

Několik jednoduchých pokusů (na téma tlak)

Leoš Dvořák

Matematicko-fyzikální fakulta UK, V Holešovičkách 2, 180 00 Praha 8

Leos.Dvorak@mff.cuni.cz

Příspěvek popisuje několik pokusů týkajících se tlaku, stlačování plynů (přetlaku a podtlaku), atmosférického tlaku, hydrostatického tlaku a vztlaku. Konkrétní využití pokusů – jako demonstrační, žákovské, části malých projektů apod. – záleží na učiteli. Níže uvedený soubor pokusů lze chápat jako náměty, jak při pokusech na ZŠ v dané oblasti využít jednoduché a laciné pomůcky (plastové injekční stříkačky, hadičku, pingpongový míček, PET láhev). Většinou jde o kvalitativní pokusy, v některých případech však dané pomůcky umožní i přibližná kvantitativní měření.

Pokusy využívající například plastové stříkačky samozřejmě nejsou ničím novým – viz např. [1], [2] nebo další příspěvky z konferencí *Veletřh nápadů učitelů fyziky*, které lze najít třeba v souhrnném sborníku na CD [3] nebo na webu [4]. Jednoduché využití plastové stříkačky k ověření stlačitelnosti a pružnosti vzduchu je popsáno i v učebnici [5]. Oproti uvedeným pramenům se v následujících návodech budeme snažit „vytěžit“ z pokusů ještě o trochu více. Budou zde též zmíněny některé praktické rady pro provedení pokusů. Navíc některé dále uvedené varianty pokusů jsou možná zcela nové. (I když u školních fyzikálních pokusů platí, že „skoro vše už tady někdy bylo“.) Většinu zde popsaných pokusů jsem ověřoval na dílně „Pokusy s vodou“ na letošním semináři Heuréky v Kyjově [6]. Protože je však pěkné připravit pro každý seminář něco nového, najdete v následujícím přehledu i experimenty, které měly ve Vlachovicích premiéru.

1. Stlačujeme vzduch ve stříkačce

„Na rozezhřátí“ můžeme začít velmi jednoduchým pokusem, který nepochybně řada učitelů už ve své výuce užívá. Do plastové stříkačky nasajeme vzduch, prstem ucpeme otvor a stlačujeme píst.



Pokus by si samozřejmě měli vyzkoušet sami žáci. Co zjistí?

- samozřejmě to, že vzduch „pruží“ a přestaneme-li tlačit na píst, vrátí jej zase zpět.
- k většímu stlačení potřebujeme větší sílu.
- pro stlačení pístu v širší stříkačce je potřeba větší síla, než v případě užší stříkačky.

Poslední tvrzení je samozřejmě vhodné upřesnit. Samozřejmě, že i v užší stříkačce můžeme vzduch stlačit „co to dá“. Ale stlačíme-li vzduch ve stříkačce například na polovinu původního objemu, potřebujeme u užší stříkačky znatelně menší sílu. Pokud na píst tlačíme „vší silou“, stlačíme v užší stříkačce vzduch více. (Jak ukazuje následující fotografie, v úzké stříkačce vzduch stlačíme asi na šestinu původního objemu, v širší stříkačce to šlo jen asi na třetinu.)

Poznamenejme, že vinou tření a skutečnosti, že u různě velkých stříkaček zřejmě palcem nevyvineme na píst stejně velkou sílu, neodpovídá poměr stlačení objemů plynů (převrácené) hodnotě poměru ploch pístů. Pokus má tedy spíše kvalitativní charakter. Pro pokus je vhodné použít stříkačky o objemu 5 ml (užší stříkačka, s plochou pístu něco přes 1 cm^2) a 20 ml (širší stříkačka, s plochou pístu asi 3 cm^2). Poměr sil při stlačování je pak dostatečně výrazný.



2. „Děláme ve stříkačce vakuum“

Další pokus je též dostatečně známý (je uveden např. v učebnici [7]), stojí si však za to uvědomit, co vše si na něm můžeme všimnout. Opět využijeme plastovou stříkačku – a opět je vhodné, aby si pokus vyzkoušeli sami žáci. Píst zasuneme do stříkačky až na doraz, prstem ucpeme otvor a píst táhneme ven. Co zjistíme?

- píst musíme táhnout ven poměrně značnou silou, pustíme-li ho, vrací se zpět. (Často poměrně razantně, až klepne na doraz.)
- na rozdíl od případu, kdy jsme vzduch v stříkačce stlačovali, síla, kterou musíme táhnout píst ven, prakticky *nezávisí* na tom, jak moc píst vytáhneme. (Toto zjištění můžeme žákům předložit jako problém a diskutovat, proč je tomu tak.)



- síla opět závisí na šířce stříkačky. U užší stříkačky je menší než u širší. (Právě tak, jak tomu bylo při stlačování vzduchu.)

Opět je vhodné porovnávat sílu k vytažení pístu u 20 ml a 5 ml stříkačky. Při pokusu nesmí samozřejmě do stříkačky vniknout vzduch. (Písty plastových stříkaček většinou těsní velmi dobře, vzduch má šanci vniknout, jen pokud otvor stříkačky „neutěsníme“ dobře prstem.)

Poznamenejme, že po nějaké době u stříkaček většinou tření mezi pístem a materiálem stříkačky vzroste natolik, že se už píst „sám“ (tedy účinkem atmosférického tlaku) nevrací na doraz. Pro pokus je pak lépe použít novou stříkačku. Přece jen se na plastových stříkačkách pozná, že jsou na jedno použití. Píst lze samozřejmě zkusit „promazat“. Někdy k tomu stačí voda, někdy pomůže trochu mastnoty. Ale běžný olej na smažení obvykle po čase zatuhne na stěnách stříkačky ještě víc. A navíc zde je nebezpečí, že ve stříkačce zůstane kapička oleje, při stlačení pístu vyprskne někomu na šaty... Znáte-li recept, jak bezpečně a spolehlivě „promazávat“ plastové stříkačky, budu za něj vděčný. Jinak je opravdu nejlepší vzít novou stříkačku. A z té staré můžeme třeba vyndat píst a použít ji jako miniaturní odměrný váleček nebo k některému z dále uváděných pokusů.

3. „Magdeburské stříkačky“ aneb měříme atmosférický tlak

Historický pokus Otto von Guericke s magdeburskými polokoulemi zde není nutno připomínat. Máme-li polokoule a vývěvu, je opakování tohoto pokusu vděčnou podívanou pro žáky i pro veřejnost. Ale i bez tohoto vybavení můžeme sílu, jíž působí atmosférický tlak, demonstrovat docela přesvědčivě. Stačí k tomu mírně modifikovat výše popsany experiment s vytahováním pístu stříkačky.

Na píst 5 ml stříkačky zavěšíme pomocí zvonkového drátu PET láhev s vodou, jak je to vidět na fotografii. (Do plastu kolem horního konce pístu, kde budeme připevňovat drát, můžeme předem udělat řezáčkem či nožem vhodné zářezy, aby drát dobře držel.) Píst nejprve stlačíme na doraz a otvor stříkačky zcpeme prstem. Pak píst popotáhneme dolů, ven ze stříkačky. Prázdňou láhev či láhev, ve které je málo vody, píst vytáhne nahoru. (Se žáky přitom samozřejmě budeme diskutovat, proč tomu tak je, že nejde o „horror vacui“, jak na píst působí atmosférický tlak atd. Jak vést tyto diskuse je na učiteli a zde ani v dalších experimentech to nebudeme podrobně popisovat.)

Je-li vody něco přes litr, síla daná atmosférickým tlakem již láhev neuzvedne. Odtud můžeme jednoduše určit atmosférický tlak: píst je tažen dolů tíhou láhve, tedy silou asi 10 N; nahoru jej tlačí atmosférický tlak na ploše asi 1 cm². (Tlak je tedy asi 10 N/cm².)

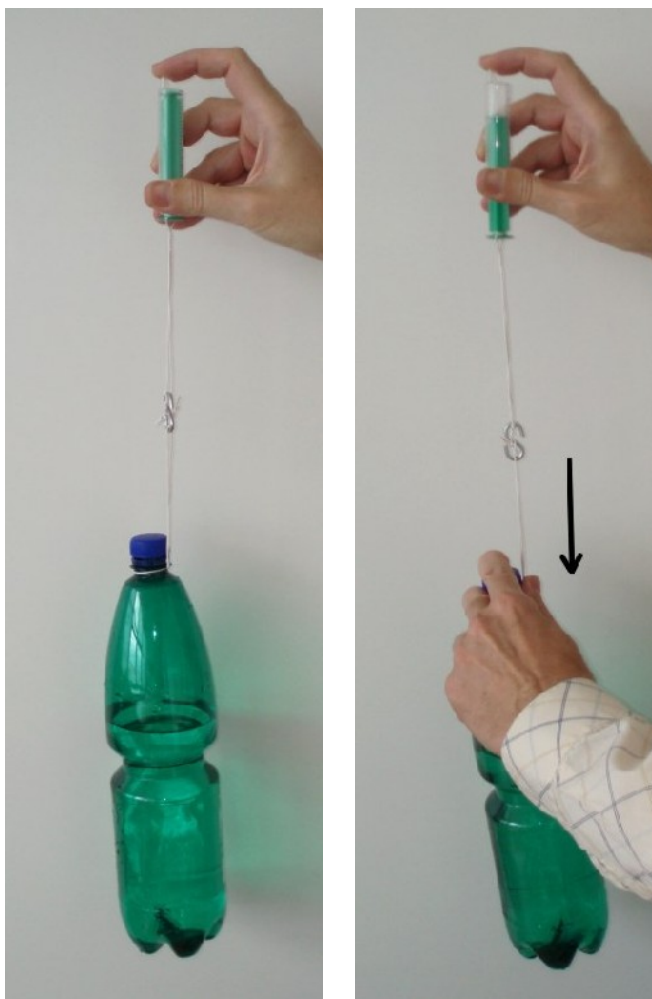
Na 1 m² je síla desettisíckrát větší než na 1 cm², tedy sto tisíc N – a jsme bez velkého přepočítávání u hodnoty tlaku 100 000 Pa. Pro názornou představu je přitom asi vhodnější jednoduché konstatování typu „na jeden centimetr čtvereční tlačí vzduch kolem nás silou, která unese jeden kilogram“ – což je právě to, co náš pokus ukazuje.



Upřesňující (a trochu pesimistická) poznámka:

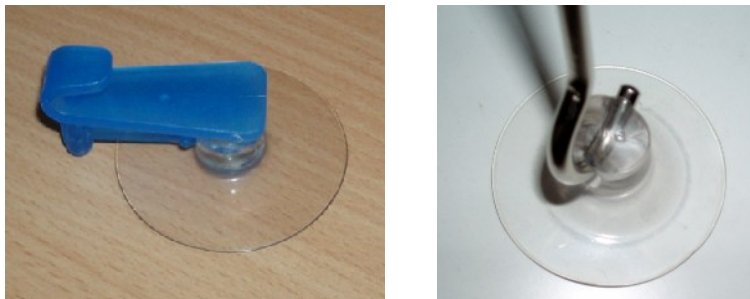
Ve výše uvedeném popisu vypadá celý pokus až průzračně jednoduše a ideálně. Bohužel, reálně s jeho pomocí určíme hodnotu atmosférického tlaku jen značně přibližně. Viníkem je tření pístu stříkačky o její stěny. I u nové a „dobře klouzající“ 5 ml stříkačky zjistíme, že množství vody, které atmosférický tlak „vyváží“, je někde mezi 0,8 až 1,2 litru. Jistě, lze píst prstem všelijak „pošťuchovat“ nahoru a dolů. Ale pro demonstraci je vhodné ukázat případy dosti výrazné – tedy např. to, že zátěž 0,5 kg (tedy půllitr vody) píst dolů ještě nestáhne (spíše je vytahována nahoru), zatímco zátěž 2 kg (dva litry vody ve velké PET láhvi), již píst dolů stahuje. A neskrývat, že daný pokus není žádným přehnaně přesným měřením atmosférického tlaku, ale dává spíše řádovou hodnotu. Na druhou stranu, použijeme-li pro pokus 10 ml stříkačku (která má plochu pístu asi 2 cm^2), pak 1 kg zátěž na překonání atmosférického tlaku nestačí a chceme-li píst stáhnout dolů, musíme jej navíc táhnout rukou, jak to ukazuje obrázek.

Poznamenejme, že pro přesnější určení atmosférického tlaku podobným pokusem by bylo nutno píst lépe „promazat“, měřit, při které síle se začne pohybovat dolů a při které zpět nahoru (a z daných hodnot brát zřejmě průměr) atd. Patrně by pomohlo užít větší skleněnou stříkačku, kde je tření mezi pístem a stěnou stříkačky zřejmě nižší. (Článek [8] popisuje podobný pokus, kdy se 50 ml skleněná injekční stříkačka užívá k ověřování Boylova-Mariottova zákona. V daném článku však není zmíněna ani přesnost měření ani to, jak pokus ovlivňuje tření, a navíc v něm nejsou uvedeny žádné konkrétní výsledky měření – což vše jej činí poněkud „podezřelým“.) Asi je zde prostor pro další vlastní experimentování, ale zřejmě nelze čekat, že bychom pomůckami typu injekční stříkačky změřili atmosférický tlak bůhvíjak přesně. Ale věřím, že názorné a přesvědčivé určení byť i přibližné hodnoty má svůj význam.



4. „Magdeburské přísavky“ – aneb další měření atmosférického tlaku

Pokusu s magdeburskými polokoulemi je možná ještě bližší využití obyčejné plastové přísavky.



Do otvoru přísavky lze po vyndání držáčku shodou okolností právě nasadit hák siloměru a měřit sílu, kterou odtrháváme přísavku od stolu nebo jiné hladké plochy.

Je nutno použít siloměr na 100 N; síla, kterou přísavka drží, může být až přes 50 N. (Není asi nutno zdůrazňovat, že plocha, od níž přísavku odtrháváme, nesmí být hrbolatá nebo porézní, že je vhodné přísavku a plochu nepatrně navlhčit, před odtrháváním přísavku přitisknout a vytlačit zpod ní vzduch atd. Nejvyšší síla, kterou jsem při odtrhávání přísavky naměřil, byla až 70 N.)

Síla, kterou přísavku přitlačuje atmosférický tlak, není samozřejmě dána celou plochou přísavky. Okraje přísavky prostě leží na ploše; plocha, kde atmosférický tlak „přemáhá“ sílu, jíž přísavku odtrhujeme, je dána „bublínou“, kterou pod přísavkou vidíme, když ji nadzvedáváme. Odtrháváme-li přísavku větší silou, průměr bubliny se zvětšuje.

Při síle odtrhávání 50 N je průměr bubliny asi 2,5 cm, tedy poloměr r asi 1,25 cm. Bublina je přibližně kruhová, takže její plocha (přesněji plošný obsah) πr^2 vychází asi 5 cm². Po vydělení dostáváme opět tlak 10 N/cm². tedy 10⁵ Pa.

Poznamenejme znovu, že zacházíme-li s naměřenými čísly takto trochu „sugestivně“, vychází nám atmosférický tlak až překvapivě přesně. Ve skutečnosti „bublina“ nebývá přesně kruhová, měřit její průměr také není nejpřesnější záležitost – takže jde opět o měření spíše přibližné. Ale je jednoduché a velice názorné: opravdu zde měříme, jak atmosférický tlak přitlačuje přísavku na podložku.

Nemáte-li siloměr s rozsahem 100 N, přitiskněte přísavku zdola na nějakou vodorovnou plochu (třeba na destičku z plexiskla nebo jiného materiálu, který budete držet v ruce) a zavěšujte na ni zátěž, třeba opět PET láhve s vodou. To, že udrží tři až čtyři 1,5-litrové lahve, možná bude pro žáky překvapující. (Ale pozor, samozřejmě nezapomeňte dát pod zátěž něco měkkého, „až se ucho utrhne“...)

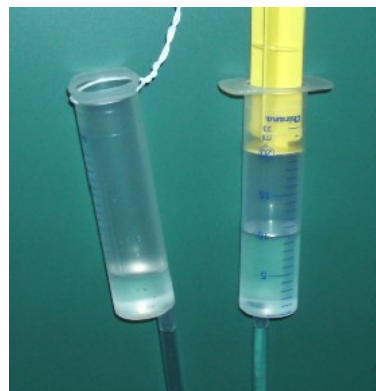


5. Voda stlačuje vzduch

Následující pokus můžeme využít k demonstraci (mírného) přetlaku a podtlaku. Přetlak či podtlak vyvoláme hydrostatickým tlakem $h\rho g$.

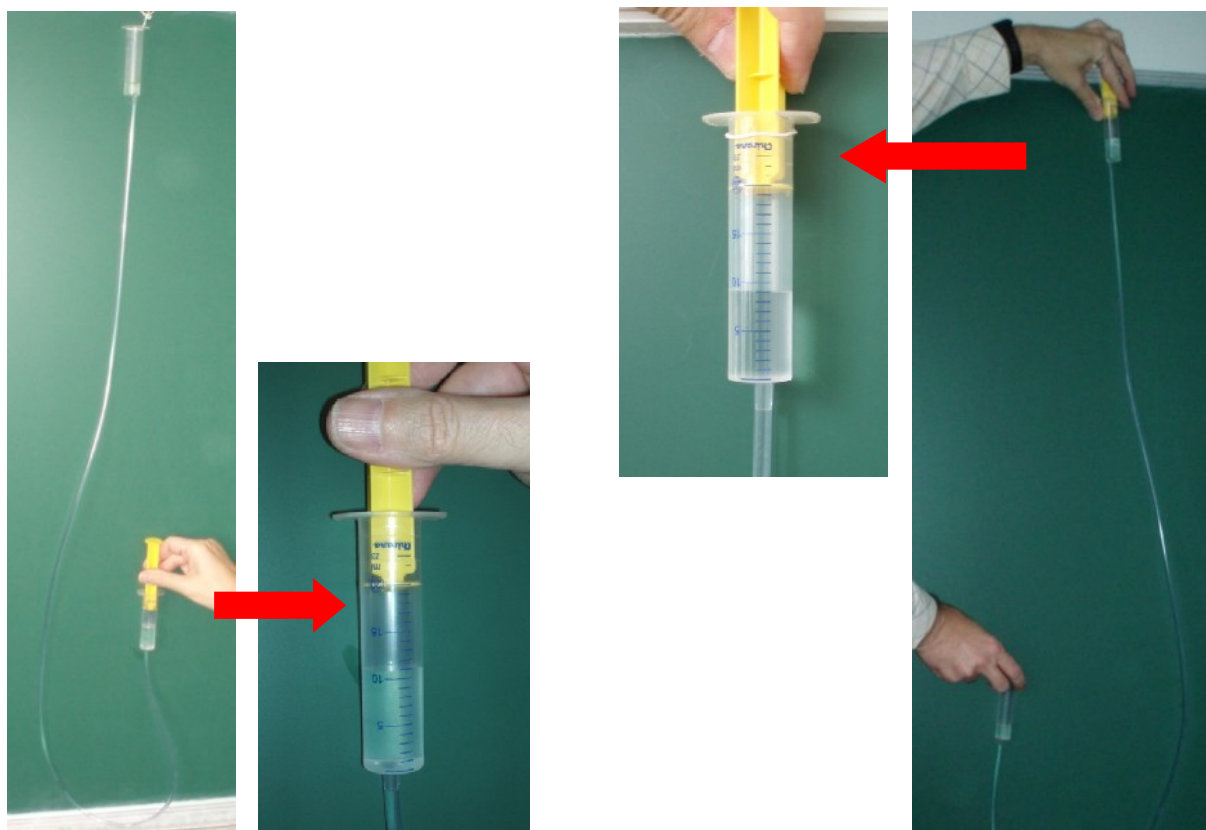
V principu půjde o spojitě nádoby ze dvou stříkaček. Stříkačky spojíme plastovou hadičkou. (Hadičku lze koupit v odděleních zahrádkářských potřeb v různých „marketech“ pro kutily nebo v prodejnách akvaristických potřeb. Hadičku o průměru 4 mm lze právě těsně nasadit na „trn“ stříkačky.)

V otevřených spojitých nádobách je samozřejmě hladina vody ve stejné výšce. (Ze dvou nádob stříkaček a plastové hadičky bychom tak mohli vyrobit hadicovou rovnováhu.) V našem případě je však jedna z nádob zavřená: stříkačka je zavřena pístem. Jak vidíme z fotografie, hladina pak samozřejmě nemusí být stejně vysoko.



Máme-li na začátku (kdy hladiny jsou zhruba vyrovnány) v zavřené stříkačce 10 ml vzduchu, můžeme se žáky sledovat, jak se objem vzduchu změní, umístíme-li otevřenou nádobu výše. Samozřejmě, vzduch v zavřené stříkačce se stlačí. Je-li rozdíl hladin 1 m, stlačí se vzduch asi o desetinu původního objemu, což lze již ve stříkačce dobře pozorovat.

Pokud naopak otevřenou nádobu umístíme níže než zavřenou, odečítá se hydrostatický tlak od atmosférického. V zavřené stříkačce bude tedy podtlak a vzduch se roztáhne – při rozdílu hladin 1 m opět asi o desetinu původního objemu.



Jak už bylo řečeno, pokus můžeme užít pro prostou demonstraci přetlaku a podtlaku. Můžeme jej také rozebrat podrobněji. Například tak, že připomeneme, že atmosférický tlak udrží vodní sloupec vysoký 10 m. Rozdíl hladin 1 m tedy odpovídá desetina atmosférického tlaku – a vidíme, že objem vzduchu se měnil právě o desetinu. Na poněkud vyšší úrovni, než odpovídá druhému stupni ZŠ, bychom tedy mohli diskutovat i Boyleův-Mariottův zákon $pV = \text{konst.}$ Pro větší rozdíl výšek hladin (třeba na schodišti školy) by pak tento pokus šlo využít jako jednoduchou náhradu „pVT- přístroje“, alespoň pro $T = \text{konst.}$

6. „Voda se unese“

Jednoduchý a možná na první pohled poněkud překvapivý pokus můžeme realizovat s plastovou stříkačkou, z níž vyndáme píst a nasadíme na ni kus plastové hadičky. Hadičku a část stříkačky naplníme vodou a horní okraj stříkačky si přitiskneme zdola na dlaň, jak to ukazuje fotografie. Stříkačka zůstane přisáta na dlani – a můžeme triumfálně konstatovat: „vidíte, voda sama sebe udrží“.

Samozřejmě, po efektním pokusu musí následovat diskuse o tom, co vlastně vodu udrží. Jistě, je to atmosférický tlak, přesněji řečeno rozdíl atmosférického tlaku a tlaku uvnitř stříkačky. (Se žáky rozebereme, že je nižší než atmosférický právě o hydrostatický tlak daný rozdílem hladin ve stříkačce a na spodním konci hadičky. Ostatně, vznik podtlaku tímto způsobem jsme už ukázali v předchozím experimentu.) Skutečnost, že ve stříkačce je podtlak, ukazuje i detailní pohled na pokus: dlaň je „vsávána“ do stříkačky.

S případnými zájemci (třeba ve volitelném předmětu či v kroužku fyziky) bychom mohli tento pokus propočítávat i kvantitativně. Motivací by mohla být otázka, jak dlouhou hadičku takto na dlani udržíme. Nebo její modifikace: je pro tento pokus lepší krátká hadička či delší?

Praktické rady pro provedení pokusu jsou celkem jasné: Je vhodné si předem dlaň trochu navlhčit – pokud okraj stříkačky „netěsní“, vnikne dovnitř další vzduch a stříkačka odpadne. Pro pokus je vhodnější širší stříkačka (pokus dobře funguje s 20 ml stříkačkou), hadičku je třeba mít delší než asi půl metru (delší hadička je lepší). A pozor: při pokusu vždy trochu vody vyteče, takže je dobře mít připravený nějaký hadr na utření podlahy či stolu.

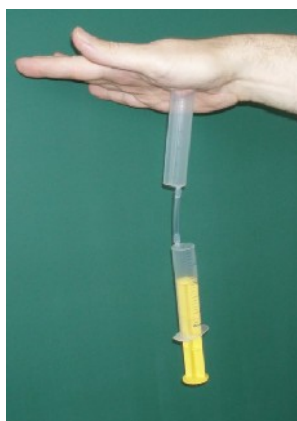


7. Jak se dvě stříkačky unesou na dlani

Podtlak ve stříkačce můžeme docílit i jinak. Například tak, že dvě stříkačky spojíme kouskem hadičky a jednou stříkačkou vzduch vysajeme jako pumpou.



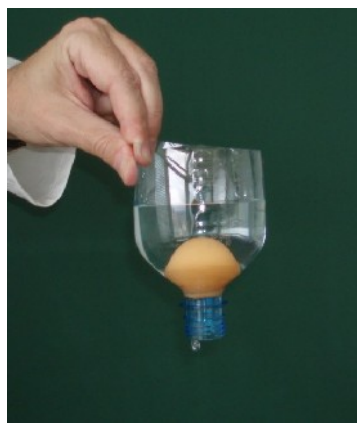
Docílíme tak (při stejně velkých stříkačkách) podtlak rovný maximálně polovině atmosférického tlaku. (Ve starých jednotkách tedy půl atmosféry – musím přiznat, že tento údaj si představím podstatně lépe než ekvivalentních 50 tisíc pascalů. :-)) Na pevné přísátí stříkačky však bohatě stačí i podtlak menší. Na detailní fotografii je vidět, jak je dlaň „vsávána“ do stříkačky.



Asi zde netřeba poznamenávat, že pro korektní diskusi pokusu bychom se neměli spokojit s povrchním (a vlastně fyzikálně nesprávným) konstatováním typu „dlaň tam vsává podtlak“. Žáci by si měli uvědomit, že dlaň musí do stříkačky něco „strkat“ – a to „něco“ že je tlak, který je v našem těle (a prakticky se rovná tlaku atmosférickému).

8. „Jak přelstít Archimédův zákon“

Archimédův zákon samozřejmě nepřelstíme. Ale můžeme ukázat, že k tomu, aby těleso plavalo, je potřeba tlak (resp. tlaková síla) působící zespodu. K jednoduché variantě poměrně známého pokusu můžeme s výhodou využít uříznutý vršek plastové láhve (velmi dobře se pro to hodí třeba plastová láhev od mléka) a pingpongový míček. Pokus ukazuje fotografie: Vršek láhve obrátíme hrdlem dolů, vložíme do něj míček, přidržíme ho prstem (aby „těsnil“ hrdlo) a nalijeme na něj vodu. Na hrdle přitom není našroubován uzávěr, takže pod míčkem je vzduch. Míček nevyplave!



Na fotografii vypadá míček zdeformovaně, ale to je jen díky tomu, že hrdlo láhve naplněné vodou funguje jako „velmi divná čočka“. Když k hrdlu láhve přiložíme zespoda uzávěr, voda protékající trochu kolem míčku vyplní prostor pod míčkem, začne na něj zespoda tlačit a míček vyskočí na hladinu.

Poznamenejme, že není-li uzávěr našroubován na hrdlo, většinou nám voda „vychrstne“ ven i hrdlem, jak to ukazuje i fotografie. Je tedy jasné, že se pokus se vyplatí dělat nad kbelíkem či umyvadlem...

„Bonus“: Bublina v padající láhvi

Jako bonus přidejme pokus, který jsme „odkoukali“ od irských učitelů fyziky. Týká se chování kapalin v beztížném stavu, tedy za nepřítomnosti hydrostatického tlaku.

Pro pokus je vhodná malá plastová láhev; v originále byla použita hranatá. (Běžná PET láhev bývá příliš profilovaná a efekt v ní není dobře vidět.) Láhev naplníme vodou a necháme v ní trochu vzduchu. Pokud ji normálně držíme, je vzduch samozřejmě nahoře, nad vodorovnou hladinou.

Co ale vzduch v láhvi udělá v beztížném stavu? Z různých fotografií a líčení života v raketoplánech dnes již řada lidí ví, že „kus vody“ v beztížném stavu má podobu vznášející se koule. Co ale udělá bublina vzduchu v láhvi?

Pokus s naší lahví to ukáže. Stačí láhev vyhodit ke stropu a sledovat tvar bubliny. (Lze také s lahví v ruce povyskočit. Musíte ale vyskakovat dostatečně vysoko.) Pokus se vyplatí několikrát zopakovat. Uvidíte, že bublina vzduchu se také formuje do tvaru koule!

Dolní fotografie ukazuje bublinu v láhvi sice ne příliš zřetelně, ale přece. Bublina je vidět kousek pod oranžovým uzávěrem láhve.



Vysvětlení není složité: V padající láhvi je beztížný stav. A při něm (tedy za nepřítomnosti hydrostatického tlaku) se uplatní vliv povrchového napětí. A to se snaží, aby rozhraní voda-vzduch mělo co nejmenší plochu. Což je v případě, kdy bublina má tvar koule.

Závěr

Ať už si ze zde popsaných pokusů vyberete kterýkoli či kterékoli, přeji Vám, aby se Vám experimentování dařilo a přineslo radost Vám a motivaci a třeba trochu lepší vhléd do fyziky Vaším žákům. Budu vděčný, dáte-li mi vědět, které pokusy měly ohlas a byly Vám ve výuce užitečné. A pokud se Vám osvědčilo či osvědčí dělat některé experimenty jinak nebo vymyslíte jejich nové varianty, velmi rád se poučím z Vašich zkušeností – už proto, abychom nové nápady a zkušenosti mohli předávat budoucím učitelům fyziky, kteří u nás studují.

Literatura a odkazy:

- [1] Trna J.: *Fyzika v lékárnice*. In: Sborník z konference Veletrh nápadů učitelů fyziky 6. Ed. O. Lepil. Vydavatelství UP Olomouc, 2001. s. 15-20.
- [2] Dirlbeck J.: *Injekční stříkačka ve fyzice*. In: Sborník z konference Veletrh nápadů učitelů fyziky 3. Ed. K. Rauner. Pedagogická fakulta ZČU Plzeň 1998. ISBN 80-7043-233-0. s. 50-54
- [3] *Veletrh nápadů pro fyzikální vzdělávání. Pro učitele fyziky a nejen pro ně. (Souhrnný elektronický sborník na CD.)* Ed.: Dvořák L., Broklová Z. Prometheus, Praha 2005.
- [4] *Veletrh nápadů pro fyzikální vzdělávání. Pro učitele fyziky a nejen pro ně* Dostupné online na adrese <http://kdf.mff.cuni.cz/veletrh/sbornik/> [cit. 22. 11. 2007]
- [5] Rauner K. a kol.: *Fyzika 7. Pracovní sešit pro základní školy a víceletá gymnázia*. Fraus, Plzeň 2005. ISBN 80-7238-432-5.
- [6] Dvořák L.: *Pokusy s vodou*. In: Dílny Heuréky 2006-2007. Sborník konferencí projektu Heuréka. Ed.: Dvořák L. Vyjde v nakladatelství Prometheus.
- [7] Rauner K. a kol.: *Fyzika 7. Učebnice pro základní školy a víceletá gymnázia*. Fraus, Plzeň 2005. ISBN 80-7238-413-7.
- [8] Štefková M.: *Ověření platnosti Boyle-Mariotteova zákona pro vzduch*. In: Sborník z konference Veletrh nápadů učitelů fyziky 9. Svazek první. Pedagogická fakulta MU Brno 2004. ISBN 80-7315-084-0. s.49-50