

Úloha II.E ... je mi to šumák

8 bodů; (chybí statistiky)

Kupte si v lékárně šumivý celaskon nebo cokoliv, co se podává v tabletách určených k rozpuštění ve vodě. Změřte, jak dlouho trvá rozpuštění jedné tablety v závislosti na teplotě vody, do které ji hodíte. Diskutujte příčiny a vymyslete, proč je pozorovaná závislost taková.

Aleš Podolník umíral na rýmu.

Teorie

Šumivé tablety jsou neobalené tablety s obsahem kyselých látek spolu s uhlíčitany nebo hydrogenuhlíčitany, které za přítomnosti vody velice rychle reagují za vzniku oxidu uhličitého, který tvoří bublinky pozorovatelné při jejich rozpuštění. Námi použité tablety obsahují kyselinu citronovou a hydrogenuhlíčitan sodný, mimo oxidu uhličitého tedy bude vznikat sodná sůl kyseliny citronové a voda.

Kinetika chemických reakcí přímo úměrně závisí na určité rychlostní konstantě k , jejíž závislost na teplotě vyjadřuje Arrheniova rovnice:

$$k = Ae^{-\frac{E_a}{RT}},$$

kde A je frekvenční faktor dané reakce zohledňující to, že ne všechny srážky částic jsou účinné a vedou ke vzniku produktů, E_a je aktivační energie (jednotky $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$) dané reakce, tedy minimálně energie, která musí být dodána na to, aby reakce mohla probíhat (zanikaly původní vazby a vznikaly nové), R je molární plynová konstanta a konečně T je to, co nás nejvíce zajímá, tedy teplota v kelvinech. Rychlost je veličina nepřímo úměrná času, čas reakce je tedy nepřímo úměrný rychlostní konstantě k , takže závislost mezi teplotou a rychlostí rozpuštění by mohla být exponenciální.

Celá situace však bude ve skutečnosti složitější, i kvůli tomu, že slisovaná tableta umožňuje průběh reakce pouze na svém povrchu, tedy tam, kde se reaktanty přímo stýkají s vodou, tím se původní vrstva rozrušuje a reakce postupuje do dalších vrstev. Mimo to hydrogenuhlíčitany a kyselina citronová nejsou jedinými složkami tablety, neboť se jedná pouze o pomocné látky usnadňující rychlé rozpuštění tablety. Přestože by tablety měly být přiměřeně obsahově stejnoměrné, konkrétní rozmístění všech látek v nich a to, jak bude tableta slisována, bude vždy do určité míry stochastické, což se pak může spolupodílet na tom, zda se daná tableta rozpustí rychleji nebo pomaleji.

Dále je rychlost rozpuštění ovlivněna tím, v jakém okamžiku je vrstva bublinek v bezprostřední blízkosti tablety schopná vyrovnat síly, a vynést tabletu na hladinu, protože po vyplavání tablety se rychlost rozpuštění může snižovat kvůli menšímu styku s vodou.

Experiment

K experimentu byly použity magnesiové šumivé tablety Dr. Max Magnesium s vitamínem B6 s příchutí citronu, které byly rozpuštěny vždy ve zhruba 200 ml vody. Několik tablet po sobě bylo během experimentu zváženo a bylo ověřeno, že jsou hmotnostně stejnoměrné (rozdíl v rámci setin gramu je zanedbatelný a schová se pod jiné, řádově vyšší nejistoty měření).

Teplota vody byla měřena pomocí digitálních teplotních čidel MAXIM DS18B20 v pouzdře TO-92. Čas byl měřen stopkami, jako nejistota měření byly brány 2s, kvůli problematickému určení okamžiku, kdy je tableta zcela rozpuštěná. Naměřeny byly časy rozpuštění tablet při více než dvaceti různých teplotách v rozmezí od zhruba $1\text{ }^\circ\text{C}$ do $93\text{ }^\circ\text{C}$. Tablety mají oproti vodě velmi

malý objem, proto se téměř okamžitě dostanou na teplotu vody bez většího ovlivnění výsledků. Opakovat měření pro danou teplotu vícekrát by bylo poměrně náročné, takže více měření bylo provedeno pouze pro vodu s pokojovou teplotou (v rozmezí teplot od 23,1 °C do 24,2 °C), aby bylo možné zhruba odhadnout nejistoty měření.

K měření byla použita vroucí voda z konvice, studená voda z kohoutku, voda pokojové teploty a led vzájemně kombinované v různých poměrech tak, abychom dostali zhruba rovnoměrné rozložení měřených teplot. Led se vždy nechal zcela rozpustit (případně zbytky byly odebrány), aby jeho kusy rozpouštění tablety neovlivňovaly. Do hrnku bylo vloženo teplotní čidlo a vyčkalo se, než se zaznamenávána teplota dostatečně ustálí. Poté byla do vody vhozena tableta se současným spuštěním stopek a zapsána teplota, s rozpouštěním tablety bylo měření času zastaveno a znovu zapsána teplota.

Jelikož měření trvalo po určitý čas a neprobíhalo za podmínek, které by se snažily o přiblížení tepelně izolované soustavě (což by bylo vhodnější, ale problematicky by se sledoval průběh rozpouštění), byl určitý, byť nevelký, rozdíl mezi teplotou naměřenou na počátku a na konci měření vlivem tepelné výměny s okolím. Poznamenejme tedy, že za teplotu měření považujeme počáteční teplotu a její proměnlivost zahrneme do nejistot určení teploty, které z tohoto důvodu činí ± 2 °C.

Nakonec jsme v experimentování velmi zhruba zabrousili do oblasti termochemie. Tentokrát jsme jako nádobu pro rozpouštění použili termohrnek, jehož otvorem na pití bylo protaženo teplotní čidlo (a lehce přiskřípnuto zavíráním, aby byla soustava dobře tepelně izolovaná). Do termohrniku jsme dali pouze asi 44 g vody pokojové teploty, do které bylo vhozeno 5 šumivých tablet zároveň, ihned jsme důkladně zašroubovali víčko termohrniku a sledovali jsme, jak se mění teplota vody v důsledku probíhající chemické reakce, tedy jaká přibližně bude její termodynamika.

Výsledky a diskuze

V tabulce 1 jsou zaznamenány doby rozpouštění pro pokojovou teplotu. Z nich byla vypočtena výběrová směrodatná odchylka aritmetického průměru (5,88 s), kterou jsme vynásobili $(1-\alpha/2)$ -kvantilem Studentova rozdělení pro N stupňů volnosti (N je počet měření), kde $\alpha = 0,05$ (tedy pro 95% interval pravděpodobnosti), čímž jsme dostali rozšířenou nejistotu typu A, která činí přibližně 14 s. Vzhledem k tomu, že nejistota měření se stopkami je řádově nižší, můžeme ji zanedbat a prohlásit toto za konečnou nejistotu. Tuto nejistotu chceme stejně využít pouze jako velmi přibližný odhad nejistoty měření pro všechny teploty.

V grafu 1 pak vidíme zaznamenány časy rozpouštění pro různé teploty vody. Jak je vidět, exponenciální fit není vyhovující, závislost rychlosti rozpouštění tablety na teplotě tedy bude poněkud složitější. Vidíme, že zhruba od teploty 20 °C nastává přechod a rychlost rozpouštění se s teplotou zvyšuje pomaleji (zpočátku se dokonce snižuje), toto zpomalení zvyšování rychlosti rozpouštění znovu vymizí přibližně v rozmezí 60 °C–70 °C.

Co tedy může způsobovat, že naměřená závislost je právě taková? Zásadní bude nejspíše to, že se reakcí uvolňují bublinky oxidu uhličitého a že máme reaktanty ve formě slisované tablety, a tak se celý proces neřídí jen kinetikou chemických reakcí, ale závisí i na tom, jak vlastně probíhá rozpouštění a dezintegrace celé tablety. Teď si možná říkáte, jak to může vysvětlovat, co se děje v grafu, protože ve výsledku se stejně rozpouštějí všechny tablety a u všech to proběhne plus mínus obdobně. Problém je právě v tom, že rozpouštění tablet nemá u různých teplot úplně stejný charakter, což jste možná při vašich měřeních také pozorovali (jestli jste měli tablety podobného typu a složení).

Tabulka 1: Časy rozpouštění tablet t pro pokojovou teplotu T .

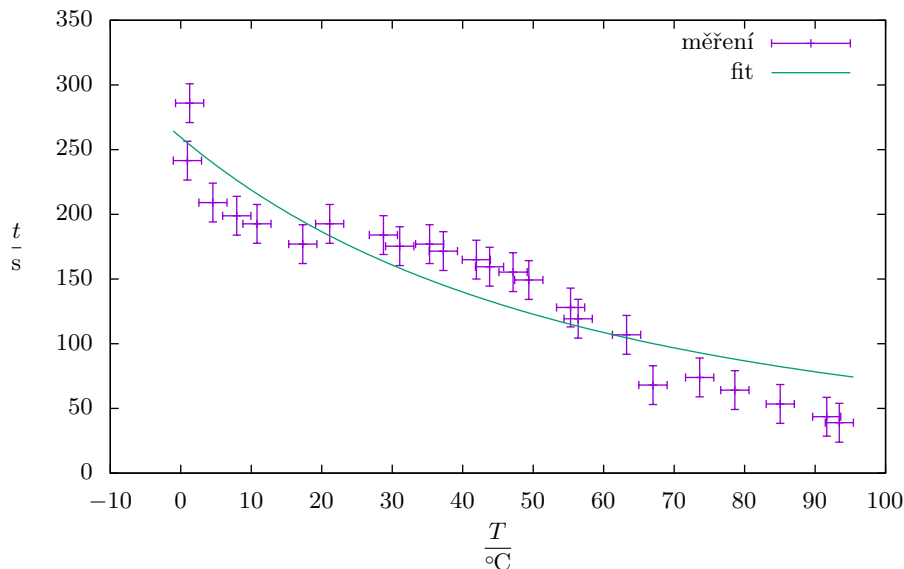
T °C	t s
23,6	201
23,7	185
23,5	207
23,6	164
23,7	155
23,6	193
23,1	187
23,8	188
24,2	205

Rozpouštíme-li tabletu ve vodě nízké teploty (nízká teplota v našem případě znamená přibližně $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $15\text{ }^{\circ}\text{C}$), celý proces probíhá relativně pomalu, tím pádem se nám i pomaleji uvolňují bublinky oxidu uhličitého, takže nedochází k jejich dostatečnému hromadění, které je potřebné k tomu, aby byla tableta vynesena na hladinu. Tableta se tedy po významnou část svého rozpouštění drží dole zcela obklopená vodou, což je faktor, který jejímu rozpouštění významně napomáhá. Na hladinu je bublinkami vynesen pouze malý, rozmočený zbytek, který už není problém „dorozpustit“.

Podívejme se na rozpouštění tablet ve vodě střední teploty (přibližně $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $60\text{ }^{\circ}\text{C}$), zde už se rychlost reakce postupně zvýšila natolik, že za chvíli vzniká dostatečné množství bublinek oxidu uhličitého zároveň, takže k vynesení tablety na hladinu dojde po relativně kratším čase. Nicméně reakce ještě není vyložene prudká a tableta nestihla nasát významnější podíl vody, a tak se na hladině poměrně dlouho „trápí“, protože rychlost rozpouštění je výrazně snížena tím, že z jedné strany tablety je možnost rozpouštění a reaktivity značně omezena.

Nakonec zbývá věnovat se rozpouštění tablet za vysoké teploty (přibližně $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $90\text{ }^{\circ}\text{C}$), zde dochází k tomu, že tablety vyplavou velmi rychle (dolní hranice teplotního intervalu) nebo dokonce prakticky okamžitě (horní hranice), ale reakce je natolik bouřlivá, že významně přispívá k rychlé dezintegraci tablety. V podstatě ani na hladině samotnou tabletu skoro nevidíme přes šumící vrstvu pěny, tableta se po hladině velmi rychle pohybuje a naráží do stěn hrnku, což může jejímu rozpadu napomáhat. Nicméně je pravděpodobné, že kdyby se nám podařilo nuceně udržet tabletu pod hladinou, tak abychom zároveň její rozpouštění neovlivňovali (což prakticky dost dobře udělat nejde), tak by se rychlost jejího rozpouštění ještě zvýšila. Nicméně i na hladině už tableta za těchto teplot reaguje dostatečně prudce na to, aby ji efekt vyplavání nezbrzdil tak výrazně, jako tomu je u středních teplot.

Rozdílnost v rozpouštění byla pozorována už při samotném experimentu, ale pro jistotu byl proveden jen velmi zběžně dodatečný experiment, ve kterém byl mimo celkový čas rozpouštění tablety změřen i čas, za který tableta vyplave na hladinu. Jeho výsledkem je to, že ve vodě s teplotou asi $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ tableta vyplave skoro hned, ale reaguje opravdu velice prudce. Ve vodě s teplotou asi $31\text{ }^{\circ}\text{C}$ je tableta zcela ponořená pouze po 19 % času svého rozpouštění, zatímco ve vodě o teplotě asi $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ zůstane tableta potopená po 77 % času svého rozpouštění, což je významný rozdíl, a je tedy oprávněné předpokládat, že výše popsané je alespoň jedním z důvodů, proč závislost doby rozpouštění tablety na teplotě vody má charakter, který vidíme



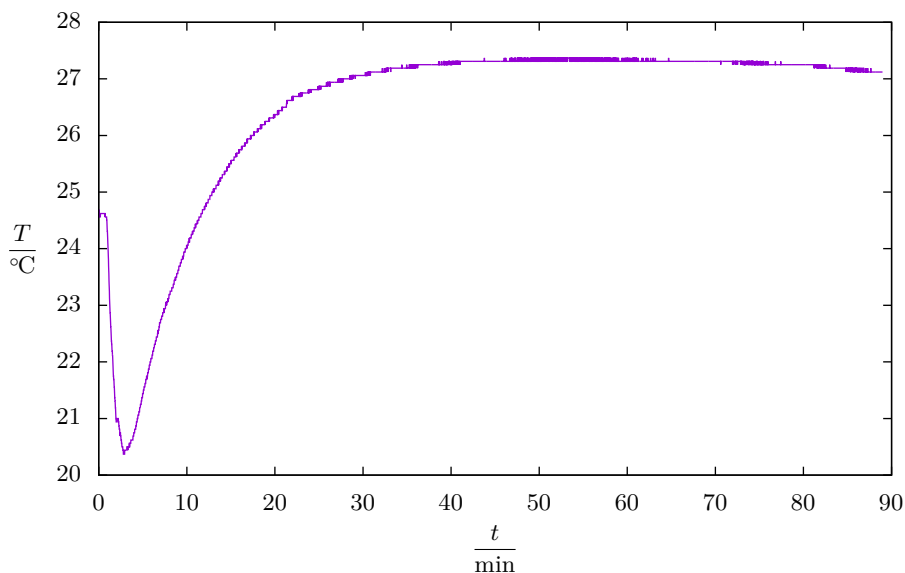
Obr. 1: Naměřené časy rozpouštění tablet pro různé teploty proloženy exponenciální funkcí.

v grafu, dalším může být také to, jak se chovají pomocné látky v tabletě při různých teplotách.

Další graf 2 ukazuje výsledek zmíněného termochemického měření. Zde je pěkně vidět, že na disoluci tablety a iniciaci následné chemické reakce je nejdříve třeba energii dodávat (teplota vody ztelně klesá z pokojové teploty), posléze se ale uvolňuje ještě větší množství energie, než bylo na začátku potřeba dodat. Jedná se tedy jednoznačně o exotermickou reakci, která při svém průběhu dodává teplo do systému. Z grafu je patrné, že rozdíl teplot vody ΔT mezi počátečním a konečným stavem je přibližně $3\text{ }^{\circ}\text{C}$, hmotnost vody je asi $m = 44\text{ g}$ a její měrná tepelná kapacita asi $c = 4200\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, můžeme tedy určit, že teplo celkově dodané vodě bude $Q = mc\Delta T$, tedy asi 550 J , na jednu tabletu se tedy uvolní přibližně 110 J tepla. Když to dáme do souvislosti s naším hlavním experimentem, vidíme, že rozpouštění jedné tablety ve cca 200 g vody ovlivní její teplotu zanedbatelně (možný nárůst o přibližně $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$), přestože zahřívána bude nejdříve lokálně voda v nejbližším okolí tablety.

Závěr

Byla proměřena závislost času rozpouštění šumivých tablet na teplotě vody. Není překvapivé, že závislost má převážně klesající charakter (tablety se převážně při vyšší teplotě rozpouštějí rychleji). Jak jsme se obávali, jednoduchá exponenciální závislost, která vychází z teorie o kinetice chemických reakcí, na naměřená data nesedí. Zpomalení rozpouštění tablet patrné v jedné části grafu lze vysvětlit jako důsledek různého průběhu rozpouštění tablet (především odlišné



Obr. 2: Měření teploty v závislosti na čase při rozpouštění pěti tablet současně v malém objemu vody v termohrnku. Počáteční teplota vody je $24,6^\circ\text{C}$, minimální teplota vody je $21,1^\circ\text{C}$ a maximální teplota vody dosahuje $27,6^\circ\text{C}$

relativní doby, za kterou je tableta díky bublinkám oxidu uhličitého vynesena k hladině).

Kristína Nešporová
kiki@fykos.cz

Fyzikální korespondenční seminář je organizován studenty MFF UK. Je zastřešen Oddělením pro vnější vztahy a propagaci MFF UK a podporován Ústavem teoretické fyziky MFF UK, jeho zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported. Pro zobrazení kopie této licence, navštivte <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.