

Úloha VI.E ... nehrajte si se sirkami

12 bodů; (chybí statistiky)

Změřte rychlost hoření špejle v závislosti na úhlu naklonění vůči vodorovné rovině.

Protože benzín, který navrhoval Karel, byl už fakt moc.

Dřevo (respektive jeho hlavní složky) při hoření za normálních podmínek¹ nereaguje přímo s kyslíkem. Nejdříve totiž musí působením tepla dojít k rozpadu molekul dřeva na menší molekuly (neboli k pyrolýze). Ta má několik fází, které se nejlépe popisují teplotou dřeva. V první fázi, která probíhá přibližně do 200 °C, se dřevo primárně vysušuje, tato fáze je tedy endotermická. Ve druhé fázi, která probíhá do cca 280 °C, sice již dochází k tepelnému rozkladu sloučenin ve dřevě, stále se ale jedná převážně o endotermické reakce, při kterých nevznikají příliš hořlavé plyny. Dřevo v této fázi tmavne. Nad teplotou 280 °C se pyrolýza už stává exotermickou reakcí a vznikají sloučeniny, které snadno hoří. V této fázi pozorujeme plamen. Při teplotě nad cca 500 °C se dřevo skládá téměř čistě z uhlíku, který reaguje s kyslíkem.²

K zapálení musí mít dřevo dostatečný přísun tepla, aby dokázalo překonat endotermické fáze pyrolýzy a přešlo do třetí fáze, ve které vzniká teplo nutné k udržení celého procesu hoření. Čím více nehořící část špejle zasahuje do plamene, tím rychleji zvládne získat dostatek tepla, aby mohla také začít hořet. To se projeví vyšší rychlostí hoření. Zároveň je možné, že pro některé úhly už nebude docházet k dostatečnému přenosu tepla, aby se reakce udržela, a špejle zhasne. Také je zřejmé, že rychlost hoření bude záviset na množství tepla potřebného k překonání první fáze. To závisí na složení dřeva a především na jeho vlhkosti.³

Měření probíhalo tak, že jsme přibližně uprostřed špejle vyznačili po 10 cm značky, špejli jsme uchytili do stojanu a změřili jsme čas mezi dohořením k první a ke druhé značce. Jako místo, kde je plamen, jsme brali rozhraní světlé a tmavé části špejle, které bylo nejvíce ostré. Měřili jsme pro úhly v rozsahu od 0° do 120° po 15°. Pro každý úhel jsme provedli 4 měření, ze kterých jsme vypočítali střední hodnotu a směrodatnou odchylku. Tyto hodnoty jsme vynesli do grafu 1 a pro přehlednost jsme je proložili afinní funkcí $ax + b$. Následně jsme z klasického vzorce pro rychlost vypočítali rychlost hoření, kterou jsme vynesli do grafu 2. Ten jsme proložili funkcí $1/(ax + b)$, která vznikla transformací původní afinní funkce.

Z grafu 1 vidíme, že čas je afinní funkcí úhlu,⁵ což sice vypadá jako zajímavý jev, ale pro nás je mnohem důležitější rychlost hoření. Ta by intuitivně měla být přibližně úměrná výkonu, který se přenáší do dřeva. Jak vidíme, je popisována hyperbolou, která na první pohled nenaznačuje žádné fyzikální vysvětlení. Proto jsme stejná data i proloženou funkci vynesli v polárních souřadnicích do grafu 3, který již vypadá mnohem zajímavěji. Z dat (a tedy především proložené funkce) vidíme, že tvoří tvar nápadně podobný plamenu svíčky. Tvar plamene jistým způsobem odpovídá rozložení tepla v oblasti hoření. Proto špejle bude dostávat celkový

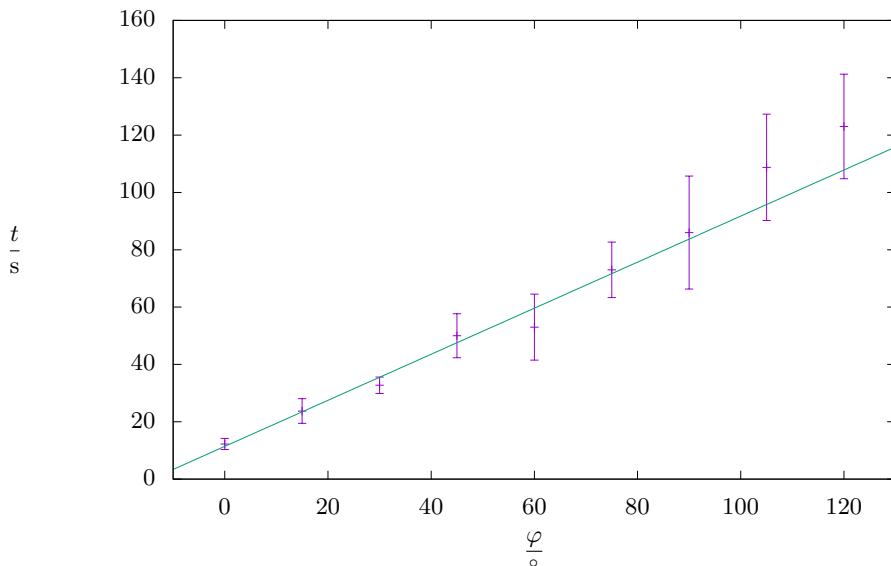
¹Nenormálními podmínkami je myšlena například přítomnost silného oxidačního činidla, případně vhodného katalyzátoru.

²<https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplmisc/rpt2136.pdf>

³To jsme skutečně ověřili. Když jsme zkusili zapálit špejle, které jsme našli v zásobě doma, zjistili jsme, že nehoří ani ve vodorovné poloze a že se musí držet téměř svisle s plamenem dole, aby vůbec hořely. Proto jsme je za účelem vysušení vložili na 20 minut do trouby, která byla předem rozehrátá na 150 °C. Vysoušení pomohlo a špejle poté hořely i ve svislé poloze s plamenem nahoře. Pro samotné měření jsme však použili jiné špejle.

⁴Vliv vody je nejvýraznější, protože má velmi vysoké měrné vypařovací teplo a také její obsah ve dřevě nejvíce kolísá.

⁵Pro velké úhly se projevuje určitá nelinearita. V této fázi ale špejle téměř nehoří a často zhasíná, čímž je přesnost měření i našeho modelu silně ovlivněna.



Obr. 1: Závislost doby hoření na úhlu od kolmice. (0° odpovídá svisle orientované špejli hořící zdola nahoru, 90° pak vodorovné pozici.)

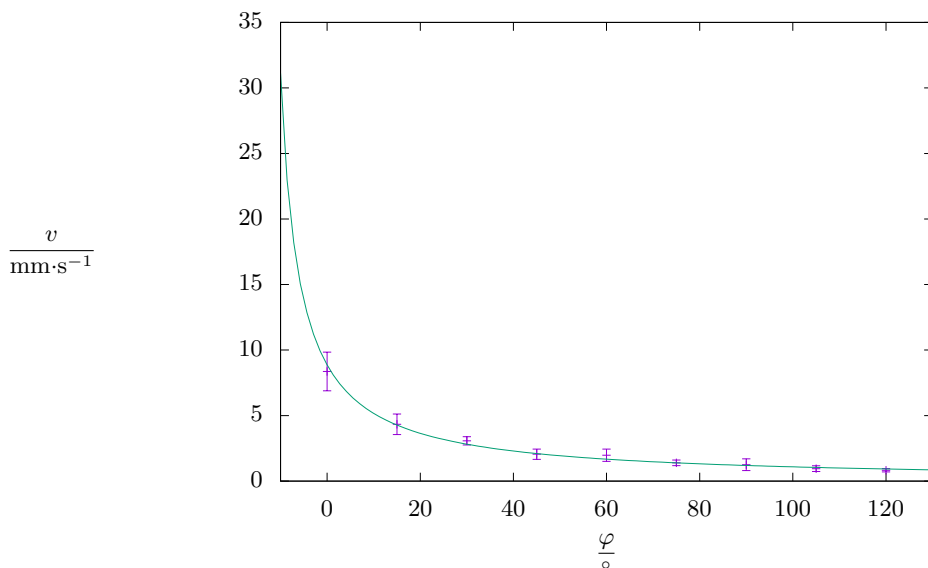
výkon úměrný průmětu dané oblasti grafu do přímky, která odpovídá špejli. Rychlost hoření pak bude přímo úměrná tomuto výkonu.⁶

Výsledky měření jsou ovlivněny mnoha různými okolnostmi. Největší vliv na rychlost hoření má vlhkost dřeva. Ta výrazně ovlivní dobu sušení, a tím i celkovou rychlost hoření, jak jsme již zmínili výše. Vzhledem k tomu, že proudění plynů v okolí plamene ovlivňuje teplo, které je přenášeno, bude rychlost hoření záviset na proudění vzduchu v místnosti.⁷ Dále se samozřejmě mohou projevit nejistoty měření času a úhlu. Také je možné, že špejle mají lehce odlišnou rychlost hoření z důvodu různých vlastností materiálu, ale to jsme částečně vyloučili použitím špejlí ze stejného balení. Můžeme předpokládat, že jsou z podobného materiálu, skladovaného ve stejných podmínkách. Navíc jsme měření opakovali, čímž bylo možné odhadnout rozptyl času pro daný úhel. Nemyslíme si, že napříč měřeními s různými podmínkami či špejlemi by mělo smysl porovnávat číselné hodnoty rychlosti, protože je téměř nemožné odfiltrovat vnější vlivy.

Všechny tyto okolnosti však nemají tak zásadní dopad, aby změnily charakter závislosti, kterou máme rozumně podloženou teorií. Explicitní tvar závislosti rychlosti hoření na čase sice z teorie neznáme, ten ale není příliš podstatný. Může se jednat o jinou funkci, například mocninnou, případně exponenciální, neboť pro velké úhly se začínají časy odchylovat od lineárního průběhu. Z tohoto důvodu by bylo zajímavé provést měření pro vysušené špejle, které umožňují měřit ve velkém rozsahu úhlů, čímž bychom zjistili, zda je nelinearita dána jen tím, že plamen je na pokraji zhasnutí, nebo zda to má fundamentálnější příčinu. Druhý zajímavý problém, který

⁶Samozřejmě, že výkon je rozprostřen po špejli rovnoměrně, ale během hoření se za čas potřebný k přehorení nějakého úseku v daném bodě energie potřebná k překonání endotermických fází reakce nastřádá rychleji.

⁷Venku je naprosto nereálné cokoliv smysluplného naměřit.



Obr. 2: Závislost rychlosti hoření na úhlu od kolmice. (0° odpovídá svisle orientované špejli hořící zdola nahoru, 90° pak vodorovné pozici.)

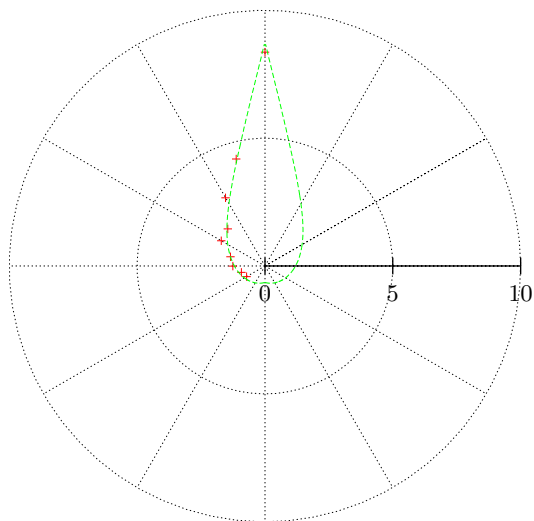
by bylo vhodné dále zkoumat, je získání prostorového modelu teploty v plameni pomocí metod mechaniky kontinua, ať už numericky nebo analyticky.⁸ Oba tyto návrhy ovšem přesahují rámec tohoto textu, tak je necháváme jako námět pro další výzkum.

Poznámky k došlým řešením

Došlá řešení se výrazně lišila – v pečlivosti měření, pečlivosti zpracování dat i diskusi výsledků. Osobně mě nejvíce mrzela řešení, která měla výborně naměřená data, ale autor neprojevil snahu o jakékoliv vysvětlení naměřených výsledků. Nevím, jestli je to má osobní deformace, ale mně ta naměřená závislost přijde naprosto fascinující a velmi překvapivá. Pokud člověk nepřemýšlí nad tím, co se tam děje, nikam jej to neposune, neb se jedná jen o rutinní provedení experimentu. A lidstvo posouvají kupředu spíše kreativní myšlenky a vysvětlení než rutinně prováděné experimenty. Proto jsem kladl při hodnocení velký důraz na teoretický popis výsledků a celkově kvalita diskuse tvořila téměř polovinu celkového hodnocení. Také se našla řešení, která mě zaujala, ať už trochu jiným uspořádáním experimentu⁹ nebo kreativním vysvětlením. Nakonec se hodí zmínit jedno řešení, kde autor navrhl praktickou aplikaci výsledků experimentu, kdy při přenášení hořícího klacku nechceme, aby zhasl, ale ani aby nám moc kouřil do obličeje,

⁸V druhém případě by samozřejmě bylo nutné model silně zjednodušit rozsáhlými aproximacemi a ani poté není vůbec jisté, zda-li by se nám podařilo nalézt řešení.

⁹Bohužel se nedalo posoudit, jestli to bylo ku prospěchu či ke škodě. . .



Obr. 3: Závislost rychlosti hoření na úhlu, vyneseno v polárních souřadnicích. Radiální osa je v mm, s^{-1}

a proto hledáme kompromisní úhel.

Mikuláš Matoušek
mikulas@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/>.

