

## Několik poznámek o povrchovém napětí

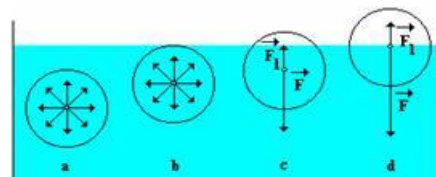
ZDENĚK BOCHNÍČEK

Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity, Brno

V příspěvku je navržen alternativní středoškolský výklad vzniku povrchového napětí včetně doprovodných experimentů. Jsou uvedeny málo zmiňované důsledky existence povrchové energie a podrobněji je rozebrán problém plavání drobných předmětů na vodní hladině.

### Poznámka 1: Výklad povrchového napětí

Klasický učebnicový výklad vzniku povrchového využívá existence sil mezimolekulárního působení a jejich asymetrie v blízkosti hladiny. Výklad je doprovázen obrázkem 1 (nebo obrázkem podobným)



Obr. 1

Tento způsob výkladu má minimálně dvě slabá místa:

1) Výslednice sil působící na jednotlivou molekulu v povrchové oblasti nemůže mít směr pod hladinu kapaliny. To by podle druhého Newtonova zákona způsobilo zrychlení molekuly dovnitř kapaliny. V klidné kapalině jsou molekuly v silové rovnováze (zde neuvažujeme chaotický tepelný pohyb). Tento rozpor s Newtonovým zákonem je obvykle řešen tvrzením, že zakreslené šipky ukazují pouze přitažlivé síly, nikoliv výslednice všech sil. Stěží lze ovšem zdůvodnit, proč pouze přitažlivé síly jsou významné. V mechanice je vždy rozhodující výslednice všech působících sil.

2) I kdybychom připustili, že asymetrie přitažlivých sil je podstatná, nevysvětlíme tak existenci síly povrchového napětí, která leží v rovině povrchu. Existence síly se zdůvodňuje buď energetickými úvahami, nebo jako důsledek experimentu, například s rámečkem a pohyblivou příčkou.

K výkladu příčin vzniku povrchového napětí je možné použít alternativní způsob, který namísto sil využívá energetické úvahy. Autor tento postup používá řadu let ve fyzice pro studenty chemie a biochemie na Přírodovědecké fakultě MU. Vzhledem k reálným fyzikálním znalostem těchto studentů je výklad veden tak, že by měl být srozumitelný i pro žáky středních škol.

### Alternativní výklad vzniku povrchového napětí

Výchozím bodem je opět mezimolekulární (meziatomární) interakce, ale tentokrát se použije energetický popis. Žáci znají z chemie graf závislosti potenciální energie mezi dvěma atomy či molekulami, a také pojem vazebná energie. Argumentační sled je následující:

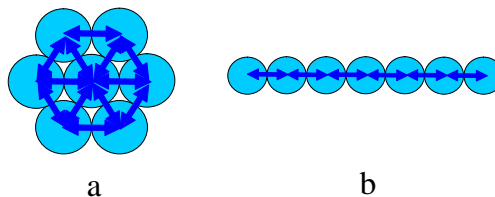
1) Každé vytvoření vazby znamená uvolnění energie, tedy systém sníží svoji potenciální energii.

2) Dosažení minimální potenciální energie je obecně cílený stav. Můžeme použít následující analogii: To, že těleso padá v tíhovém poli k zemi, můžeme vysvětlit dvěma způsoby

a) působí tíhová síla – tradiční postup

b) v menší výšce má těleso menší potenciální energii a to je stav, který příroda obecně upřednostňuje.

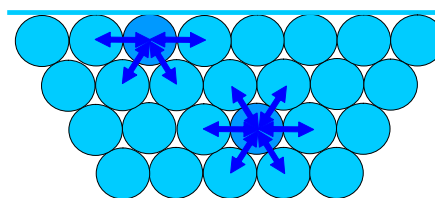
3) Je-li vznik každá vazba doprovázen snížením energie, pak pokles energie bude tím větší, čím více vazeb se vytvoří. Kdybychom například měli sedm v rovině volně pohyblivých molekul se vzájemnou přitažlivou interakcí, vytvoří spíše konfiguraci (a) než (b), protože v pozici (a) vytváří celkem 12 vazeb, zatímco v pozici (b) jen 6. viz obrázek 2, a tedy pozice (a) má nižší celkovou potenciální energii.



Obr. 2

Tuto část výkladu lze doplnit velmi pěkným experimentem. Volně pohyblivou molekulu znázorňuje drobná mince plovoucí na vodní hladině, přitom mezi blízkými mincemi působí přitažlivá síla. Pokud umístíme na hladinu do vzájemné blízkosti několik mincí, pravděpodobně se spontánně seskupí do tvaru blízkého s obrázkem (a). Pokus provádíme ve větší Petriho misce na zpětném projektoru, takže je velmi dobře sledovatelný i v početnějším publiku.

4) Molekuly v objemu kapaliny jsou obklopeny sousedními molekulami ze všech stran, vytvořily tedy maximální počet chemických vazeb a nejvíce snížily svoji potenciální energii. Zatímco molekuly v blízkosti povrchu tolik vazeb nenaváží a nedokáží tedy snížit energii na teoretické minimum, viz obrázek 3. S existencí povrchu (obecněji rozhraní) je tak spojena existence „energie navíc“. Říkáme jí povrchová energie a je zcela přirozené, že její velikost je přímo úměrná ploše povrchu. Konstantou úměrnosti je materiálová konstanta nazývaná povrchové napětí.

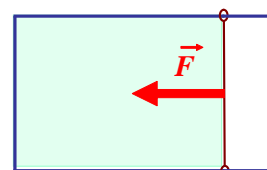


Obr. 3

$$E_s = \sigma \cdot S$$

5) Existenci síly povrchového napětí vysvětlíme na základě souvislosti mezi silou a mechanickou prací: Kapalina se snaží zmenšit velikost svého povrchu, Jaký má tedy směr síla, kterou kapalina musí působit na pohyblivou příčku v pokusu s rámečkem? Takovou, jaký je vyznačený směr na obrázku.

Vztah mezi velikostí této síly a povrchovým napětím se pak již odvodí snadno známým způsobem.



Obr. 4

Uvedený postup je sice argumentačně zdlouhavější, než obvyklý výklad, nemá však výše zmíněná slabá místa. Dle mínění autora má navíc následující výhody:

- a) Využívá znalostí o chemických vazbách z chemie, a tak prohlubuje mezipředmětové vztahy.
- b) Zdůrazňuje obecný koncept směřování fyzikálních systémů do minima potenciální energie.
- c) Připomíná a aplikuje souvislost mezi silou, mechanickou prací a změnou energie.

## Poznámka č 2: Jevy související s povrchovým napětím

Povrchové napětí je v učebnicích součástí vlastnosti kapalin, ale ani tradiční ani zde uvedený způsob výkladu není omezen pouze na kapalnou fázi, všechny argumenty lze použít i na povrch pevných látek, obecně tedy na rozhraní kondenzovaných fází. Tato skutečnost bohatě rozšiřuje množství jevů souvisejících s povrchovým napětím, než jsou jevy obvykle zmiňované v učebnicích. Uvedeme několik příkladů.

### Nukleace nové fáze

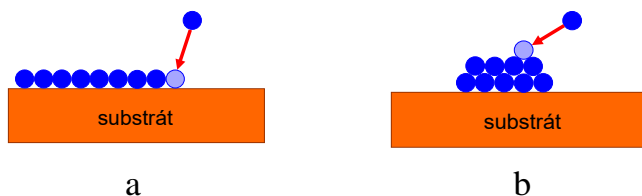
Nukleace nové fáze probíhá na samém počátku fázové změny. Současně se vznikem zárodku totiž vzniká i rozhraní původní a nové fáze, což zvyšuje energii systému a tvoří bariéru pro fázovou změnu. Bližší informace lze nalézt například v [1].

Nečistoty nebo různá poškození povrchu snižují výšku energetické bariéry, a tak usnadňují vznik zárodku. Tento proces se nazývá heterogenní nukleace. S heterogenní a homogenní nukleací souvisí řada více či méně známých jevů:

- existence přechlazené a přehřáté vody a jejich náhlé ztuhnutí či var
- vznik proudu bublinek na stěnách nádob se sycenými nápoji
- vznik oblačnosti (londýnská mlha)
- zahřívací polštářky
- apod.

### Depozice tenkých vrstev

Technologie přípravy tenkých vrstev je v dnešním průmyslu zcela klíčová. Lze připravit vrstvy s atomárně rovným rozhráním. Při růstu vrstvy jsou však zcela podstatné povrchové energie existujících rozhraní, takže vrstva může spontánně růst po jednotlivých rovinách anebo v ostrůvcích (obrázek 5a a 5b).



Obr. 5

## Biomembrány

Biomembrány jsou tvořeny molekulami zvanými fosfolipidy, jejichž jedna část je tzv. hydrofilní a druhá hydrofobní. Ve světle předchozí argumentace lze říci, že povrchová energie rozhraní vody a hydrofobní části je velká, zatímco rozhraní vody a hydrofilní části má energii malou. Proto molekuly přednostně vystavují vodnímu prostředí hydrofilní část a skrývají před vodou část hydrofobní (koncept dosažení minima potenciální energie).

### Sání vody do vysokého stromu

Ve kmeni stromu je spojitý sloupec vody, kterým je voda dopravována do všech částí rostliny. Voda je držena ve sloupci silou povrchového napětí vody v mikroskopických pórech listů. Pokud je sloupec vody vyšší než 10m, znamená to, že je v něm záporný tlak (záporná hodnota v pascálech, nikoliv pouze podtlak oproti atmosférickému tlaku). Kapalina snese záporný tlak, pokud je v ní potlačen vznik bublinek páry, podobně jako v přehřáté vodě. Povrchové napětí tedy umožňuje sání vody do vysokých stromů dvěma mechanismy: kapilárním tlakem udrží vysoký sloupec vody a současně umožní, že v tomto sloupci při záporném tlaku nezačne voda vřít.

### Poznámka č 3: Plavání na vodní hladině

Jedním z příkladů, na kterém se demonstruje existence povrchového napětí, je plavání drobných předmětů na vodním povrchu, například mince, jehly či ve volné přírodě vodoměrky. Přesto je tento jev někdy nesprávně interpretován, protože samotná síla povrchového napětí by v některých případech k plavání nepostačovala. Ukážeme si to na jednom příkladu.

Stará 10 haléřová mince má průměr 15,5 mm a hmotnost 0,6 g a snadno ji na vodní hladinu umístíme. Povrchové napětí bude nadnášet minci maximální silou, pokud bude vodní hladina mít v kontaktu s mincí svislý směr, viz obrázek 6. Celkovou sílu povrchového napětí pak spočítáme jako

$$F = 2\pi r\sigma = 2 \cdot \pi \cdot 0,00775 \cdot 0,0728 = 3,55 \cdot 10^{-3} \text{ N},$$

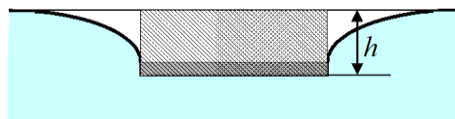
což je asi polovina síly potřebné pro kompenzaci tíhové síly působící na minci. V případě těžších mincí, jako například 20 hal a 50 hal je situace ještě nepříznivější. Přesto všechny tyto mince na vodní hladině bez problémů plavou.



Obr. 6

Je tedy zřejmé, že k vysvětlení plavání lehkých předmětů samotné povrchové napětí nepostačuje, i když je nepochybně nezbytné (kápneme-li na hladinu trochu jaru, mince se ponoří). Musí tam být nějaký jiný zdroj síly, který se k síle povrchového napětí přičítá.

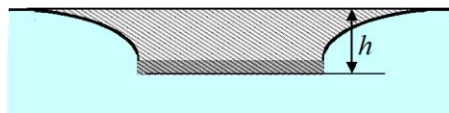
Je to Archimédův vztlak. Dno mince je v hloubce  $h$ , ve které je hydrostatický tlak  $h\rho g$ . Na horní straně mince je hydrostatický tlak nulový. Síla Archimédova vztlaku je rovna  $h\rho gS$ , kde  $S$  je plocha podstavy mince. Jinak řečeno hydrostatická vztlaková síla je rovna tíhové síle vyšrafovaného objemu kapaliny z obrázku 7. Celkovou sílu, kterou je mince nadnášena, můžeme zapsat jako



Obr. 7

$$F = 2\pi r\sigma + h\rho gS$$

Na situaci je možné pohlédnout ještě z jiné stránky. Můžeme si představit, že mince spolu s povrchovou blánou tvoří stěny fiktivní „lodičky“, která plave výhradně díky Archimédovu vztlaku. Vztlaková síla je pak rovna tíhové síle objemu tvořeného objemem celé prohlubně vodní hladiny plus objemu vlastní mince, tedy vyšrafovanému objemu z obrázku 8.



Obr. 8

Při tomto jevu musí být ve statické rovnováze nejen mince, ale i povrch kapaliny. Protože zde existuje volná hladina i v nižší úrovni, než je nezakřivený volný povrch vody, musí být hydrostatický tlak nějak kompenzován. I tuto funkci plní povrchové napětí, a to prostřednictvím zakřivení povrchu. Je známo, že v kapce vody je kapilární tlak roven

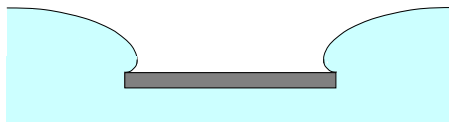
$$p = \sigma \frac{2}{r} \quad \text{pro kouli,} \quad \text{resp. } p = \sigma \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad \text{pro obecný tvar,}$$

kde  $r_1$  a  $r_2$  jsou principiální poloměry křivosti v daném bodě na povrchu. Za předpokladu, že poloměr mince je mnohem větší, než poloměr sklenutí menisku lze psát

$$p = \sigma \frac{1}{r} = mgh.$$

Výše uvedená rovnice současně vyjadřuje, že kapilární tlak musí být z důvodů statické rovnováhy roven hydrostatickému tlaku v dané hloubce  $h$ . S hloubkou tedy musí přímo úměrně růst zakřivení povrchu kapaliny.

Na obrázcích 6, 7 a 8 je znázorněna situace, kdy je svislá složka síly povrchového napětí maximální. Minci lze ale ponořit ještě hlouběji. Hladina se pak sklání k hornímu povrchu mince. Mezní ponoření nastane, až je hladina tečná k povrchu mince, viz obrázek 9, pak se mince zaplaví. I zde s rostoucí hloubkou roste zakřivení povrchu kapaliny.



Obr. 9

## Experiment

Síly působící na těleso vtačované do povrchové vrstvy kapaliny lze dobře demonstrovat v jednoduchém experimentálním uspořádání. Sílu měříme pomocí citlivých digitálních vah, citlivost minimálně 0,01g. Byl použit přípravek zobrazený na obrázku 10. Tělísko, mince, bylo upevněno na konci tyčky, která byla zavěšena na otočnou rukojeť

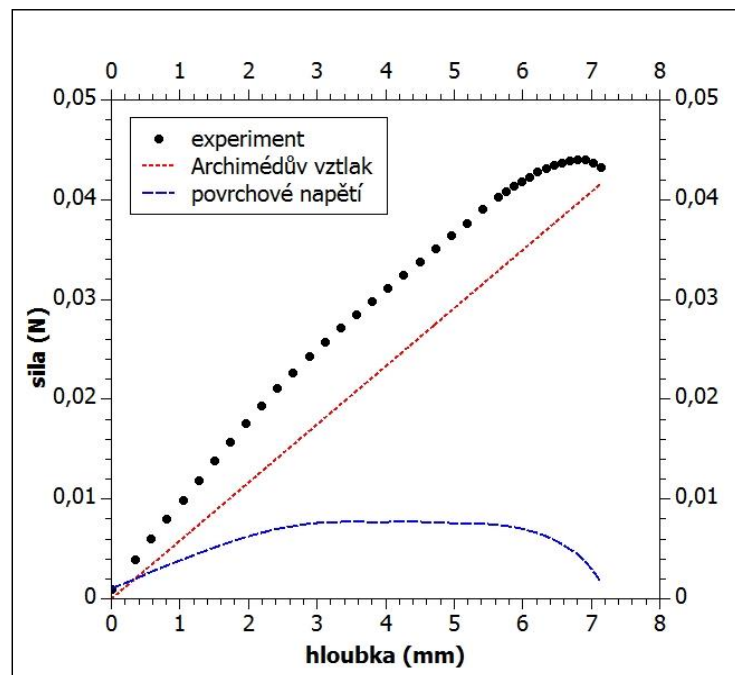
mikrometru. Mikrometr byl pevně uchycen k chemickému stojanu. Šroubováním mikrometru vlačujeme tělísko do kapaliny a váhami, na kterých je položena nádobka s vodou, měříme sílu. Výsledek měření s 50 Kč mincí je na obrázku 11.

Vidíme, že při vlačování mince lze rozlišit tři oblasti:

- 1) Od počátku klesá kontaktní úhel (měřený od svislé boční hrany mince) a celková síla roste rychleji, než odpovídalo Archimédovu zákonu.
- 2) Jakmile kontaktní úhel klesne na nulu a síla povrchového napětí dosáhne maxima, situace z obrázku 6. Od této pozice voda klouže podél svislé stěny mince a směrnice závislosti sílu na hloubce kopíruje Archimédův zákon.
- 3) Když povrchová vrstva kapaliny dosáhne horního okraje mince, začne se vydouvat nad horní plochu mince. Jelikož svislé složka síly povrchového napětí klesá k nule, blíží se výsledná síla síle dle Archimédova zákona. Po dosažení maxima vydutí, (obrázek 9) se mince zaplaví.



Obr. 10



Obr. 11

## Literatura

- [1] Bochníček, Z. *Experimentální studium náhlého zamrznutí podchlazené vody*, Veletrh 14, Brno 2009.