

Kolik váží kapka?

Petr Kácovský

Ačkoliv je otázka v titulku prostá, fyzikálně nalaďeného šťouru k ní hned napadne několik dalších otázek. Tak předně, kapka čeho – o jakou jde látku? A až si to ujasníme, víme, jak taková kapka vznikla? Asi je rozdíl mezi kapičkou rosy, která se vytvoří spojením mnoha kondenzujících „mikrokapiček“, a macatou kapkou, která vypadne z bouřkového mraku a udělá do prašné půdy důlek¹. Tyto okrajové podmínky proto nejdříve objasním.

Teorie

V měřeních, která jsem prováděl v rámci soustředění na Hrašticí/Hluboké, jsem pracoval primárně se dvěma kapalinami – vodou a ethanolem. A kapky jsem vytvářel poměrně „unifikovaným“ způsobem – pomocí vertikálně umístěné plastové injekční stříkačky. Za této „standardizované“ situace by se měla dát hmotnost kapky m předpovědět na základě jednoduché fyzikální úvahy. V okamžiku, kdy se kapka odděluje, by se měla velikost tíhové síly \vec{F}_G , která na kapku působí směrem svisle dolů, rovnat velikosti povrchové síly \vec{F}_σ , která míří svisle vzhůru. Pokud rovnost pro velikosti sil rozepíšeme, dostáváme:

$$F_G = F_\sigma,$$

$$mg = 2\pi r\sigma,$$

kde g je tíhové zrychlení, $2\pi r$ délka styčné linie mezi stříkačkou a kapkou v okamžiku odtržení (tedy obvod kružnice vymezené ústím stříkačky o poloměru r) a σ povrchové napětí kapaliny, ze které je kapka vytvořena. Tato rovnost se obvykle označuje jako Tateův zákon (Soni, 2019) a primárně je využívána k jednoduchému určení povrchového napětí kapaliny tzv. stalagmometrickou metodou.

Reálně ale výpočet na základě vztahu výše dává nižší hodnoty povrchového napětí, než by měl. Důvodem je skutečnost, že vzniklá kapka, z jejíhož rozměru vycházíme, „neodkápně“ z ústí stříkačky celá, ale až 40 % hmotnosti kapky zůstane zachyceno na špičce stříkačky (Lee, Ravindra & Chan, 2009). Naměřená hmotnost kapky je tedy menší a to snižuje vypočítanou hodnotu povrchového napětí. Proto se Tateův zákon rozšiřuje o bezrozměrný korekční člen F , jehož výpočet popisuje například Soni (2019), čímž dostáváme:

$$mg = 2\pi r\sigma F.$$

Hodnota F závisí na volbě vhodného rozměru použité stříkačky a lze ji určit z empiricky získané formule (Soni, 2019).

Měření a jeho výsledky

Zdalo by se přirozené, aby výstupem prováděných měření bylo ověřit vztahy výše, resp. z naměřených hodnot určit hodnotu F a porovnat ji s teorií. Cíl byl ale prostší – provést experiment, který by jednoduše ukazoval, že hmotnost kapky je přímo úměrná povrchovému napětí. Přitom změnu povrchového napětí lze jednoduše zajistit dvěma způsoby: (a) srovnáním hmotnosti kapek dvou různých kapalin, (b) srovnáním hmotnosti kapek jediné kapaliny při různé teplotě.

¹ ...což jsme na našem poněkud navlhlém soustředění mohli pozorovat opakovaně a někdy i celé hodiny... i když je pravda, že prašná půda už po pár minutách deště zmizela a do konce soustředění se již neobjevila...

Srovnání hmotnosti kapek dvou různých kapalin

Pro vodu a ethanol jsem odvážil 50 kapek, a to pro každou kapalinu celkem 5×. Získané hmotnosti jedné kapky jsou následující:

- $m(\text{voda}) = (50 \pm 2) \text{ mg}$
- $m(\text{ethanol}) = (16 \pm 1) \text{ mg}$

Hmotnosti kapek ethanolu a vody jsou tedy v poměru přibližně 3,1 ku 1. Pokud se podíváme na povrchová napětí obou kapalin při teplotě cca 20 °C², za které měření zhruba probíhalo, dohledáme hodnotu asi 73 mN/m pro vodu a asi 22 mN/m pro ethanol (Dortmund Data Bank, n.d.). Poměr povrchových napětí je podobný poměru hmotností kapek, konkrétně je asi 3,3 ku 1. Zdá se tedy, že můžeme hmotnost kapky skutečně podezírat z toho, že závisí přímo úměrně na povrchovém napětí.

Srovnání hmotnosti kapek jediné kapaliny při různé teplotě

Měření probíhalo pouze s vodou. Jednou bylo odváženo 50 kapek vody o teplotě okolí (20 °C), podruhé 50 kapek vody o průměrné teplotě asi 75 °C. Určení teploty zahřáté vody bylo poněkud problematické, neboť během odkapávání 50 kapek voda svoji teplotu průběžně snižovala; odhad teploty byl tedy získán jako průměr teploty získané bodovým teploměrem přímo ve stříkačce těsně před a těsně po měření. Každé měření bylo provedeno 2×. Získané hmotnosti jedné kapky jsou následující:

- $m(20 \text{ °C}) = (50 \pm 2) \text{ mg}$
- $m(75 \text{ °C}) = (42 \pm 2) \text{ mg}$

Hmotnosti kapek teplé a studené vody jsou zde v poměru přibližně 1,19 ku 1. Pokud se podíváme na povrchová napětí vody při výše uvedených teplotách, dohledáme hodnotu asi 73 mN/m pro teplotu 20 °C a asi 64 mN/m pro 75 °C (The Engineering ToolBox, n.d.). Poměr povrchových napětí je tedy přibližně 1,14 ku 1. V rámci naší přesnosti se zdá, že ani tento výsledek přímé úměře mezi hmotností kapky a povrchovým napětím kapaliny dramaticky neodporuje.

Limity

Poměrně podstatným faktorem (a také faktorem velmi záluďným, neb jsem si ho uvědomil až během měření...) je fakt, že při celém měření je nutné mít stříkačku umístěnou svisle, což v případě, že – podobně jako já – držíme stříkačku v ruce, není automatické. Délka měření a moje přirozená pohodlnost občas vedly k tomu, že jsem si ruku se stříkačkou během odpočítávání 50 kapek „odložil“, opřel do nějaké pohodlnější pozice, čímž ale docházelo k odklonu stříkačky ze svislého směru. S větším odklonem ovšem klesá hmotnost vznikajících kapek.

Nepřesnosti spojené s určováním teploty zahřáté vody jsou již popsány výše.

Nejistoty plynoucí z omezené přesnosti vah (byly používány váhy o citlivosti 0,01 g) a nepřesnosti teplotního čidla považuji za marginální.

² Ano, pár hodin skutečně bylo až ke 20 °C, i když většinu času jsme byli asi tak na 12 °C...

Reference

Dortmund Data Bank. (n.d.). *Surface Tension of Ethanol*. URL:
http://www.ddbst.com/en/EED/PCP/SFT_C11.php

Lee, B. B., Ravindra, P., & Chan, E. S. (2009). New drop weight analysis for surface tension determination of liquids. *Colloids and Surfaces A*, 332, 112-120.

Soni, M. (2019). A simple laboratory experiment to measure the surface tension of a liquid in contact with air. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 8(2), 2197-2202.

The Engineering ToolBox. (n.d.). *Surface Tension of Water in contact with Air*. URL:
https://www.engineeringtoolbox.com/water-surface-tension-d_597.html