

Úloha I.E ... Pálení čarodějnic

7 bodů; průměr 4,00; řešilo 39 studentů

Mezi nejznámějšími vyvrácenými teoriemi v historii chemie je flogistonová teorie, která přežívala až do konce 18. století. Ta tvrdí, že každá hořlavá látka obsahuje směs tzv. flogistonu a popela. Během hoření flogiston uniká do okolí a ze směsi nakonec zůstane jen popel. Proto má například svíčka pod sklenicí obrácenou dnem vzhůru rychle zhasnout – dané množství vzduchu ve sklenici se flogistonuje (pojme flogiston) jen do určité nejvyšší míry a flogistonem nasycený vzduch pak brání úniku dalšího z místa hoření.

Za předpokladu, že je tato teorie správná, zkuste co nejpřesněji zjistit, jaký minimální podíl hmotnosti paliva (které je nutno určit) ve vašem krbu nebo grilu tvoří flogiston, resp. jaká jeho část unikne při vyhoření. Nemáte-li je k dispozici, můžete určit hmotnostní podíl flogistonu v dostatečně hmotné dřevěné třísce či špalvu ze známého materiálu za improvizovaných podmínek. Pozor! Experiment provádějte venku (za dostatečného větrání) a na nehořlavém podkladu (kovová deska, písek, ohniště) pod dozorem dospělého! Nezapomeňte na důležitou diskusi nepřesnosti vašich měření.

Bonus: Mají váš popel či vyhořelé sirky jiné magnetické vlastnosti než původní palivo? Vyzkoušejte si je magnetem! O těchto vlastnostech a také o vyvrácení flogistonové teorie budeme více psát ve vzorovém řešení.

Flogistonová teorie

Flogistonová teorie provázela chemiky od roku 1667, kdy ji vyslovil Johann Joachim Becher, až do přelomu 18. a 19. století, kdy po Lavoisierově vysvětlení hoření jako oxidace a velkém množství experimentálních vyvrácení existence flogistonu zastánci této teorie pomalu ustoupili teorii v současnosti používané. Dnes víme, že hoření látky je reakce s kyslíkem. Proč se tedy flogistonová teorie udržela tak dlouho?

Abychom tuto otázku zodpověděli, musíme se zamyslet nad podmínkami, ve kterých teorie vznikla. V době zrodu flogistonové teorie chemici teprve objevovali jednotlivé plyny.¹ Vodík byl objeven až o století později, kyslík (spolu s dusíkem) následoval v roce 1772, kdy jej Carl Wilhelm Scheele pojmenoval jako „ohnivý vzduch“. Tento objev byl publikován až o pět let později. Ostatně ani sám vodík nebyl samostatným plynem nazván hned. Robert Boyle, který bublinky vodíku při chemické reakci poprvé v laboratoři pozoroval, vůbec nepovažoval vznikající plyn za něco jiného než obyčejný vzduch. Můžeme tedy vidět, že o slučování látek s něčím, co by mohlo být ve vzduchu, bylo prakticky nemožné přemýšlet. Látky, které tvoří většinu vzduchu, v době vzniku flogistonové teorie nebyly známy, člověka tedy stěžejí napadlo, že by něco ze vzduchu mohlo s hořlavou látkou reagovat za uvolnění velkého množství energie.

Když nemáme něco venku, co by hoření způsobilo (resp. nevíme, že to máme), musí logicky něco být uvnitř látky. A když je to uvnitř a při hoření se uvolňuje energie, dává smysl, aby se to něco uvolňovalo také. A tak započalo ono velké hledání flogistonu – univerzální látky obsažené ve všem, co je schopno alespoň trochu hořet (z dnešního pohledu oxidovat).

Jistě jste už viděli video, kde v laboratorních podmínkách lidé propichují balon plný vodíku.² Vodík velmi ochotně shoří, právě proto byl dlouhou dobu považován za flogiston. Bylo to velké množství neviditelné látky, která vzplála, jakmile se dostala do kontaktu s něčím, co už flogiston uvolňovalo. Až pozorovaný vznik vody při jeho hoření ukázal, že se o flogiston nejedná. Podobný proces potkal později i kyslík.

¹Například methan byl objeven právě roku 1667, kdy vznikla i flogistonová teorie.

²Kdo neviděl, má domácí úkol. Stojí to za podíváním. Doma to však raději nezkoušejte.

Už teď by se mohlo zdát, že hledání flogistonu je natolik bezúspěšné, že by někde mohla být chyba. Ovšem zastánci flogistonové teorie (tehdy prakticky celá vědecká komunita) razili svoji teorii i přes okolnosti ji popírající. V 17. století si vědci při žíhání kovů všimli, že ač kov prochází procesem, který vypadal jako hoření (tedy uvolňování flogistonu), hmotnost kovu nepatrně roste. To při uvolňování látky nedává smysl – když se od popela látky (který zbude) oddělí jiná látka (flogiston), mělo by to, co zůstane, být lehčí. Vysvětlení vědců? Flogiston může mít i zápornou hmotnost.

Právě jsme dorazili do bodu, kde nám v současné době flogistonová teorie přestává dávat smysl – máme látku, která může mít kladnou i zápornou hmotnost (podle rozdílu hmotností před hořením a po hoření), tedy může mít i zápornou hustotu a co je nejdivnější – stále je to ta samá látka, která si vybírá, jak na tom zrovna bude. A nyní nastupuje A. Lavoisier s teorií, kterou se řídí chemie dodnes – hoření je chemickou reakcí hořící látky s kyslíkem, kterou nazýváme oxidace. Proč má popel po hoření dřeva hmotnost nižší, než mělo původní dřevo? Sloučeniny, které vznikly reakcí s kyslíkem, jsou stejně plynné jako kyslík (dnes víme, že je to převážně oxid uhličitý), tedy s popelem nezůstanou. A proč naopak po žíhání kovů má výsledná směs hmotnost vyšší? Oxidy kovů jsou převážně pevné látky, které se usadí na povrchu žíhaného kovu – kyslík se „připojí“ k povrchové vrstvě kovu (a vytvoří tam sloučeninu), čímž přidá k hmotnosti žíhaného kusu kovu svou hmotnost. Od publikování tohoto vysvětlení, které znělo podstatně smysluplněji než současná podoba flogistonové teorie, se k experimentálnímu vyvracení přidávali další vědci, až se podařilo zanechat flogistonovou teorii minulosti a vystavět chemii kolem hoření na principu oxidace, který velmi dobře vysvětlil i mnoho dalších jevů.

Teorie experimentu

Jistě jste již slyšeli, že experimentálně lze teorie pouze vyvracet, nelze je potvrzovat. Náš experiment je toho krásným příkladem – našroubujeme na něj jak teorii flogistonovou (ubývá nám hmotnost uvolněním flogistonu), tak teorii oxidace, kdy hmotnost taktéž ubývá (což je základ našeho experimentu), ovšem z důvodu vzniku oxidu uhličitého, který si volně odpluje vzduchem.

Zastávejme tedy na chvíli flogistonovou teorii a pojdme ukázat, že se nám hořením něco uvolňuje, a zároveň zjistit, jak moc je dřevo hořlavé, tedy kolik flogistonu obsahuje.³

Pro co nejpřesnější výsledky chceme najít kousky dřeva, které jsou co nejmenší, aby nám shořely v celém objemu, a tedy se uvolnil ideálně všechen flogiston. Ideální se jeví být sirky – jsou malé a jejich zapalování je jednoduše proveditelné.

Sirky jsou lehké, potřebujeme tedy hodně citlivé váhy. Poslouží nám váhy ze školní chemické laboratoře s přesností na miligramy. Pochopitelně můžeme experiment provádět i s méně citlivými vahami, ovšem pro dosažení dostatečné přesnosti budeme chtít použít dostatečně velké množství dřeva.

Nakonec nutno zdůraznit, že experiment musíme provádět na nehořlavém podkladu,⁴ zapalovat dřevo budeme mimo váhy, abychom je nepoškodili, a v neposlední řadě experiment provádíme v dostatečně větraném prostoru, protože flogiston není dýchatelný⁵ a nebude-li mít kam unikat, udusí nás i oheň, protože vzduch již nebude moci pojmout více flogistonu.

A proč měříme *minimální* množství flogistonu ve dřevěných sirkách? Sirku nikdy nespálíme dokonale. Ač to na první pohled nemusí být vidět, skoro vždy nám v sirce zbude kousek, který

³Podle flogistonové teorie obsahují hořlavější látky flogistonu zpravidla více.

⁴Kromě mnohých nepříjemností s hašením by nám popel z dřevěného stolu také ovlivnil měření.

⁵Určitě víte, že oxid uhličitý, který ve skutečnosti vzniká, vás ve větším množství může udusit.

by mohl ještě dál hořet a uvolnit ještě další flogiston. Proto víme, že flogistonu v sirkách bude vždy alespoň námi naměřený hmotnostní podíl, ale je možné, že ho je v sirkách ještě více.

Hmotnostní podíl flogistonu w ve dřevě určíme jako poměr hmotnosti, kterou měl uniklý flogiston m_{rozdil} , a původní hmotnosti sirky m_{pred} . Hmotnost uniklého flogistonu je, jak jsme zmínili již několikrát, rozdílem původní hmotnosti sirky a hmotnosti m_{po} toho, co ze sirky zbude po hoření:

$$w = \frac{m_{\text{rozdil}}}{m_{\text{pred}}} = \frac{m_{\text{pred}} - m_{\text{po}}}{m_{\text{pred}}}.$$

Měření

Nehořlavou podložku umístíme na váhy a vynulujeme je (váhy budou samy odečítat hmotnost podložky – např. misky). Na podložku umístíme deset sirek a zaznamenáme jejich hmotnost. Podložku se sirkami sejmeme, sirky zapálíme, počkáme, až dohoří a vychladnou, a vychladlou podložku s dohořelými sirkami umístíme zpět na váhy. Nyní můžeme zaznamenat hmotnost sirek po dohoření a celý experiment pro vyšší přesnost ještě několikrát zopakovat a zaznamenat do tabulky 1.

Číslo měření	$\overline{m_{\text{pred}}}$ g	$\overline{m_{\text{po}}}$ g	$\overline{m_{\text{rozdil}}}$ g
1	1,040	0,305	0,735
2	1,090	0,330	0,760
3	1,075	0,280	0,795
4	1,115	0,300	0,815
5	1,095	0,325	0,770
6	1,075	0,360	0,715
7	1,175	0,335	0,840
8	1,080	0,280	0,800
9	1,110	0,350	0,760
10	1,100	0,305	0,795
Průměr	$\overline{m_{\text{pred}}} = 1,096 \text{ g}$	$\overline{m_{\text{po}}} = 0,317 \text{ g}$	$\overline{m_{\text{rozdil}}} = 0,779 \text{ g}$
Abs. odchylka	$\Delta m_{\text{pred}} = 0,023 \text{ g}$	$\Delta m_{\text{po}} = 0,023 \text{ g}$	$\Delta m_{\text{rozdil}} = 0,046 \text{ g}$
Rel. nejistota	$\delta m_{\text{pred}} = 2,100 \%$	$\delta m_{\text{po}} = 7,260 \%$	$\delta m_{\text{rozdil}} = 5,910 \%$

Tabulka 1: Naměřené hodnoty

Nyní máme vypočtené všechny průměrné hmotnosti, které potřebujeme dosadit do výše zmíněného vzorce. Učiníme tak a dostaneme průměrný minimální hmotnostní podíl flogistonu v sirce:

$$\overline{w} = \frac{1,096 \text{ g} - 0,317 \text{ g}}{1,096 \text{ g}} \doteq 0,711.$$

Průměrně je tedy alespoň sedm desetin sirky tvořeno flogistonem.

Zbývá určit nejistotu celého nepřímého měření.⁶ Všem změřeným hodnotám jsme určili absolutní odchylku i relativní nejistotu. První výpočet, který jsme udělali, bylo odečtení hodnot před

⁶Podrobný návod na určování nejistot měření najdete na našich stránkách v sekci Hokus Pokus: https://vyfuk.mff.cuni.cz/rady_a_tipy/hokus_pokus

a po hoření. Tedy zde vypočteme absolutní odchylku rozdílu jako součet absolutních odchylek stavu před hořením a po hoření:

$$\Delta m_{\text{rozdil}} = 0,023 \text{ g} + 0,023 \text{ g} = 0,046 \text{ g}.$$

Pro další výpočet ovšem potřebujeme i relativní nejistotu rozdílu, kterou vypočteme jako podíl jeho absolutní odchylky a vypočtené průměrné hodnoty ($\overline{m}_{\text{rozdil}} = 0,779 \text{ g}$)

$$\delta m_{\text{rozdil}} = \frac{0,046 \text{ g}}{0,779 \text{ g}} = 0,0591 = 5,91 \%$$

Nyní už jen určíme relativní nejistotu podílu nyní vypočtené hodnoty a hodnoty naměřené před hořením

$$\delta w = \delta m_{\text{pred}} + \delta m_{\text{rozdil}} = 2,10 \% + 5,91 \% = 8,01 \%,$$

z čehož následně vypočteme i absolutní odchylku celého měření

$$\Delta w = \delta w \cdot \overline{w} = 8,01 \% \cdot 0,711 = 0,057.$$

Závěr

Flogiston v sirkách tvoří minimálně sedm desetin jejich hmotnosti. Naměřili jsme minimální hmotnostní podíl flogistonu ve dřevě sirek:

$$w = (0,711 \pm 0,057),$$

s relativní nejistotou $\delta w = 8,01 \%$.

Měření s osmiprocentní relativní odchylkou je již dosti nepřesné. Tuto nepřesnost mohlo způsobit například nedokonalé dohoření sirek, kdy každá sirka prohoří jinak dobře, v některých navíc mohlo zůstat ještě zbytkové nedohořelé dřevo. Dále při takto malých hmotnostech mohla nepřesnosti způsobovat i samotná manipulace s dohořelými sirkami, kdy například přesouváním podložky a prouděním vzduchu mohlo dojít k odfouknutí části jemného popela, který se ze sirek po dohoření odrolil.

Pro měření jsme použili velmi malé kousky dřeva. Pokud bychom zapálili například několik velkých polen, nebo bychom měření prováděli pokaždé na jiném kusu dřeva, měly by nám hodnoty vyjít podobně, ovšem míra prohoření v jednotlivých měřeních by se měla více lišit, tedy i přesnost měření by měla být nižší.

Bonus

Pokud jste, stejně jako my, pro měření využili sirky, mohli jste si všimnout, že hlavičky shořelých sirek se přitahují k magnetu.

Jednou ze složek barvy v sirkách je oxid železitý. Ten se při hoření mění na oxid železnatý, který je feromagnetický, a velmi pěkně se proto k magnetům přitahuje. Na fotografii si můžete prohlédnout silný neodymový magnet, ze kterého visí hned několik spálených sirek.



Obrázek 1: Magnetem přitahované sirky

Soňa Husáková
sona@vyfuk.org

Korespondenční seminář Výfuk je organizován studenty a přáteli MFF UK. Je zastřešen Oddělením propagace a mediální komunikace MFF UK a podporován Katedrou didaktiky fyziky MFF UK, jejími zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků. Realizace projektu byla podpořena Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy.

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