

## Hrátky s povrchovým napětím a kapilaritou

JIŘÍ KOHOUT, PAVEL MASOPUST

Oddělení fyziky, Katedra matematiky, fyziky a technické výchovy,  
Fakulta pedagogická Západočeské univerzity v Plzni

### Abstrakt

*Ačkoliv povrchové napětí a kapilarita patří ke klasickým konceptům řešeným v rámci středoškolské fyziky, jsou zde stále některé otázky a nejasnosti týkající se výuky tohoto tématu (například ohledně směru povrchové síly v různých situacích, vztahu povrchové síly a povrchové energie apod.). S tím souvisí i výrazně zjednodušující předpoklady (ne vždy explicitně uvedené) při řešení některých typových příkladů z této oblasti. V rámci příspěvku bude vedle stručného teoretického rozboru potíží týkajících se této problematiky představeno několik souvisejících experimentů. Budou rovněž uvedeny netradičně pojaté laboratorní práce zaměřené na stanovení povrchového napětí.*

### Úvod

Struktura a vlastnosti kapalin patří ke klasickým tématům gymnaziální fyziky probíraným typicky ve 2. ročníku v rámci celku Molekulová fyzika a termika. Mezi výhody tohoto tématu patří vedle možnosti opřít se o žákovskou zkušenost a relativně nízké matematické náročnosti na SŠ úrovni (např. ve srovnání s předchozím tématem Struktura a vlastnosti plynů) rovněž poměrně značné množství divácky atraktivních experimentů realizovatelných s jednoduchými pomůckami. O tom svědčí i poměrně velký počet příspěvků věnovaných této problematice v předchozích ročnících Veletrhu nápadů učitelů fyziky<sup>1</sup>. Naopak problematickým aspektem může být to, že středoškolské pojetí je založeno na velmi výrazných zjednodušeních, která mohou ve svém důsledku vést ke zdánlivým rozporům a zmatení žáků (popř. i učitelů) při hlubším přemýšlení o povrchovém napětí a kapilaritě.

Velmi podrobný rozbor této problematiky je proveden v článku Sophocleouse [1], diskuze týkající se sporů o správnosti klasického odvození výšky

---

<sup>1</sup> V souhrnném sborníku z VNUF dostupném na <https://vnuf.cz/sbornik/klicova/> najdeme při hledání dle klíčových slov hned 19 příspěvků týkajících se nějakým způsobem povrchového napětí.

hladiny při kapilární elevaci či depresi na základě silové balance (rovnosti povrchové a tíhové síly) je poté provedena v článku Barozziho a Angeliho [2]. Zde uveďme, že problém se týká především směru povrchové síly. Ta by měla při klasickém zavedení povrchového napětí působit „dovnitř kapaliny“, při vysvětlování kapilarity se ale pracuje s jejím působením „vzhůru“ a pokud vysvětlujeme klasické pokusy s pohybem záparek po hladině, uvažuje se působení povrchové síly horizontálně v rovině kapaliny. Kombinace těchto přístupů může snadno vyvolat u přemýšlivého žáka pochybnosti a dotazy týkající se podstaty toho, co vlastně povrchové napětí je. Související otázky přitom nejsou v klasických učebnicích a materiálech vždy uspokojivě zodpovězeny. Cílem tohoto příspěvku je přispět alespoň částečně k ujasnění si těchto souvislostí a k experimentální podpoře výuky tématu. V první části tohoto článku se budeme věnovat konceptuálním aspektům problematiky, následně se zaměříme na netradiční experimenty a laboratorní práce, které lze v tomto směru realizovat.

### **Problémy s konceptem povrchové napětí a jejich možná řešení**

Jak již upozornil Bochníček [3] ve svém příspěvku z VNUF 2016, část problémů spojených s povrchovým napětím vychází z toho, že výklad je obvykle založen na povrchovém napětí jako síle působící na jednotku délky, ačkoliv strategicky výhodnější může být přístup založený na jeho chápání jako hustoty povrchové energie. Vysvětlení založená na minimalizaci plochy povrchu mohou být přitom pro žáky lépe uchopitelná. Příkladem může být třeba známý experiment s mincemi na hladině, které se seskupí vlivem povrchového napětí dohromady [3].

Jako zdroj problémů může působit i vysvětlování experimentů či příkladů s předmětem plovoucím na hladině, kdy se obvykle pracuje s nadlehčováním vlivem vertikálně působící povrchové síly<sup>2</sup>, uvažován je však i případ plovoucí loďky<sup>3</sup>, kdy její pohyb naopak určuje horizontální povrchová síla. S ohledem na to, že v obou případech se ve středoškolském přiblížení síla počítá stejným vztahem, vzniká přirozená otázka, proč je směr silového působení odlišný, což

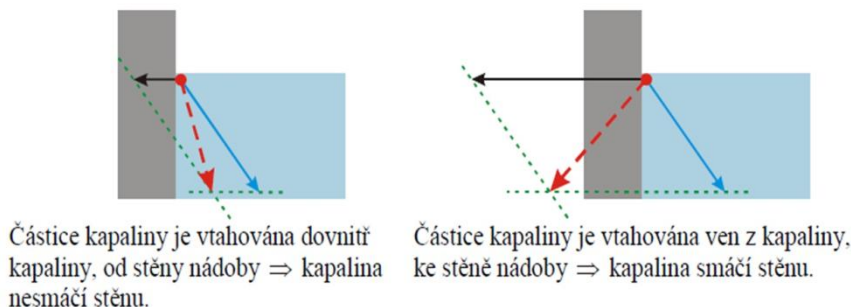
---

<sup>2</sup> Zde je třeba dávat pozor na to, že v případě drobné haléřové mince nedokáže povrchová síla kompenzovat tíhovou sílu a je třeba uvážit i sílu vztakovou, jak je detailně teoreticky i experimentálně rozebráno v [3] popř. uvedeno v řešené úloze dostupné na <https://reseneulohy.cz/1897/plovouci-padesatnik>

<sup>3</sup> Viz třeba úloha řešená na <https://reseneulohy.cz/342/korkova-lodka>

není v příslušných materiálech nijak komentováno<sup>4</sup>. Odpověď na tuto otázku dává detailní rozbor problému provedený v [4]. Z něj je patrné, že čistě vertikální směr má povrchová síla pouze v případě, kdy kapalina daný předmět dokonale nesmáčí a vůbec se neuplatní povrchové napětí pro rozhraní předmět-voda a předmět-vzduch. Podrobný rozbor je matematicky velmi náročný a není jej reálně projít a vysvětlit podrobně. Je však možné ukázat žákům alespoň obrázek a říci jim, že vertikální resp. horizontální směr povrchové síly jsou extrémními případy (vhodnými pro výpočty na SŠ úrovni), zatímco obecně je směr povrchové síly „někde mezi“ a výpočtově jde o velmi složitou problematiku mimo rámec SŠ. Za podstatné pokládáme i tento fakt rozhodně nezatajovat žákům. Říci, že povrchové napětí existuje pro libovolnou dvojici rozhraní, a to i v případě, že z časových důvodů nemáme prostor zmiňovat se o kontaktním úhlu, resp. problematice hydrofilních a hydrofobních materiálů.

Energetický přístup založený na tom, že povrchové napětí pro dané rozhraní je vlastně rovno povrchové energii vztahované na jednotku plochy se totiž může velmi dobře uplatnit při výkladu smáčivosti a kapilarity. (Ne)smáčivost je obvykle vykládána pomocí obr. 1 a argumentace na něm uvedeně.



Obr. 1 K výkladu smáčivosti  
(Převzato z [www.realisticky.cz](http://www.realisticky.cz), kapitola Kapilární jevy)

<sup>4</sup> Vzhledem k tomu, že horizontální směr síly je relevantní pro případy se zvýšeným (cukr) či sníženým (mycí prostředek) povrchových napětím, mohli by si žáci snadno vytvořit zcela mylnou představu, že u čisté vody je směr povrchové síly vertikální a příměš vede ke změně na směr horizontální.

Zde však narážíme na dva problémy. Jednak může přijít žákům velmi podivné, proč síla působící vlevo dolů má za následek stoupání molekul vzhůru<sup>5</sup>, jednak je zcela ignorován vliv plynu (s odkazem na jeho velmi malou hustotu). Rozhraní pevná látka-plyn a povrchová energie s ním spojená je však při energetickém vysvětlení zásadní, protože pokud by tato energie byla zanedbatelná<sup>6</sup>, smáčivost by vůbec nemohla nastat, neboť u ní dochází k nárůstu plochy obou zbylých rozhraní! Za smysluplnější tedy pokládáme vysvětlovat smáčivost na základě rozdílu povrchových napětí rozhraní pevná látka-kapalina a pevná látka-plyn. Pokud by byla obě napětí stejná, hladina bude kolmá na stěny nádoby. Je-li větší napětí pevná látka-plyn, je výhodné, aby se maximalizovala plocha rozhraní pevné látky a kapaliny, což odpovídá smáčivosti. V opačném případě je naopak výhodné zvýšit plochu rozhraní pevná látka-plyn, což odpovídá tomu, že kapalina daný povrch nesmáčí. Vysvětlení je možné provést kvalitativně, nebo (v případě více času a šikovné třídy) seznámit žáky i s kontaktním úhlem a Youngovou rovnicí ve tvaru

$$\sigma_{SG} - \sigma_{SL} = \sigma_{LG} \cos \theta, \quad (1)$$

kde  $\sigma_{SG}$  je povrchové napětí pro rozhraní pevná látka-plyn,  $\sigma_{SL}$  pro rozhraní pevná látka-kapalina,  $\sigma_{LG}$  pro rozhraní kapalina-plyn a  $\theta$  je kontaktní úhel mezi pevnou látkou a kapalinou.

Na stejném principu je pak možné vysvětlovat i kapilaritu, která je rovněž dána rozdílem povrchových napětí pro rozhraní pevná látka-plyn a pevná látka-kapalina. Pokud je větší první z nich, je energeticky výhodné zvětšit plochu rozhraní pevné látky s kapalinou a dojde tudíž ke kapilární elevaci. Pokud naopak nastane druhý případ, je výhodné tuto plochu zmenšit, což odpovídá kapilární depresi. Pokud by obě povrchová napětí byla shodná, nenastává ani jeden z případů. Je zajímavé odvodit na základě uvedených úvah vztah pro výšku  $h$  při kapilární depresi. Nejprve uvažme odvození na základě silové bilance, kde je tíhová síla na příslušný sloupec kapaliny v kapiláře kompenzována rozdílem povrchových sil pro obě uvažovaná rozhraní na obvodu kapiláry. Po úpravě s pomocí Youngovy rovnice dostáváme:

---

<sup>5</sup> Argument, že hladina se zakříví tak, aby povrch byl kolmý k výsledné síle a nedocházelo k pohybu v povrchové vrstvě, není v tomto směru asi příliš přesvědčivý.

<sup>6</sup> Ve skutečnosti je toto povrchové napětí obvykle největší z uvažovaných rozhraní. Například v [1] se udává pro konkrétní příklad hodnota 183 mN/m, zatímco pro pevná látka-kapalina je to 107 mN/m a pro kapalina-plyn klasických 73 mN/m. Z praktického hlediska se bohužel povrchová napětí rozhraní s pevnou látkou velmi obtížně měří.

$$(\sigma_{SG} - \sigma_{SL}) \cdot 2\pi r = mg \rightarrow \sigma_{LG} \cos\theta \cdot 2\pi r = \pi r^2 h \rho g \rightarrow h = \frac{2\sigma_{LG} \cos\theta}{\rho g r}, \quad (2)$$

kde  $g$  je tíhové zrychlení,  $r$  vnitřní poloměr kapiláry a  $\rho$  hustota kapaliny. To je (až na kosinus kontaktního úhlu, který je zpravidla zanedbáván) klasický středoškolský výsledek získaný z rovnosti kapilárního a hydrostatického tlaku. Konceptně je však třeba si uvědomit, že povrchové napětí voda-plyn se do vzorce dostalo až užitím Youngovy rovnice, primární příčina efektu je v rozdílu povrchových napětí pro rozhraní s pevnou látkou (jejich shoda garantuje nulovost kosinu kontaktního úhlu a tím i výšky hladiny  $h$ ). Zajímavá situace nastane, pokud na problém půjdeme přes energie z předpokladu, že úbytek povrchové energie při kapilární elevaci musí být roven přírůstku tíhové potenciální energie. S uvážením definičního vztahu pro povrchové napětí, polohy těžiště sloupce kapaliny v polovině výšky a Youngovy rovnice dostáváme:

$$\begin{aligned} (\sigma_{SG} - \sigma_{SL}) \cdot 2\pi r h_E &= mg \frac{h_E}{2} \rightarrow \sigma_{LG} \cos\theta \cdot 2\pi r h_E = \frac{\pi r^2 h_E \rho g}{2} \rightarrow \\ h_E &= \frac{4\sigma_{LG} \cos\theta}{\rho g r}. \end{aligned} \quad (3)$$

Přes energii se tedy dostáváme přesně k dvojnásobné hodnotě, než v předchozím případě. Jak tento zdánlivý rozpor interpretovat? Musíme si především uvědomit dynamickou povahu děje. Sloupec kapaliny začne stoupat vlivem povrchové síly a ve výšce  $h$  dle vztahu (2) se povrchová síla vyrovná s postupně rostoucí tíhovou silou sloupce kapaliny. Uvolněná povrchová energie se částečně přemění na potenciální tíhovou energii a částečně na kinetickou energii pohybu. Vlivem setrvačnosti výška vodního sloupce dosáhne až hodnoty  $h_E = 2h$ , kdy je kinetická energie nulová a tíhová potenciální energie sloupce kapaliny je právě rovna v souladu se zákonem zachování změně povrchové energie. Následně začne vlivem převahy tíhové síly nad silou povrchovou opět sloupec kapaliny klesat a cyklus se opakuje. Nastanou tedy oscilace, kdy se výška vodního sloupce mění v rozmezí od 0 do  $2h$  se střední hodnotou ve výšce  $h$ .<sup>7</sup> Z energetického hlediska se poté udržuje stálý součet povrchové, kinetické a tíhové potenciální energie, přičemž tyto tři druhy se vzájemně přeměňují. V praxi však takový efekt přirozeně nepozorujeme. Je to kvůli viskozitě, která

---

<sup>7</sup> Bylo by samozřejmě zajímavé se ptát na periodu těchto oscilací. Bohužel se ukazuje, že kmitání není harmonické a je popsáno složitou nelineární diferenciální rovnicí neumožňující rozumně analytické řešení a určení periody.

způsobí, že se oscilace prakticky okamžitě utlumí (nastane tzv. *aperiodický pohyb*) a sloupec kapaliny vystoupá ve skutečnosti do rovnovážné polohy ve výšce  $h$ . U kapaliny s nulovou viskozitou a při zanedbání tření o stěny kapiláry by však uvedený dynamický efekt, jehož vysvětlení je zcela mimo možnosti klasického odvození na základě rovnosti kapilárního a hydrostatického tlaku, měl projevit. Výše uvedený příklad je vhodný spíše pro nadané žáky v rámci opakovacího semináře, protože hezky propojuje kapilaritu s problematikou kmitání<sup>8</sup> a se zákonem zachování energie. Ukazuje však výhody přístupu založeného na energetické bilanci a zdůraznění významu povrchových energií pro jiná rozhraní, než je pouze kapalina-plyn.

### Zajímavé experimenty s povrchovým napětím

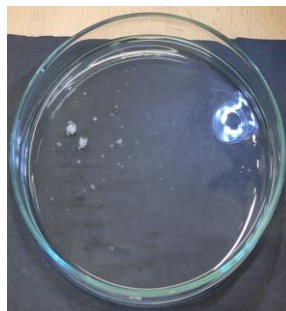
V této části představíme několik netradičních jednoduchých experimentů, které mohou rozšířit portfolio demonstrací spojených s problematikou povrchového napětí. Vždy bude uveden návod k provedení experimentu, stručné vysvětlení a další doplňující poznámky.

#### Kafr na vodě

*Realizace:* K provedení tohoto pokusu stačí kousek (přírodního či syntetického) kafru, který lze sehnat v řádu desetikorun. Jednou možností je naloupat malé kousky kafru, dát je do misky s vodou a pozorovat jejich chaotický pohyb. Možná ještě zajímavější je vytvořit malou lodičku např. ze dřeva a na jejich zadní část opatrně umístit kousek kafru. Následně je možné pozorovat, jak lodička jezdí kolem dokola po okraji misky.

*Vysvětlení:* Uvolněné molekuly kafru snižují povrchové napětí vody. V důsledku toho dochází k pohybu do míst, kde je napětí vyšší. Je to stejný princip jako u klasického pokusu s mycím prostředkem a zápalkami, které „utečou“ z místa, kam jsme kápli tento prostředek rovněž snižující povrchové napětí.

*Poznámky:* Uvedená vlastnost kafru je známá již téměř dvě století a jde o klasický příklad samočinně se pohybujících předmětů (*self-propelled objects*).



Obr. 2 Kafr na vodě

---

<sup>8</sup> To se obvykle probírá až po molekulové fyzice.

Modelování pohybu kousků kafru je ale náročné. Při vhodném geometrickém uspořádání by tento materiál mohl dle [5] sloužit jako signální dioda. Nejde tedy jen o zajímavou hračku, ale o princip aktuálně zkoumaný fyzikálními chemiky a potenciálně využitelný v praxi.

### Vodní zvony

*Realizace:* Při puštění proudu vody na plochu k němu kolmou (např. podstavu válečku), může za určitých podmínek vzniknout vodní útvar připomínající zvon. K prozkoumání tohoto efektu potřebujeme pouze kohoutek s vodou a váleček. Je možné prozkoumat, jak různé parametry jako objemový tok vody, výška kohoutku nad válečkem či poloměr válečku ovlivňují tvar zvonu. Za určitých podmínek je možné pozorovat ostrý zlom vody. Je možné také sledovat, jak se tvar zvonu mění v závislosti na tom, zda pouštíme studenou či teplou vodu.



Obr. 3 Vodní zvon

*Vysvětlení:* Podmínky pro vznik vodního zvonu a jeho případný tvar jsou velice komplexní a na SŠ úrovni těžko vysvětlitelné. Klíčovými parametry je přitom rychlost toku před dopadem na překážku a poměr průměrů vodního proudu ku válečku  $D_{VP} : D_V$ . Je však možné se zaměřit čistě na vliv povrchového napětí. Žáci by si měli uvědomit, že povrchové napětí je zde vlastně nepřítelem vzniku vodního zvonu, protože je s ním spojená dodatečná povrchová energie pro rozmezí voda-vzduch (a u vodního zvonu máme dva povrchy). Detailní řešení problému uvedené např. v [6] skutečně ukazuje, že při nulovém povrchovém napětí by vodní zvon vznikl při jakékoliv kombinaci jiných para-

metrů, zatímco při nekonečně velkém napětí by nevznikl vůbec nikdy<sup>9</sup>. Rovněž se potvrzuje, že menší povrchové napětí odpovídá většímu poloměru i délce zvonu, takže u teplé vody by tyto parametry měly být za jinak stejných podmínek větší. Do jisté míry je to pozorovatelné, problémem je však nastavení zcela stejného toku u teplé a studené vody.

*Poznámky:* Stejně jako v předchozím případě se fyzikové nevěnují tomuto tématu řešenému poprvé již v 30. letech 19. století Savartem jen pro zábavu a pro potěšení z hezkých tvarů vodních zvonů. Porozumění chování volných vrstev kapaliny je důležité například u některých technik přípravy tenkých vrstev nebo výrobě papíru [6]. Úvahy týkající se kvantitativního řešení problému s vodním zvonem byly také hezky využity při řešení dynamiky čokoládové fontány jako vhodného systému pro demonstraci principů mechaniky nenewtonských kapalin [7].

### Propadání předmětu mýdlovou blánou

*Realizace:* Pomocí mýdlové vody nebo bublinového roztoku si do rámečku natáhneme blánu. Následně těsně nad ní umístíme tenkou jehlu či špendlík hrotem dolů a necháme jej propadnout. Blána překvapivě zůstane nepoškozená. Můžeme ji nechat propadnout bez poškození i další předměty (např. malou matku) případně ji špendlíkem velmi rychle propíchnout. Pokud máme více času, můžeme zkoumat podrobněji, za jakých podmínek blána vydrží a za jakých nikoliv.

*Vysvětlení:* Uvedený efekt byl pozorován již v roce 1904 *Lucienem Bullem* [8]. Jednoduché vysvětlení není k dispozici, stabilita blány vychází z rovnováhy mezi silami setrvačnosti a povrchovým napětím bojujícím proti deformaci vrstvy spojené se zvýšením povrchové energie. Detailním studiem tohoto jevu v disertační práci [8] bylo prokázáno, že tuto rovnováhu je možné kvantifikovat pomocí tzv. *Weberova čísla* známého z mechaniky tekutin. S jeho pomocí je možné pro danou situaci stanovit, jak velké a rychlé objekty mohou blánou projít bez toho, aby došlo k jejímu zničení.

*Poznámky:* Uvedený experiment může sloužit jako demonstrace tzv. *samoopravných materiálů*. Hezké je sledovat průběh interakce mezi předmětem

---

<sup>9</sup> Při dané hodnotě povrchového napětí kapaliny lze v [6] najít vztahy přímo umožňující pomocí tzv. Reynoldsova a Weberova čísla stanovit interval, v němž se poměr  $D_{VP}: D_V$  musí nacházet, aby byl vodní zvon pozorovatelný.



a blánou (či bublinou) pomocí rychloběžné kamery. Takový záznam pro případ kapek vody prolétávajících bublinou je k dispozici na <https://www.youtube.com/watch?v=vlvny-n-3aw>.

### **Zahřátí či ochlazení silikonového oleje na kovové desce**

*Realizace:* Připravíme si trochu silikonového oleje, dostatečně tenký kovový plech z kovu s vysokou tepelnou vodivostí (např. hliníková folie) a páječku (ne s ostrým hrotem). Olej nalijeme na plech a necháme jej roztéct. Následně budeme zahřívát spodní stranu plechu páječkou, kterou budeme zvolna pohybovat. V místech, kde se zrovna páječka nachází, se olej rozuteče do okolí. Následně můžeme vzít kostku ledu a plech zesponu chladit. Na chlazených místech se naopak olej bude kupit a pohybem kostky ledu je možné vytvářet zajímavé obrazce.

*Vysvětlení:* Při vyšší teplotě klesá povrchové napětí a kapalina má tendenci tato místa opouštět, protože je to energeticky výhodné. Naopak nižší teplota odpovídá vyššímu povrchovému napětí a kapalina se v těchto místech kupí.

*Poznámky:* K tomu, aby experiment fungoval, je třeba nalít dostatek silikonového oleje (s vodou se nám jej realizovat nepodařilo) a mít páječku, která hřeje v trochu větší ploše. Velice hezky je tento efekt vidět ve videu dostupném na <https://www.youtube.com/watch?v=MUImkSnrAZM> ve 24. minutě. Takto hezky se nám jej provést nepodařilo, základní efekt byl však patrný.

### **Laboratorní práce zaměřené na povrchové napětí a kapilaritu**

Zde uvedený dva náměty na netradičně pojaté laboratorní práce týkající se povrchového napětí. V obou případech nám jde o stanovení povrchového napětí kapalin, jednou na základě přetečení mince, podruhé pomocí vlastní tenkostěnné kapiláry a vytlačení vody z ní.

#### **Povrchové napětí pomocí mince (penny experiment)**

*Cíl:* Cílem této laboratorní práce je netradiční porovnání povrchových napětí různých kapalin (na rozhraní se vzduchem) s jednoduchými pomůckami.

*Teorie:* Povrchové napětí se ve středoškolské fyzice obvykle měří na základě výšky, do které vystoupí hladina v kapiláře (viz další námět na laboratorní práci) nebo tzv. *stalagnometrickou metodou* z hmotnosti či počtu kapek odkapávajících z tenké trubičky. Druhá metoda je přitom standardně používána poměrově k určení neznámého povrchového napětí ve chvíli, kdy známe povr-

chové napětí jiné kapaliny (typicky vody). Platí totiž, že hmotnosti kapek odkapávajících z dané trubičky jsou v poměru jejich povrchových napětí<sup>10</sup>.

První z uvedených metod vyžaduje poměrně přesné změření výšky výstupu hladiny v kapiláře, což může být technicky problematictější. Ve druhém případě je zase třeba upevňovat stalagmometr do držáku. Na internetu je možné najít jednodušší postup k porovnání povrchových napětí založený na určení počtu kapek, které můžeme nakapat na drobnou minci předtím, než kapalina přeteče její okraj<sup>11</sup>. Vzhledem k tomu, že přetečení brání povrchová síla, předpokládá se, že větší počet kapek odpovídá většímu povrchovému napětí a v některých případech je zde přímo uvažována přímá úměra. Tento postup však není zcela korektní, protože vychází z nesprávného předpokladu, že hmotnosti kapek různých kapalin jsou stejné. Uvedený problém můžeme snadno překonat, když místo kapátka použijeme injekční stříkačku s dostatečně jemnou stupnicí a dokážeme tak přesně určit objem kapaliny umístěné na minci před přetečením.

*Postup realizace a pomůcky:* K provedení budeme potřebovat drobnou minci (např. dvoukorunu), injekční stříkačku s jemnou stupnicí (ideálně inzulínovou stříkačku dostupnou za pár korun v lékárně, z níž jde snadno sundat jehla), a různé kapaliny (např. vodu různých teplot, mýdlovou vodu, líh, olej). Do stříkačky nasajeme kapalinu přesně na některou z rysek stupnice a následně ji necháme kapat na osušenou minci. Počítáme kapky a sledujeme, při jakém počtu kapek kapalina přeteče okraj mince. Pro každou kapalinu provedeme alespoň tři měření a určíme aritmetický průměr.

*Zpracování výsledků a metodické poznámky:* Ze zjištěného objemu kapaliny a počtu kapek pro dvě různé kapaliny můžeme snadno určit kvantitativně poměr povrchových napětí dvou zvolených kapalin pomocí vztahu

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{V_1 \rho_1 n_2}{V_2 \rho_2 n_1} \quad (4)$$

---

<sup>10</sup> Podrobnosti např. na [https://www.vfu.cz/files/3130\\_74\\_TLF01\\_Mereni\\_povrchoveho\\_napeti\\_stalagmometrickou\\_metodou.pdf](https://www.vfu.cz/files/3130_74_TLF01_Mereni_povrchoveho_napeti_stalagmometrickou_metodou.pdf)

<sup>11</sup> V češtině je uvedené popsáno např. na <https://miniveda.cz/povrchove-napeti-vody-aneb-kolik-toho-unese-mince/>. V angličtině se dle hodnoty typicky užívané mince obvykle označuje jako penny experiment, viz <https://www.youtube.com/watch?v=6YGLfZG5IEQ>

kde  $\sigma$  je povrchové napětí,  $V$  odkapaný objem,  $\rho$  hustota kapaliny a  $n$  počet kapek, přičemž index označuje, zda se jedná o první či druhou kapalinu. Poměry pro různé dvojice kapalin srovnáme s tabulkovými hodnotami. Z metodického pohledu je třeba říci, že princip měření je vlastně stejný jako u klasické stalagmetrické metody a vzorec (4) by samozřejmě fungoval i v případě, že by se nejednalo o objemy do přetečení mince. Výhoda zde prezentovaného přístup spočívá v jednoduchosti a rychlosti (pokud měření probíhá ve skupinách, mohou různí žáci snadno měřit souběžně různé kapaliny) a také ve vyšší zábavnosti měření, protože žáci čekají, kdy dojde k přetečení mince, přímo pozorují menisky kapalin držené povrchovou silou a i bez výpočtů mohou čistě pohledem poznat, že voda bude mít asi větší povrchové napětí než líh apod. Metoda je zároveň dostatečně citlivá například na to, aby byl patrný rozdíl mezi studenou a teplou vodou. Chyby jsou dány tím, jak jemná je stupnice použité stříkačky, roli může sehrát (na rozdíl od stalagmetrické metody) také různé držení stříkačky při odkapávání.

### Povrchové napětí s vyrobenou tenkou kapilárou

*Cíl:* Cílem laboratorní práce je stanovit absolutní hodnotu povrchového napětí pro danou kapalinu (typicky vodu) s pomocí vlastnoručně vyrobené tenké kapiláry, zjistit, kolika kapkami objem vody v kapiláře odkape, a porovnat výsledek s teorií.

*Teorie:* Jak již bylo uvedeno u předchozí laboratorní práce, určování povrchového napětí na základ kapilární elevace patří ke klasickým laboratorním pracím na SŠ, kdy se výsledná hodnota stanoví následujícím způsobem z rovnosti hydrostatického a kapilárního tlaku:

$$p_k = p_h \rightarrow \frac{2\sigma}{r} = \rho gh \rightarrow \sigma = \frac{\rho grh}{2}, \quad (5)$$

kde  $g$  je tíhové zrychlení,  $r$  vnitřní poloměr kapiláry,  $\rho$  hustota kapaliny a  $\sigma$  povrchové napětí pro rozhraní kapalina-vzduch. V komerčně dostupných kapilárách však hladina nevystoupí s ohledem na poměrně velký poloměr příliš vysoko, což měření komplikuje. Je však možné využít mezipředmětových souvislostí s chemií, kde se žáci již v 1. ročníku vyššího gymnázia často učí práci se sklem zahrnující mimo jiné i výrobu kapilár (které se však následně nevyužijí). Vlastní výrobou je možné snadno získat kapiláry o velmi malém poloměru, v nichž hladina vystoupí podstatně výš. Dále je možné z těchto kapilár nechat kapalinu odkapat a zjišťovat, kolika kapkami odkape. Zjednodušená teorie vycházející z toho, že kapka odkápné ve chvíli, kdy povrchová síla  $F_p$  je vyrovnána silou tíhovou  $F_G$  a její poloměr je roven

poloměru kapiláry zde vede ke značně neintuitivnímu výsledku, že veškerá voda z kapiláry by měla odkápnout v rámci jediné kapky. Pro hmotnost vody v kapiláře  $ma$  zároveň hmotnost jedné kapky totiž platí:

$$m = \rho V = \rho \pi r^2 h = \rho \pi r^2 \cdot \frac{2\sigma}{\rho g r} = \frac{2\pi r}{g} \rightarrow mg = 2\pi r \rightarrow F_G = F_p. \quad (6)$$

*Postup realizace a pomůcky:* K provedení laboratorní práce je třeba mít vedle měřené kapaliny skleněné trubičky, plynový kahan, mikrometr a pravítko. V prvním kroku žáci nahřejí skleněnou trubičku nad kahanem a rychlým pohybem vytáhnou kapiláru o malém vnitřním průměru. Je přitom třeba dávat pozor na bezpečnost práce tak, aby se o rozžhavené sklo nepopálili (trubičku držet dostatečně daleko od místa nahřívání). Ke stanovení většího průměru vytažené kapiláry užijeme mikrometr, přičemž vnitřní průměr (a poloměr) stanovíme z předpokladu, že poměr vnitřního a většího průměru je u vytažené kapiláry stejný jako u původní skleněné trubičky, kde jsou tyto hodnoty známy od výrobce. Následně již můžeme vytaženou kapiláru ponořit do nádoby s vodou a změřit pravítkem výšku kapilární elevace  $h$  (u dostatečně tenkých vytažených kapilár není problém dosáhnout hodnot 5-10 cm). V posledním kroku jemným poklepáváním na konec kapiláry vytažené z vody budeme vytlačovat vodu z ní ven a pozorovat, kolik kapek se na jejím konci vytvoří a odkápnou.

*Zpracování výsledků a metodické poznámky:* Povrchové napětí stanovíme pomocí vzorce (5). Dále ověříme, do jaké míry je splněn teoretický předpoklad, že veškerá voda z kapiláry by měla odkápnout v rámci jediné kapky. Zhodnotíme také chyby měření, kde může sehrát roli především to, že není snadné vytáhnout kapiláru, která bude mít po celé potřebné délce stejný vnitřní poloměr. Z metodického hlediska je práce originální v propojení dovedností z chemie (práce se sklem) a fyziky (měření povrchového napětí). Zároveň dává do souvislosti dvě různé metody měření, a to na základě kapilární elevace a metodu stalagmometrickou (v zjednodušeném chápání vycházejícím ze shody povrchové a tíhové síly při odtržení kapky). Navzdory uvedenému zjednodušení a neintuitivnosti předpokladu o jedné kapce experiment v tomto ohledu vychází v dobrém souladu s teorií. Samotné měření je poměrně rychlé, je však potřeba mít určitý cvik při vytahování kapilár a rovněž je třeba být velmi opatrný při měření jejich průměru mikrometrem tak, aby nedošlo k jejich zničení. Z tohoto důvodu je asi výhodnější realizovat takto pojatou práci v dvouhodinové laboratorní cvičení, pokud je k dispozici.

## Závěr

V teoretické části příspěvku byly uvedeny některé náměty na to, jak zlepšit výuku týkající se povrchového napětí a kapilarity větším kladením důrazu na energetické chápání povrchového napětí jako hustoty energie pro dané rozhraní. V experimentální části jsou poté uvedeny náměty na čtyři netradiční experimenty a dvě laboratorní práce k tomuto tématu, které se dají většinou realizovat s jednoduchými pomůckami, a přitom demonstrují důležité a i pro aplikace důležité problémy a poznatky.

## Literatura

- [1] Sophocleous, M. *Understanding and explaining surface tension and capillarity: an introduction to fundamental physics for water professionals*. Hydrogeol. J. 18, No 4 (2010), p. 811-821.
- [2] Barozzi, G. S., Angeli, D. *A note on capillary rise in tubes*. Energ. Proced. 45 (2014), p. 548-557.
- [3] Bochníček, Z. *Několik poznámek o povrchovém napětí*. In: *Veletrh nápadů učitelů fyziky 21: Sborník z konference*. Eds.: T. Milář, J. Válek. Masarykova univerzita, Brno 2016. ISBN 978-80-210-8465-0. Dostupné online: <https://katedry.ped.muni.cz/vnuf21/wpcontent/uploads/sites/35/2017/02/sbornikvnuf21.pdf>
- [4] Kolář, K. *Jehla na vodě. Úloha V.1 12. ročníku Fyzikálního korespondenčního semináře*. Dostupné online: [https://fykos.cz/media/rocnik12/ulohy/pdf/uloha12\\_5\\_1.pdf?cache=](https://fykos.cz/media/rocnik12/ulohy/pdf/uloha12_5_1.pdf?cache=)
- [5] Gorecki, J., et al. *Unidirectional motion of a camphor disk on water forced by interactions between surface camphor concentration and dynamically changing boundaries*. Phys. Chem. Chem. Phys. 19, No 28 (2017), p. 18767-18772.
- [6] Brahma, M., Das, P. K., Ghosahl, K. *Unique shapes of liquid bells as a function of flow parameters: A brief overview and some new results*. Eur. J. Mech.B Fluids. 50 (2015), p. 98-109.
- [7] Townsend, A. K., Wilson, H. J. *The fluid dynamics of the chocolate fountain*. Eur. J. Phys. 37, No 1 (2015), Article 015803.
- [8] Bryston, J. A. *Soap Bubbles and Solid Spheres: Collisions and Interactions*. Ph.D. thesis, Brigham Young University. Dostupné online: <https://scholarsarchive.byu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4015&context=etd>