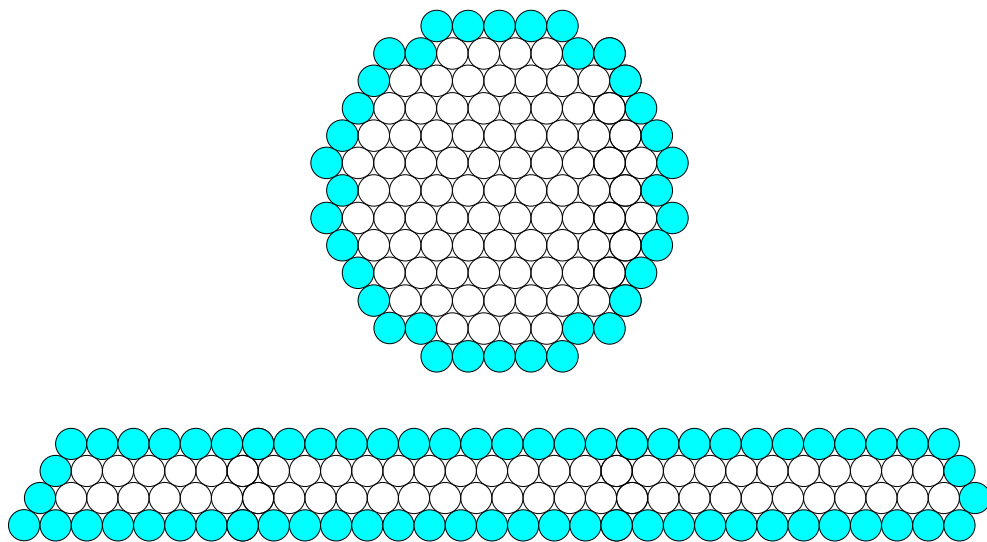


Povrchové napětí

Mnoho věcí, situací a jevů kolem nás je spojeno s povrchovým napětím. Setkáváme se s ním téměř na každém kroku a mnohdy je nám velmi užitečné. A nejen nám: třeba vodoměrkám, potápníkům, kachnám a dalším vodním tvorům, kteří využívají povrchové napětí takřka pro svoji existenci, by se život velmi změnil, pokud by voda neměla tuto podivuhodnou vlastnost.

1 Původ povrchového napětí

Voda je složena z molekul, které jsou hustě nahloučeny vedle sebe. Za normálních okolností na sebe sousední molekuly nepůsobí příliš velkými silami. Existuje určitá rovnovážná vzdálenost d , při které se dvě molekuly ani nepřitahují, ani neodpuzují. Pokud jsou od sebe vzdáleny více než o d , budou se přitahovat, pokud jsou si blíže, budou se odpuzovat. Pokud jsou dvě molekuly zpočátku v rovnovážné vzdálenosti a chceme je od sebe více vzdálit, bude při jejich oddalování vzájemná síla přitažlivá a bude třeba vykonat určitou práci, aby se molekuly vzdálily.



Obrázek 1: Molekuly v kulaté (nahore) a protáhlé (dole) kapce vody. Pro názornost je poměr velikosti molekuly a kapky na obrázku o mnoho řádů větší než ve skutečnosti. Molekuly na povrchu jsou označeny modře. Z celkového počtu 121 molekul je jich na povrchu na horním obrázku 36, zatímco na dolním 64. S nárůstem povrchu očividně narůstá i počet molekul na povrchu.

Představme si nyní kulovou kapku vody, viz obr. 1 nahore. V kapce jsou jednak molekuly, které jsou ze všech stran obklopeny jinými molekulami, jednak molekuly na povrchu, které jsou obklopeny jinými jen zčásti. Těch druhých je nepatrná menšina, naprostá většina molekul je hluboko (v molekulárním měřítku) v kapce, protože molekuly jsou nesrovnatelně menší než kapka. Je zřejmé, že počet molekul na povrchu je přímo úměrný velikosti povrchu kapky.

Nyní si představme, že kapku, která byla původně kulatá, jsme zdeformovali do nového, protáhlého tvaru, čímž narostl její povrch, viz obr. 1 dole. Přitom přibýlo molekul na povrchu. Jinak řečeno objevily se molekuly, které původně byly obklopeny jinými molekulami ze všech stran, ale nyní už nejsou. Během deformování kapky bylo třeba od těchto molekul vzdálit jiné molekuly, které jim byly původně blízké a nyní už nejsou. A jak jsem si řekli už dříve, v takovém případě je třeba dodat molekulám energii. Je vidět, že dodaná energie je přímo úměrná zvětšení povrchu kapky. Náš popis byl poněkud zjednodušený: neuvažovali jsme druhou vrstvu molekul, která je hned pod vrstvou na povrchu atd., i některé další, jemnější efekty. Kdybychom ale i tyto další věci zahrnuli do našich úvah, i tak by stále platilo, že dodaná energie je přímo úměrná zvětšení povrchu kapky. Tato přímá úměrnost platí velmi přesně, pokud je velikost kapky (přesněji řečeno poloměr křivosti jejího nejvíce zakřiveného místa) výrazně větší než molekula.

Energii, kterou je třeba kapce dodat pro zvětšení jejího povrchu, ze říká povrchová a je to vlastně potenciální energie mezimolekulárních sil. Vzhledem k tomu, že si nulovou hladinu potenciální energie můžeme zvolit, kde chceme, můžeme zvolit povrchovou energii nulovou při nulovém povrchu a psát

$$E_{\text{pov}} = \sigma S \quad (1)$$

kde S je velikost povrchu a konstanta úměrnosti σ se nazývá povrchové napětí. Pro vodu $\sigma = 0,073 \text{ N/m}$. Jednotkou povrchového napětí je joule na metr čtvereční, což je totéž co newton na metr a totéž co kilogram za sekundu na druhou.

Jestliže je třeba dodat energii pro zvětšení povrchu vodního tělesa, bude se povrch snažit být co nejmenší (jakoby se „stáhnout“) a bude se proto chovat podobně jako napjatá pružná membrána. Napětí této membrány – síla na jednotku délky – bude číselně stejné jako energie na jednotku plochy a bude tedy rovno σ z rovnice (1).

2 Povrchové napětí a skupenské teplo vypařování

Představme si, že nějaké množství m vody (např. 1 kilogram, tj. 1 liter) rozprášíme na drobné kapičky. Protože je celkový povrch kapiček větší než povrch původního tělesa, je k tomu potřeba dodat určitou energii. Jak velká je celková povrchová energie kapiček?

Při rozprášení na kapičky o poloměru r je povrch jedné kapičky $s = 4\pi r^2$, počet kapiček je $N = V/(4\pi r^3/3)$, celkový povrch kapiček je pak

$$S = Ns = \frac{3V}{r}.$$

Tedy povrchová energie vztažená na jednotku hmotnosti je

$$\frac{E}{m} = \frac{\sigma S}{m} = \frac{3\sigma}{\rho r},$$

kde ρ je hustota kapaliny. Dosazením pro vodu ($\sigma = 0,073 \text{ N/m}$) dostaneme např. pro kapičky o průměru jednoho mikrometru $E/m = 219 \text{ J/kg}$. Tedy pro rozprášení 1 kg vody na mikrometrové kapičky potřebujeme stejnou energii, jako ke zvednutí závaží o hmotnosti asi 2 kg do výšky deseti metrů, což není málo.

CO kdybychom kapičky dělali menší a ještě menší, až by nakonec v každé byla jen jediná molekula vody? To bychom z vody vlastně udělali páru! Výpočtem pro poloměr molekuly vody $r = 0,07 \text{ nm}$ dostaneme $E/m = 3 \text{ MJ/kg}$, zatímco skupenské teplo vypařování je $l = 2,3 \text{ MJ/kg}$,

což je dost podobná hodnota. Z toho je vidět, povrchové napětí skutečně se skupenským teplem souvisí, i když vzorec pro povrchovou energii $E = \sigma S$ platí přesně jen pro kapičky výrazně větší než mezimolekulová vzdálenost.

Také vidíme, že bez povrchového napětí by nedalo žádnou práci vodu vypařit a proto by neexistoval ani rozdíl mezi kapalinou a párou.

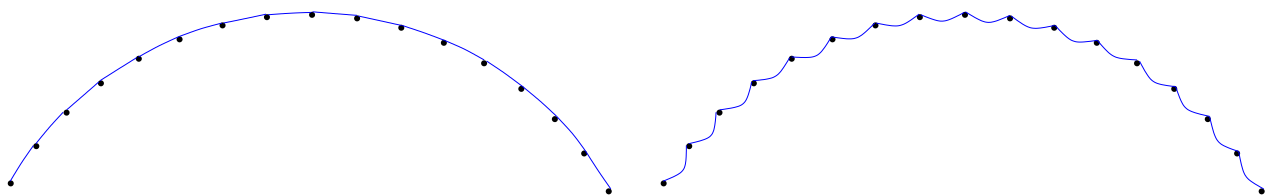
3 Projevy povrchového napětí

Existuje několik zajímavých pokusů, které můžeme vyzkoušet v domácích podmínkách a které nám ukážou fascinující vlastnosti povrchového napětí.

Pokus s vodou v čajovém sítku

K nejzajímavějším pokusům patří nošení vody v sítku. Připravíme si kulové sítko na sypaný čaj složené ze dvou polovin, které se spolu pružinou přiklapávají, a sklenici se studenou vodou. Sítko pomalu ponoříme do hrnku, takže se celé naplní vodou. Pak je pomalu za rukojeť zvedáme, dokud se celé nevynoří z vody. Máme-li štěstí, voda při tomto úkonu ze sítka nevyteče, ale zůstane uvnitř. Je to téměř neuvěřitelné. To, že je voda v sítku, poznáme podle jeho větší váhy nebo tak, že s ním trochu klepneme a voda vyteče. Také optické vlastnosti sítka plného vody jsou jiné než prázdného, což lze dobře pozorovat, když se přes sítko s vodou díváme na nějaký zdroj světla - lampu nebo i okno, a sítkem se dá dokonce zobrazit jasný zdroj světla (slunce) podobně jako čočkou.

Vysvětlení tohoto jevu je následující: aby mohla voda vytéci v nějakém místě ze sítka (v nejnižším bodě), musel by se do sítka někde jinde dostat vzduch (nahore). Přitom by se ale muselo rozhraní mezi vodou a vzduchem prohnout dovnitř sítka (a tím se zvětšit), jak je vidět na obrázku 4 vpravo – povrch je větší než na obrázku vlevo. Zvětšení plochy rozhraní ale brání povrchové napětí, které tak zabránilo vzduchu vniknout dovnitř sítka. Výsledkem je voda uvězněná v sítku.



Obrázek 2: Rozhraní vody a vzduchu v sítku.

Podobným způsobem lze uvěznit vzduch v sítku ponořeném do vody. Povrchové napětí tentokrát brání vzduchu proniknout ze sítka na horní straně.

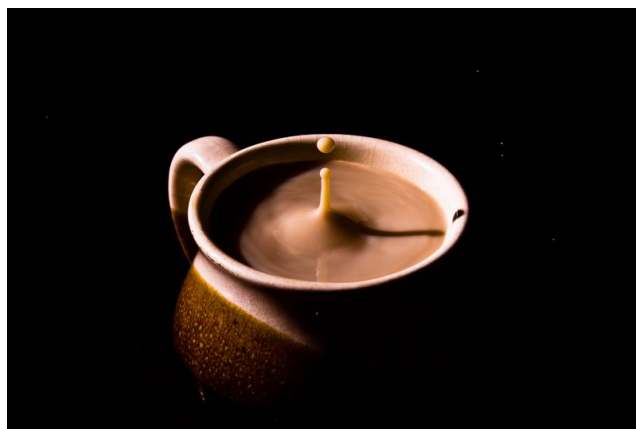
Čajový sáček a vodní pavouci

Z podobného důvodu jako u sítka zůstává vzduch uvězněný v čajovém sáčku, jestliže sáček vložíme do hrnku a přelijeme vroucí vodou. Uvězněný vzduch pak sáček nadnáší a ten plave na hladině. Pokud chceme, aby sáček klesl ke dnu, musíme nejprve nalít vodu do hrnku a

teprve potom pomalu do vody ponořit sáček, aby z něj vzduch stihl unikat póry, které se ještě nenamočily. Pak sáček neplave na hladině, ale je celý ponořený a čaj se může lépe vyluhovat.

Existují vodní pavouci, kteří si do husté sítě utkané pod vodou nanosí zásobu vzduchu, takže pak mohou ve svém příbytku přebývat delší dobu. To, že jim vzduchová bublina drží v síti, která je sice hustá, ale obsahuje mnoho mezer, je možné díky podobnému principu, jaký jsme popsali u čajového sítka. Aby se vzduch protlačil malými otvůrkami v pavučině, musel by se povrch rozhraní vzduch-voda značně zvětšit, čemuž brání povrchové napětí. Vzduch proto pavoučkovi neuteče.

Dešťové a jiné kapky



Obrázek 3: Odtrhávání kapek, sekundární kapka vzniklá po dopadu kapky do hrnku s kávou, kapky rosy na obilí a kapka vody na žhavé plotně. Povrchové napětí se snaží kapky co nejvíce zakulatit pokud možno do tvaru koule, protože tehdy jsou si molekuly nejbližší a povrch kapky je nejmenší.

S povrchovým napětím souvisí také to, že vodní kapky při dešti drží pohromadě a nerozpráší se na menší kapičky. Zajímavé je, že dešťové kapky jsou téměř přesné koule a vůbec nemají „kapkovitý“ tvar, který se kreslí na obrázcích v dětských knížkách. Koule má totiž ze všech těles s daným objemem nejmenší povrch. Kulovitost kapek je pěkně vidět na našich fotografiích kapek nad hrnkem kávy i jinde na obr. 3, viz též <http://zajfyz.physics.muni.cz>.

Přetlak v bublinách

Na závěr zmíníme již bez vysvětlení několik dalších jevů souvisejících s povrchovým napětím. Tak například v mýdlové bublině, kterou vyfoukneme do vzduchu, je tlak větší než je tlak okolního vzduchu. To má pak za následek zvuk při prasknutí bubliny, který je sice slabý, ale zblízka dobře slyšitelný. Podobný přetlak je v bublinkách například v minerálce. V bublině ohraničené jedním rozhraním kapalina-vzduch je přetlak oproti okolnímu prostředí

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{r},$$

kde r je poloměr bubliny. V bublinách z bublifuku je přetlak dvojnásobný, protože rozhraní jsou dvě.

Mince plovoucí na hladině

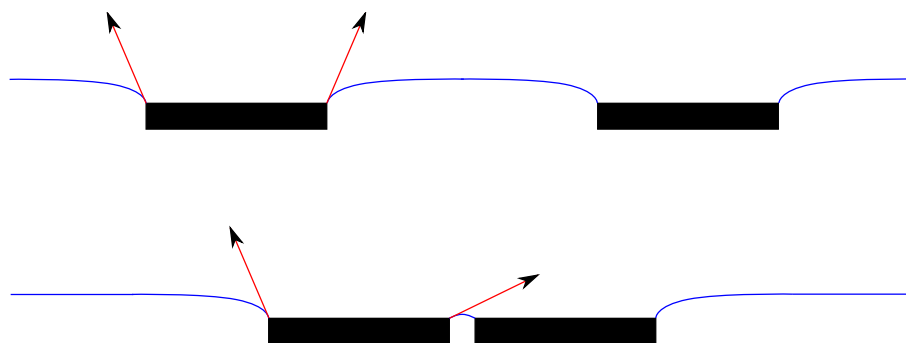
Jiný pěkný jev je plování těles těžších než voda. Nejlépe se k tomu hodí dnes již neplatné deseti- dvacetí- nebo padesátihaléře. Jestliže je opatrně položíme na vodní hladinu, nepotopí se, ale bude plavat. (Nejlepší je nabrat minci na mokré nalomené dřívko od nanuka a to pomalu ponořit do vody.) Síla, která minci drží na hladině, působí podél jejího okraje od prohnuté vodní hladiny, o které jsme si řekli, že se chová jako pružná napjatá membrána. Kromě toho pomáhá minci udržet na hladině tlak vody (jde v určitém smyslu o Archimédovu vztlakovou sílu), protože mince je oproti okolní hladině pokleslá a tlak vody pod ní je proto nezanedbatelně větší než tlak atmosférický.



Obrázek 4: Plovoucí desetiňky

Zajímavé je pozorovat, jak se chovají dvě plovoucí mince, které se ocitnou na hladině blízko sebe. Pokus zřetelně ukazuje, že se přitahují, což se dá vysvětlit několika vzájemně ekvivalentními způsoby. Uveďme si tři z nich.

Je-li mince plovoucí na hladině vzdálena od ostatních mincí, jsou síly povrchového napětí rozloženy symetricky (obr. 5 nahoře) a jejich vodorovné složky se vzájemně vyruší. Jestliže se v blízkosti mince nachází jiná (obr. 5 dole), bude hladina na této straně skloněná vůči vodorovné



Obrázek 5: Vzájemná interakce desetníků.

rovině o menší úhel než na opačné straně a vodorovné složky sil se už nevyruší, ale budou směřovat ke druhé minci.

Druhé vysvětlení je ekvivalentní předchozímu, ale využívá pro argumentaci energii, ne síly. Jsou-li si dvě mince blízko, je celkový povrch hladiny menší, než když jsou od sebe daleko, protože hladina v prostoru mezi mincemi nevystupuje tak vysoko, jako když jsou mince od sebe dále (srov. obr. 5 nahoře a dole). Povrchové napětí proto mince pudí k sobě, aby byla hladina co nejmenší.

Dá se také říci, že jedna mince prohne vodní hladinu ve svém okolí a druhá mince má tendenci do této prohlubně sklouznout, protože je těžší než voda a chce se tedy dostat co nejnižší.

Naproti tomu mince se odpuzuje od dřívka, které plove na hladině vedle ní. Dvě dřívka se k sobě přitahují podobně jako mince a stejně se chovají i bublinky plovoucí na hladině. Můžeme to pozorovat na pěně v šálku kávy, kdy se spousta malých bublinek drží těsně u sebe a navíc mají tendenci hromadit se na okraji šálku, kde je hladina poněkud zvednutá – jak jinak než díky povrchovému napětí.

Další pokus ukazuje chování mincí, dřívěk a pingpongového míčku ve sklenici vody, jestliže hladina dosahuje pod okraj sklenice. Tehdy jdou mince od kraje a dřívka a míček ke kraji. Jestliže sklenici přeplníme tak, aby hladina byla prohnutá nahoru (to, že voda nevyteče, způsobuje opět povrchové napětí), bude chování všech těchto předmětů opačné.

Smáčivost

Co znamená, že voda nebo jiná kapalina nesmáčí nějaké těleso? Při smáčení se kapalina snadno rozlévá po povrchu tělesa, obalí jej a namočí. Pokud kapalina těleso nesmáčí, budou se na povrchu tvořit kapky a kapalina se nebude rozlévat. Proč se tak děje? Povrchové napětí existuje nejen mezi vodou (či jinou kapalinou) a vzduchem, ale i mezi pevnou látkou (třeba kovem či sklem) a kapalinou a rovněž mezi pevnou látkou a vzduchem. To, jestli kapalina smočí danou pevnou látku nebo ne, pak záleží na vzájemných velikostech těchto povrchových napětí. Zhruba řečeno platí, že pokud je povrchové napětí mezi kapalinou a pevnou látkou velké, kapalina tuto látku nebude smáčet. Tehdy totiž povrchové napětí bude bránit zvětšení rozhraní kapalina – pevná látka a toto rozhraní bude mít tendenci být co nejmenší. Voda nepříliš dobře smáčí některé plasty, ale také například mastné peří vodních ptáků.

Kachny, vodoměrky a potápník

Díky nesmáčivosti mastného ptačího perí mohou plavat kachny, husy, labutě a další ptáci. Povrchové napětí totiž brání vodě, aby pronikla mezi pírka, mezi pírky proto zůstává mnoho vzduchu, který pomáhá kachnu nadnášet.

Podobně jako kachny, i vodoměrky mohou plovat na vodě díky povrchovému napětí. Nesmáčivé chloupky na jejich nohou totiž neumožní vodě prostoupit až k nohám, takže se vodní hladina pod tlakem nohou prohne. Prohnutá hladina má pak větší plochu, než by měla hladina rovná. Dalšímu průhybu se snaží zabránit povrchové napětí, které pak nese vodoměrku na hladině.

Brouk potápník si zase díky povrchovému napětí může nést s sebou pod vodu zásobu vzduchu k dýchání. Na rozdíl od potápěčů, kteří se vláčejí s těžkými tlakovými lahvemi, mu stačí vrstvička vodoodpudivé látky na konci zadečku. Povrchové napětí mezi touto vrstvičkou a vodou je velké, takže voda se brání dostat do kontaktu s vrstvičkou. Kolem části zadečku tak zůstává vzduch, který slouží broučkovi k dýchání pod vodou.

Vodoodpudivé membrány typu Goretex

I známá membrána Goretex ke své funkci využívá povrchové napětí. Snahou je, aby membránou mohla procházet vodní pára, ale nikoli kapalná voda, takže třeba boty s Goretexem jsou prodyšné, ale neteče do nich. Membrána je vyrobena z materiálu nesmáčivého vodou a obsahuje velké množství mikroskopických otvorů. Plyny, jako třeba vodní pára, pronikají těmito otvory bez problémů, ale voda to má obtížnější. Aby totiž kapka vody prošla maličkým otvorem, musela by se velice ztenčit. Tím by ale rostl její povrch, čemuž zabráni povrchové napětí kapka je takto uvězněna na jedné straně membrány.

Embólie

Embólie je smrtelně nebezpečný jev, při kterém vzduchová bublina ucpe tepénky a zamezí tak zásobování nějaké tkáně nebo orgánu. Mohlo by se zdát zvláštní, že vzduch, který je mnohem řidší než krev, by mohl tepnu ucpat. Je to ale pochopitelné, jestliže víme o povrchovém napětí, a důvod je podobný, jako jsme popsali u vzduchu uvězněném v čajovém sáčku.

Zaoblení okraje sklenic

Povrchové napětí se rovněž využívá k zaoblení okraje sklenic při jejich výrobě. Po vyfouknutí se odřízne z vršku sklenice část, která byla připojena ke sklářské píšťale, čímž vznikne nebezpečný ostrý okraj. Stačí ale okraj zahřát a povrchové napětí jej samo zaoblí, viz obr. 6 (a).

Lití mléka z krabice

Při lití mléka z krabice, zvláště když vytvoříme jen malý otvor, můžeme pozorovat velmi zajímavé tvary proudící kapaliny, viz obr. 6 (b). To, že se mléko nerozstříkuje na všechny strany, ale proud drží pohromadě, nebo se dokonce poněkud rozbíhavý proud opět sbíhá, je opět způsobeno povrchovým napětím.



Obrázek 6: Zaoblený okraj sklenice a lití mléka z krabice.

Hoření svíčky

Je zajímavé, že i třeba svíčka nebo lampa na vonný olej by nemohly hořet bez povrchového napětí. Jen díky němu je totiž do hořícího konce knotu nasáván další parafín nebo olej. Když odhoří část roztaveného parafínu v horním konci knotu, rozhraní mezi parafínem a vzduchem má tendenci se prohnout dovnitř mezi vlákna knotu (jakoby knot vysychal). To způsobí zvětšení plochy rozhraní a vlivem povrchového napětí se vytvoří podtlak v této části knotu. Výsledkem je „nasátí“ dalšího parafínu ze spodních částí knotu. Tak je zaručen dostatečný přísun paliva do míst, kde se z knotu odpařuje a hoří.