

Domácí experimenty z termiky

Zdeněk Bochníček, Veronika Kolaříková

Přírodovědecká fakulta MU

Abstrakt

V příspěvku jsou popsány kvantitativní experimenty z termiky, které lze realizovat s obvyklým vybavením běžné domácnosti: kuchyňskými váhami, stopkami a rychlovarnou konvicí. V příspěvku jsou komentovány podmínky, za kterých je možné dosáhnout nejlepších výsledků a nejmenší odchylku od tabulkových hodnot. Text je doplněn analýzou nejistot měření kapacity kalorimetru směšovací metodou, ze které plyne, že v domácích podmínkách nemá smysl se o toto měření vůbec pokoušet.

Úvod

Domácí experimenty, při kterých jsou potřeba pomůcky dostupné v prakticky každé domácnosti, mohou být doplňkem fyzikálního vzdělávání i v situacích bez epidemických opatření. Následující text obsahuje několik experimentů z termiky, které umožňují kvantitativní vyhodnocení a získání dat porovnatelných s tabulkovými hodnotami.

Lze očekávat, že ve standardním vybavení domácnosti budou stopky – jsou součástí každého moderního mobilního telefonu – a váhy, jako obvyklá výbava kuchyně. Nelze však předpokládat, že v domácnosti žáka bude k dispozici teploměr, který bude možné ponořit do vody.

Přesto je možné vybrané kvantitativní experimenty z termiky realizovat zcela bez použití teploměru. I bez teploměru máme totiž dobrou informaci o třech teplotách:

- a) Teplota tání ledu: 0°C.
- b) Teplota varu vody 100°C.
- c) Pokojová teplota. V lepším případě je známa z údaje pokojového teploměru, v horším případě je vždy možné ji odhadnout v rozmezí 20°C – 25°C.

Ve většině domácností je také k dispozici rychlovarná konvice, jako jednoduchý a bezpečný prostředek realizace elektrického kalorimetru. S výše popsaným vybavením je tak možné provést základní školské experimenty z termiky v domácích podmínkách.

1) Měření měrné tepelné kapacity vody

Při ohřevu vody v elektrickém kalorimetru platí známá kalorimetrická rovnice

$$P\tau = (mc + K)\Delta t, \quad (1)$$

kde P je výkon kalorimetru, τ doba ohřevu, m hmotnost vody, c měrná tepelná kapacita vody, K kapacita kalorimetru a Δt změna teploty.

Na tomto místě nebudeme s kapacitou kalorimetru počítat. Ne proto, že by byla zanedbatelná, naopak v některých případech je významná, ale proto, že ji v podstatě není možné standardní směšovací metodou určit, zvláště ne v domácích podmínkách, viz odstavec 6.

Pro měrnou tepelnou kapacitu vody tak získáme rovnici:

$$c = \frac{P\tau}{m\Delta t} \quad (2)$$

Provedení experimentu

Necháme delší dobu odstát potřebné množství vody, aby se její teplota vyrovnala s teplotou okolí. Pak známou hmotnost vody nalijeme do rychlovarné konvice a měříme čas, za který je v konvici uvedena do varu. Okamžik varu je možné identifikovat buď automatickým vypnutím konvice, nebo akusticky. I když je druhý způsob subjektivní, pravděpodobně lépe odpovídá okamžiku dosažení teploty varu, protože konvice obvykle vypíná s několikasekundovým zpožděním.

Měření bylo provedeno pro větší počet hmotností vody. Počáteční – pokojová teplota byla 20°C a rychlovarná konvice měla nominální výkon 2000 W. Výsledky měření jsou v tabulce 1.

Tabulka 1. Výsledky měření měrné tepelné kapacity vody.

m (kg)	τ (s)	c (Jkg ⁻¹ K ⁻¹)
0,14	44	7860
0,207	54	6520
0,298	72	6040
0,405	93	5740
0,517	115	5560
0,604	130	5380
0,681	140	5140
0,82	166	5060
1,033	209	5060
1,426	285	5000

Vidíme, že ve všech případech vyšla měrná tepelná kapacita vody vyšší než tabelovaná hodnota. Přičemž s rostoucí hmotností vody monotónně konverguje ke správné hodnotě. Příčin systematické odchylky směrem k větším hodnotám je několik: zanedbání tepelné

kapacity kalorimetru, tepelné ztráty, pozdní vypnutí rychlovarné konvice případně odchylka reálného výkonu konvice od výkonu udávaného výrobcem.

Z uvedeného měření současně plyne doporučení pro minimalizaci chyb: Výhodné je ohřívat velké množství vody, protože v tomto případě jsou nižší chyby způsobené nejistotou okamžiku dosažení teploty varu a vlivem nenulové kapacity kalorimetru/konvice.

2) Současné měření měrné tepelné kapacity vody a kapacity kalorimetru

Data z tabulky 1 lze vyhodnotit i jiným sofistikovanějším způsobem, který poskytne výrazně lepší výsledky. Vydeme z rovnice (1), která zohledňuje kapacitu kalorimetru. Vyjádříme závislost doby ohřevu na hmotnosti ohřívání vody:

$$\tau = \frac{c\Delta t}{P}m + \frac{K\Delta t}{P}. \quad (3)$$

Vidíme, že závislost je lineární se směrnici

$$A = \frac{c\Delta t}{P} \quad (4)$$

a absolutním členem

$$B = \frac{K\Delta t}{P}. \quad (5)$$

Vyneseme-li data do grafu a závislosti proložíme přímkou, viz obrázek 1, dostaneme

$$\tau = 187m + 15, \quad (6)$$

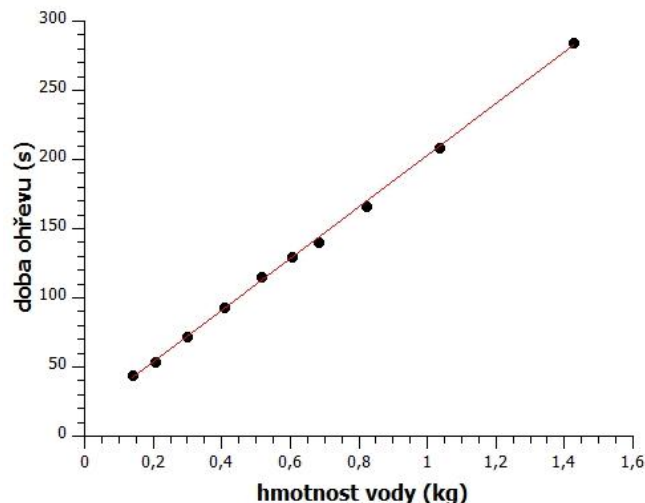
odkud

$$c = \frac{AP}{\Delta t} = \frac{187 \cdot 2000}{80} \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1} = 4680 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1} \quad (7)$$

a

$$K = \frac{BP}{\Delta t} = \frac{15 \cdot 2000}{80} \text{ JK}^{-1} = 375 \text{ JK}^{-1}. \quad (8)$$

Tímto postupem zohledníme vliv kapacity kalorimetru, jejíž určení nezávislým experimentem – směšovací metodou – je velmi problematické, viz odstavec 6. Takto získaná hodnota měrné tepelné kapacity vody je bližší tabelované hodnotě než kterákoliv z hodnot uvedených v tabulce 1.



Obrázek 1. Závislost doby ohřevu na hmotnosti vody v kalorimetru.

3) Měření měrného skupenského tepla varu vody

Měření vychází z jednoduché rovnice

$$\Delta m l_v = P \tau, \quad (9)$$

kde Δm je hmotnost vypařené vody, l_v měrné skupenské teplo výparné, P výkon kalorimetru a τ doba varu.

Provedení experimentu

Jisté množství vody uvedeme v rychlovarné konvici do varu. Po krátkém varu konvici odstavíme a zvážíme. Poté konvici opět zapneme a po několik minut necháme vodu v konvici vřít. Je třeba mít otevřené víčko konvice, aby se zabránilo jejímu automatickému vypnutí. Po ukončení varu konvici s vodou opět zvážíme. Příklady měření jsou v tabulce 2.

Tabulka 2. Měření měrného skupenského tepla vypařování vody.

	Δm (kg)	τ (s)	l_v kJkg ⁻¹
1	0,080	105	2630
2	0,127	167	2630
3	0,117	148	2530
4	0,111	144	2600

Spočtený průměr z hodnot je roven $l_v = (2590 \pm 20) \text{ kJkg}^{-1}$. Což je asi o 15% vyšší hodnota než je hodnota tabelovaná (2257 kJkg^{-1}).

Vyšší hodnota měrného skupenského tepla výparného může být způsobena zanedbáním tepelných ztrát a také skutečností, že část odpařené vody zpětně kondenzuje na otevřeném víčku konvice.

4) Měření měrného skupenského tepla tání ledu

Měření vychází z následující rovnice

$$P\tau = m_v c \Delta t_v + m_l c \Delta t_l + m_l l_t, \quad (10)$$

respektive

$$P\tau = (m_v c + K) \Delta t_v + m_l c \Delta t_l + m_l l_t, \quad (11)$$

pokud uvážíme kapacitu kalorimetru. Zde m_v a m_l jsou hmotnosti vody, respektive ledu, Δt_v a Δt_l rozdíl výsledné a počáteční teploty vody, resp. ledu. Ostatní symboly mají obvyklý již dříve zavedený význam.

Například z rovnice (11) získáme

$$l_t = \frac{P\tau - (m_v c + K) \Delta t_v - m_l c \Delta t_l}{m_l} \quad (12)$$

Provedení experimentu

Necháme delší dobu odstát potřebné množství vody, aby se její teplota vyrovnala s teplotou okolí. Odvážené množství vody nalijeme do rychlovarné konvice a vše i s konvicí zvážíme. Mezitím necháme stát kostky ledu v misce do té doby, než začnou tát (cca 15 min). Takto budeme mít jistotu, že kostky ledu mají teplotu 0°C. Roztátou vodu slijeme, kostky vhodíme do rychlovarné konvice a měříme čas, za jaký začne voda v konvici vřít. Po ukončení měření konvici opět zvážíme, a tak zjistíme množství ledu, které jsme do konvice nasypali.

Příklady výsledků měření jsou v tabulce 3, kde jsou současně uvedeny hodnoty vypočtené ze vztahu (10) a (11) (Zde použita kapacita kalorimetru/konvice z odstavce 2).

Tabulka 3. Měření měrného skupenského tepla tání ledu.

	m_v (kg)	m_l (kg)	τ (s)	l_t (kJK ⁻¹) (z rovnice (10))	l_t (kJK ⁻¹) (z rovnice (11))
1	0,407	0,444	260	402	332
2	0,219	0,589	280	377	325
3	1,015	0,255	277	415	297

Vidíme, že započtení kapacity kalorimetru významným způsobem zlepší výslednou hodnotu a přiblíží ji hodnotě tabelované (335kJK⁻¹). Přestože hodnoty z posledního sloupce tabulky jsou ve velmi dobré shodě s tabelovanou hodnotou, ve skutečně domácích podmínkách nelze podobný úspěch očekávat. Je pravděpodobné, že nebude

k dispozici hodnota kapacity kalorimetru/konvice a také přesnější údaj o výkonu konvice, což, možná překvapivě, je velice důležitý parametr. Dosadíme-li například do upravené rovnice (10) číselné hodnoty z posledního řádku tabulky 3, dostaneme:

$$l_t = \frac{2000 \cdot 277 - 1,015 \cdot 4200 \cdot 80 - 0,255 \cdot 4200 \cdot 100}{0,255} \quad (13)$$

$$l_t = \frac{554000 - 448000}{0,255} \quad (14)$$

Z číselných hodnot vidíme, že např. změna výkonu konvice o deset procent (respektive jeho nejistota) způsobí změnu/nejistotu hodnoty skupenského tepla tání o 50 %! V domácích podmínkách je obvykle k dispozici pouze nominální hodnota výkonu konvice, kterou někteří výrobci udávají ve značném rozptylu. V těchto případech poskytne metoda měření skupenského tepla tání pouze orientační hodnotu.

Z uvedeného vyplývá doporučení pro realizaci tohoto experimentu: V ohřívané směsi voda-led by mělo být maximální množství ledu a minimální množství kapalné vody. Vody stačí jen tolik, aby byl led částečně zaplaven. Pak se zvětší rozdíl mezi teplem dodaným konvicí a teplem potřebným pro ohřev kapalné vody do varu. Podle zkušeností autorů se led před dosažením varu i při malém množství vody vždy rozpustí a je tedy možné použít kalorimetrickou rovnici ve tvaru (10) nebo (11).

5) Měření měrné tepelné kapacity pevných látek

Pomocí rychlovarné konvice lze změřit i měrnou tepelnou kapacitu pevných látek. Avšak vzhledem k tomu, že kvůli vysokému výkonu konvice je vlastní měření poměrně krátké, je nutné jako měřenou pevnou látku použít materiál, který je k dispozici v malých kouscích. Nabízí se potraviny jako rýže nebo čočka, které lze pravděpodobně najít v každé domácnosti, v domácnosti kutilů se mohou najít ocelové matky či podložky.

Zde ukážeme alternativní způsob měření, ve kterém dochází ke kompenzaci systematických chyb způsobených neznámou kapacitou kalorimetru a neurčitostí dosažení teploty varu.

Metoda je založena na dvojím měření. Nejprve ohřejeme do varu jisté množství měřené pevné látky (hmotnost m_n) spolu s vodou o hmotnosti m_v . Tento děj popisuje kalorimetrická rovnice

$$P\tau_1 = m_n c_n \Delta t + m_v c_v \Delta t + K \Delta t, \quad (15)$$

ve které jsme započítali kapacitu kalorimetru K .

Ve druhém experimentu ohříváme pouze stejné množství vody ze stejné výchozí teploty (typicky teplota okolí).

$$P\tau_2 = m_v c_v \Delta t + K \Delta t, \quad (16)$$

Odečtením obou rovnic dostaneme

$$P(\tau_1 - \tau_2) = m_n c_n \Delta t, \quad (17)$$

odkud pro měrnou tepelnou kapacitu pevné látky platí

$$c_n = \frac{P(\tau_1 - \tau_2)}{m_n \Delta t}. \quad (18)$$

Provedení experimentu

Necháme delší dobu odstát větší množství vody, aby se vyrovnala teplota s okolím. Odvážené množství vody a zrnité pevné látky umístíme do konvice a začneme ohřívat. Je dobré směs promíchávat. Měříme čas do dosažení varu.

Před druhým měřením musíme nechat prázdnou konvici delší dobu vytemperovat, aby zejména topné těleso a jeho bezprostřední okolí se stačilo vyrovnat s pokojovou teplotou. Do konvice odvážíme stejné množství vody a opakujeme ohřev do varu. Pro tento experiment nejsou vhodné konvice, které mají topnou spirálu uvnitř nádoby v přímém kontaktu s náplní.

Jako příklad byly použity malé skleněné kuličky, protože to je materiál, kde lze alespoň přibližně zjistit tabelovanou měrnou tepelnou kapacitu. Byla opět použita rychlovarné konvice s výkonem 1950W, pokojová teplota byla 20,6°C. Výsledky jsou v tabulce 4.

Tabulka 4. Měření měrné tepelné kapacity skla.

m_n	m_v	τ_1	τ_2	c_n
0,694	0,345	90	70	710
0,721	0,322	85	66	650

Tabulkové hodnoty pro sklo se pohybují v rozmezí 670 – 840Jkg⁻¹K⁻¹, tedy naměřené hodnoty jsou v docela dobrém souladu.

Pro minimalizaci experimentálních chyb je vhodné volit maximální množství pevné látky a minimální množství kapalné vody. Pak je rozdíl časů v čitateli rovnice (18) velký. Na druhé straně při velkém množství pevné látky je nutné směs během ohřevu míchat a také se hůře odhaduje okamžik počátku varu. Vhodným kompromisem je situace, kdy je vody o něco málo více, než aby byla pevná látka právě zaplavena.

6) Analýza nejistot při měření kapacity kalorimetru směšovací metodou

Standardní postup měření kapacity kalorimetru spočívá v dolití jistého množství teplé vody (hmotnost m_2 , teplota t_2) do kalorimetru se studenou vodou s hmotností m_1 , teplota t_1 . Výsledná teplota se ustálí na hodnotě t . Platí kalorimetrická rovnice

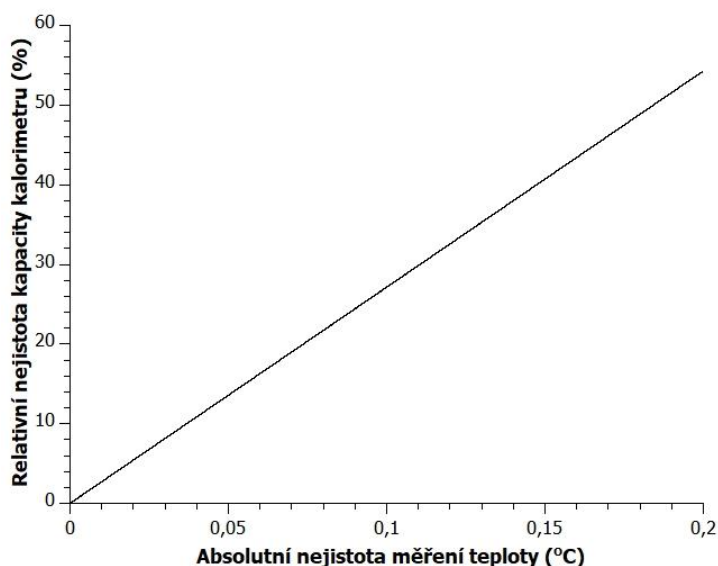
$$(m_1c + K)(t - t_1) = m_2c(t_2 - t), \quad (19)$$

odkud kapacitu kalorimetru K vyjádříme jako

$$K = \frac{m_2c(t_2 - t) - m_1c(t - t_1)}{(t - t_1)}. \quad (20)$$

S tímto měření je spojen vážný experimentální problém, který často v podstatě znemožňuje tepelnou kapacitu kalorimetru určit. Tepelná kapacita teploměrné látky – vody – je totiž násobně větší kapacita vlastního kalorimetru. V čitateli vztahu (20) se pak odečítají dvě blízka čísla, což dramaticky zvyšuje nejistotu výsledné hodnoty.

Vztah byl analyzován pomocí zákona šíření nejistot. Závislost relativní nejistoty určení kapacity kalorimetru jako funkce absolutní nejistoty měření teploty je na obrázku 2.



Obrázek 2. Vliv nejistoty měření teploty na nejistotu kapacity kalorimetru.

Z grafu vidíme, že i velmi přesná měření teploty s nejistotou desetín stupně Celsia vedou k nejistotě kapacity kalorimetru v desítkách procent.

(Graf byl počítán pro kapacitu kalorimetru 100JK^{-1} , hmotnosti studené a teplé vody 0,3 kg a jejich teploty 15°C a 35°C .)

Z detailnější analýzy vyplývá, že určení kapacity kalorimetru je nejpřesnější v případě, kdy hmotnosti studené a teplé vody jsou přibližně shodné. Přesto s běžnými domácími přístroji pro měření teploty s nejistotami kolem 1°C , jsou-li vůbec k dispozici, nedává smysl se o měření kapacity kalorimetru směšovací metodou vůbec pokoušet.

Závěr

Popsané experimenty poskytují výsledky, které se liší od tabulkových hodnot maximálně o 20 %, což lze vzhledem k jednoduchosti jejich provedení považovat za úspěch. Navíc je zjevné, jaké systematické jevy výslednou hodnotu ovlivňují: Tepelné ztráty, kapacita kalorimetru – rychlovarné konvice, nejistota určení okamžiku dosažení teploty varu, nejistota skutečného výkonu konvice. Vlastní měření může být tak snadno doplněno diskusí o vlivu těchto systematických chyb na výslednou hodnotu včetně číselných odhadů.

Literatura

[1] Kolaříková V.: *Experimenty z termiky ve fyzikálním praktiku a domácích podmínkách*. Bakalářská práce, Brno 2021.