jejího vnitřního průřezu je asi 0,15 cm<sup>2</sup>), odpovídá změně objemu o 1 % posun sloupečku vody asi o 33 cm. Pro sloupec vody dlouhý jen 5 cm bude změna tlaku i objemu jen půl procenta, sloupec vody tedy klesne jen o necelých 17 cm. A tak dále.

Jak je tomu pro **adiabatický** děj? Nyní platí  $p \cdot V^\kappa = \text{konst.}$  Vzrůstu tlaku o 1 % teď neodpovídá pokles objemu o celé procento, ale o méně: jen o  $1/\kappa$  %. Pro  $\kappa = 1,4$  tedy objem poklesne jen asi o 0,7 %. I tohle můžeme jednoduše ilustrovat výpočtem na kalkulačce: zkuste vynásobit  $1,01 \cdot 0,993^{1,4}$ . (Samozřejmě, v semináři se středoškolačky, kteří již ovládají derivování, by šlo odvodit i obecný vzorec  $\Delta V \doteq -\left(\frac{V}{\kappa \cdot p}\right) \cdot \Delta p$ .)

Pro výše zmíněný příklad půllitrové láhve a trubičky s průměrem 4,4 mm vyjde pokles deseticentimetrového sloupce vody jen necelých 24 cm; pro poloviční sloupec je pokles samozřejmě také poloviční.

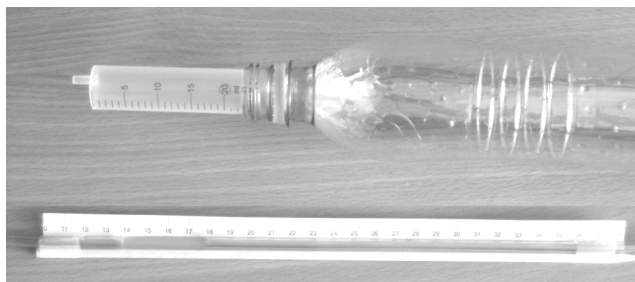
Důležité je, že **poměr délek**, o něž se sloupec posune při izotermickém ději ( $l_I$ ) a při adiabatickém ději ( $l_A$ ) je **roven Poissonově konstantě  $\kappa$** :

$$\frac{l_I}{l_A} = \kappa$$

Je to vidět jak z uvedeného příkladu, tak ze zmíněných obecných vztahů.

### Provedení pokusu

Pokus lze udělat s těmi nejjednoduššími pomůckami. Místo skleněné trubičky můžeme použít plastovou hadičku s prodejen potřeb pro zahrádkáře. Její vnitřní průměr je výše uvažovaných 4,4 mm. Hadička jde nasadit na „hrot“ plastové injekční stříkačky. Uříznutou stříkačku 20 ml lze



Obr. 3: Provedení pokusu

těsně vsunout do hrdla plastové láhve. K hadičce přilepíme kus papírového měřítka – a můžeme začít měřit. Jedna „technická rada“: při změně polohy hadičky z vodorovné do svislé je vhodné ucpat konec hadičky prstem. Sloupec vody pak drží na původním místě; klesat začne, až uvolníme prst.

Měření je samozřejmě spíše orientační. Voda v hadičce má občas tendenci „zadržávat“ (je vhodné na hadičku trochu poklepat), polohu sloupce vody odpovídající rychlému prvnímu poklesu (tedy hodnotu  $l_A$ ) je těžké přesně odečíst atd. Přesto výsledky dávají hodnotu Poissonovy konstanty v okolí 1,4 (což je tabulková hodnota pro vzduch).

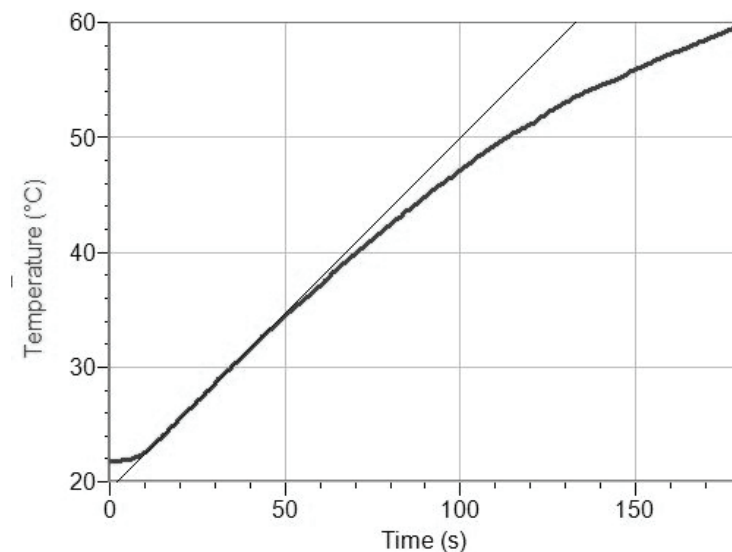
Ještě jedno upozornění: plastovou láhev neberte při měření do ruky. Ohřeje-li se láhev teplem ruky, vzduch se v ní rozpíná a z celého zařízení máme spíše „termoskop“, než přístroj na měření  $\kappa$ .

### Přenos tepla zářením

Demonstraci přenosu tepla zářením byla na Veletrhu nápadů věnována již řada příspěvků. Což takhle šíření tepla zářením – třeba ze Slunce, ale nejen z něj – i kvantitativně **změřit**? A to s jednoduchými pomůckami a pokud možno rychle.

Na Hrašticí nám pomohl LabQuest firmy *Vernier* (viz např. [4]) s malou sondou pro měření teploty. LabQuest je malé „ruční“ zařízení pro počítačový sběr dat s experimentu, jehož výhodou je, že je lze vzít třeba ven na louku nebo využít v „polních podmínkách“ na soustředění typu Hraštic. Přesně to jsme udělali. Sondou pro měření teploty jsem přilepil izolepou ke kousku měděného plechu (5x5 cm), který jsem z jedné strany nastříkal černým lakem ze spreje. Plech byl z druhé strany izolován pěnovým polystyrénem. (Byl do něj poněkud „zapuštěn“, což jde udělat, když ho nahřejeme páječkou – samozřejmě ještě před přilepením sondy.)

Když začerněný plech vystavíme slunečnímu záření, rychle se ohřívá. LabQuest nahrává data (standardně po každé polovině sekundy), umí je zobrazit v grafu a proložit částí grafu lineární závislost – tedy spočítat, jak teplota stoupá s časem, viz obrázek 4.



Obr. 4: Nárůst teploty začerněného měděného plíšku zahříváného slunečním zářením

Při vyšších teplotách samozřejmě teplota stoupá pomaleji (plech je ochlazován například okolním vzduchem), ovšem zpočátku stoupá teplota prakticky lineárně – v našem případě asi o  $0,30$  až  $0,33 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$ . Z tepelné kapacity plechu (tu určíme z hmotnosti a specifické tepelné kapacity mědi) vychází, že plíšek byl ohříván příkonem asi  $1,5 \text{ W}$ . Po přepočtu na metr čtvereční dostáváme  $600 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . To je sice méně než solární konstanta (i než intenzita slunečního záření uváděná na povrchu Země, která má činit asi  $1 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ ), ale řádově se obě hodnoty shodují a rozdíl lze vysvětlit ztrátami tepla i tím, že v době měření nebyla úplně jasná obloha.

Začerněný plech můžeme zahřívát i jinými zdroji záření, například:

- Stolní lampou.
- Plechovkou, naplněnou horkou vodou. (Plechovku či její část ovšem nenecháme lesklou, ale také ji nastříkáme černou barvou.)
- Vlastní dlaní. V tomto případě samozřejmě roste teplota pomaleji – ale kupodivu jen asi desetkrát pomaleji než při ohřívání Sluncem. Počáteční nárůst činil  $0,03 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$  (při vzdálenosti dlaně  $2 \text{ cm}$ ). Pokud místo měděného plechu použijeme začerněnou hliníkovou fólii, je počáteční rychlost nárůstu teploty až  $0,14 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$ .

### Jak měřit stokrát laciněji

Čtenář se možná poněkud rozčílil, že jsem výše mluvil o jednoduchých pomůckách a vzápětí o měření pomocí LabQuestu, což je zařízení v ceně kolem deseti tisíc korun. Takže se podívejme, jak to udělat laciněji, pomocí běžného multimetru.

Máme-li multimetr se sondou k měření teploty, můžeme ji využít – ovšem přesnost měření je jen na celé stupně. Druhou možností je použít perličkový termistor (v ceně řádově deset Kč) a multimetrem měřit jeho odpor. Teplotní závislost ovšem musíme předem proměřit (tedy provést kalibraci). S pomocí baterie a několika rezistorů lze dosáhnout toho, aby multimetr zapojený jako měřič napětí ukazoval údaj, který s teplotou stoupá a dokonce (alespoň přibližně) číselně odpovídá měřené teplotě. Ale podrobnosti už se do tohoto článku nevejdou – snad tedy někdy příště.

### Literatura

- [1] Dvořák L.: *Labs outside labs: miniprojects at a spring camp for future physics teachers*. European Journal of Physics 28 (2007), S95–S104.
- [2] Dvořák L.: *Trocha heuristiky z Malé Hraštic*. In: Sborník konference Veletrh nápadů učitelů fyziky 5. Ed.: Rauner K., ZČU Plzeň 2001, s.143–146.
- [3] Dvořák L.: *Netradiční měřicí přístroje 4: Měření krátkých časů*. In: Sborník konference Veletrh nápadů učitelů fyziky 9, svazek I, Ed. Smetanová J., Sládek P., Paido 2004, s. 30–32.
- [4] Pazdera V.: *LabQuest – měření v terénu*. Příspěvek v tomto sborníku.