

## HMOTNOSTNÁ TEPELNÁ KAPACITA TUHÝCH LÁTOK

Doc. RNDr. D. Vajda, CSc., RNDr. B. Trpišová, Ph.D.

### *Teoretický úvod:*

Množstvo tepla potrebného na zvýšenie teploty látky závisí od hmotnosti látky, chemického zloženia, vnútornej štruktúry (stavby). To množstvo tepla, ktoré musíme telesu dodať/odobrať, aby sme zvýšili/znížili jeho teplotu o jeden kelvin (jeden stupeň celzia), nazývame tepelnou kapacitou telesa  $C$ . Definujeme ju vzťahom

$$C = \frac{dQ}{dT} \text{ [JK}^{-1}\text{]}. \quad (1)$$

Tepelná kapacita teda vyjadruje podiel elementárneho množstva tepla  $dQ$  telesu dodaného a príslušnej zmeny teploty  $dT$  súvisiacej s dodaním tepla.

Tepelná kapacita látky prepočítaná na jednotkovú hmotnosť (1 kg) je hmotnostná tepelná kapacita látky a je definovaná vzťahom

$$c = \frac{1}{m} \frac{dQ}{dT}, \text{ alebo pre konečné zmeny: } c = \frac{1}{m} \frac{\Delta Q}{\Delta T} \text{ [Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}\text{]}, \quad (2)$$

kde  $m$  - hmotnosť telesa

$\Delta Q$  - teplo dodané alebo odobrané

$\Delta T$  - zmena teploty

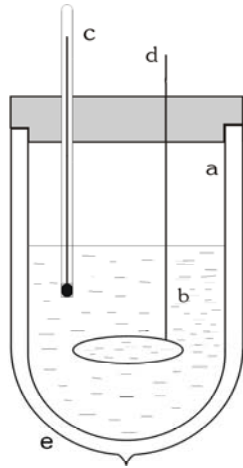
Hmotnostná tepelná kapacita  $c$  je teda množstvo tepla, ktoré musíme dodať alebo odobrať 1 kg látky na to, aby sa jeho teplota zmenila o 1 K (1 °C).

Poznamenajme, že zmena teploty vyjadrená v kelvinoch sa rovná zmene teploty vyjadrenej v stupňoch celzia, t. j.  $\Delta T[\text{K}] = \Delta t[^\circ\text{C}]$ . Je teda jedno, či v druhom vzťahu v (2) použijeme pri výpočtoch tepelných kapacít rozdiel teplôt udaných v kelvinoch  $\Delta T$  alebo rozdiel teplôt udaných v stupňoch celzia  $\Delta t$ .

Hodnota hmotnostnej tepelnej kapacity závisí od podmienok, za ktorých sa teplo látke dodáva. Vo všeobecnom prípade hovoríme o hmotnostnej tepelnej kapacite pri konštantnom objeme  $c_v$  a pri konštantnom tlaku  $c_p$ . Hmotnostné tepelné kapacity  $c_v$  a  $c_p$  sa u tuhých látok líšia veľmi málo, takže v bežných prípadoch k ich rozdielu nie je potrebné prihliadať a preto v ďalšom položíme pre tuhé látky  $c_v = c_p = c$ . Pri dostatočne vysokých teplotách ako aj pri izbových teplotách je hmotnostná tepelná kapacita tuhých látok veličina konštantná.

### *Kalorimetrická metóda určovania hmotnostných tepelných kapacít tuhých látok:*

Na určovanie hmotnostných tepelných kapacít látok sa najčastejšie používa zmiešavací kalorimeter, vid' obrázok. Je to tepelne izolovaná nádoba, v ktorej skúmanej látke o hmotnosti  $m$  dodávame alebo odoberáme množstvo tepla  $\Delta Q$  a meriame zmenu jej teploty  $\Delta t$ . Zmiešavací kalorimeter sa skladá z nádoby tvaru valca (a) naplnenej kvapalinou (b) (najčastejšie destilovanou vodou) o známej  $c$ , ktorá chemicky nereaguje s vyšetřovanou látkou (telesom), teplomera (c) a miešačky (d). Táto nádoba je uložená do inej, väčšej nádoby. Vrstva vzduchu medzi nimi tvorí tepelnú izoláciu. Nádoby a a e bývajú často nahradené Dewarovou nádobou.



V ideálnom prípade by skúmaná látka (teleso), ktorá je zahriata na vyššiu teplotu ako voda v kalorimetri a kalorimeter, všetko dodané teplo odovzdala vode v kalorimetri. V skutočnosti sa vždy časť dodaného tepla spotrebuje na ohriatie kalorimetra a jeho súčastí (nádoba, teplomer, miešačka) a časť tepla sa odvedie do prostredia, ktoré kalorimeter obklopuje. Toto všetko oceňujeme tak, že do výpočtov zavádzame tepelnú kapacitu kalorimetra  $K$ . V zhode s definíciou,  $K$  je teplo, ktoré musíme dodať, aby kalorimeter a jeho súčasti zvýšili svoju teplotu o jeden kelvin a určujeme ju experimentálne pre každý kalorimeter zvlášť. Meranie je založené na zákone zachovania energie, ktorý v tomto prípade hovorí: Keď sú dve látky o rôznych teplotách v tepelnom kontakte, ich teploty sa po

určitom čase vyrovnajú, pričom teplo odovzdané teplejšou látkou sa rovná teplu prijatému chladnejšou látkou. Toto tvrdenie vyjadrené matematicky sa nazýva kalorimetrická rovnica.

### A. Určenie hmotnostnej tepelnej kapacity tuhých látok

Kalorimeter o tepelnej kapacite  $K$  sčasti naplníme vodou o hmotnostnej tepelnej kapacite  $c_1$  a hmotnosti  $m_1$ . Počkáme, kým si voda a kalorimeter vymenia teplotu, t. j. kým sa ich teplota ustáli na hodnote  $t_1$ , ktorú zmeriame. Potom zahrejeme teleso o hmotnosti  $m_2$  (vyrobené z látky, ktorej hmotnostnú tepelnú kapacitu  $c$  máme stanoviť) na teplotu  $t_2$ , ktorá by značne mala zhruba o 40-50 stupňov prevyšovať teplotu  $t_1$ , a vložíme ho do kalorimetra. Dôjde k výmene tepla a teplota vody, telesa v kalorimetri a kalorimetra sa ustália na teplote  $t$ .

Na základe zákona zachovania energie teplo  $\Delta Q_2$ , ktoré teleso odovzdá, sa rovná súčtu  $\Delta Q_1$  a  $\Delta Q_3$ , kde  $\Delta Q_1$  je teplo, ktoré prijme voda a  $\Delta Q_3$  je teplo, ktoré prijme kalorimeter s príslušenstvom, t. j.

$$\Delta Q_2 = \Delta Q_1 + \Delta Q_3 \quad (3)$$

kde:

$$\Delta Q_2 = m_2 c (t_2 - t) \quad (4)$$

$$\Delta Q_1 = m_1 c_1 (t - t_1) \quad (5)$$

$$\Delta Q_3 = K(t - t_1) \quad (6)$$

Vzťahy (4) a (5) sme získali z druhej rovnosti v (2) a vzťah (6) z rovnosti (1), kde sme infinitezimálne (nekonečne malé) prírastky teploty a tepla  $dT$  a  $dQ$  zamenili konečnými prírastkami  $\Delta T$  a  $\Delta Q$ . Vo všetkých troch rovniciach sú teploty vyjadrené v stupňoch celzia, keďže teplomery, s ktorými teploty meriame, sú okalibrované v stupňoch celzia a je teda pohodlnejšie narábať s týmito jednotkami teploty.

Po dosadení vzťahov (4), (5) a (6) do vzťahu (3) dostávame kalorimetrickú rovnicu

$$m_2 c (t_2 - t) = (m_1 c_1 + K) (t - t_1), \quad (7)$$

a po jej úprave vzťah pre hmotnostnú tepelnú kapacitu vyšetrovanej látky

$$c = \frac{(m_1 c_1 + K)(t - t_1)}{m_2 (t_2 - t)}. \quad (8)$$

## B. Určenie tepelnej kapacity kalorimetra $K$

Kalorimeter o tepelnej kapacite  $K$  naplníme asi do polovice vodou o hmotnosti  $m_4$  a hmotnostnej tepelnej kapacite  $c_1$ . Počkáme, kým sa teplota vody a kalorimetra s príslušenstvom ustália (vyrovňajú) tak, že ich teploty môžeme považovať za rovnaké a rovné  $t_4$ . Potom do kalorimetra dolejeme teplú vodu o hmotnosti  $m_5$ , teplotu  $t_5$  a hmotnostnej tepelnej kapacite  $c_1$ . Po výmene tepla sa teplota vody a kalorimetra ustáli na výslednej hodnote  $t^*$ .

Pri výmene tepla v kalorimetri teplejšia voda odovzdá teplo  $\Delta Q_5$ , chladnejšia voda prijme teplo  $\Delta Q_4$  a kalorimeter s príslušenstvom prijme teplo  $\Delta Q_6$ . Opäť na základe zákona zachovania energie

$$\Delta Q_5 = \Delta Q_4 + \Delta Q_6, \quad (9)$$

$$\Delta Q_5 = m_5 c_1 (t_5 - t^*) \quad (10)$$

$$\Delta Q_4 = m_4 c_1 (t^* - t_4) \quad (11)$$

$$\Delta Q_6 = K(t^* - t_4). \quad (12)$$

platí

kde na základe druhého vzťahu v (2) a rovnice (1)

Po dosadení (10), (11) a (12) do (9) získame kalorimetrickú rovnicu

$$m_5 c_1 (t_5 - t^*) = m_4 c_1 (t^* - t_4) + K(t^* - t_4), \quad (13)$$

odkiaľ vyjadríme tepelnú kapacitu kalorimetra

$$K = m_5 c_1 \frac{(t_5 - t^*)}{(t^* - t_4)} - m_4 c_1 \quad (14)$$

### Úlohy:

1. Určte tepelnú kapacitu  $K$  zmiešavacieho kalorimetra.
2. Určte hmotnostnú tepelnú kapacitu troch tuhých látok.
3. Určte chybu merania.
4. Experimentálne získané hmotnostné tepelné kapacity  $c$  porovnajte s tabuľkovými hodnotami a urobte diskusiu.

### Postup merania a spracovanie výsledkov:

#### Určenie tepelnej kapacity kalorimetra

Aby sme určili hmotnostnú tepelnú kapacitu tuhej látky zo vzťahu (8), musíme poznať tepelnú kapacitu kalorimetra  $K$ . Zistíme ju týmto postupom:

1. Kalorimeter otvoríme a vyberieme z neho vnútornú nádobu. Túto nádobu odvážime na digitálnych váhach a jej hmotnosť označíme  $m_0$ .
2. Asi do polovice výšky vnútornej nádoby nalejeme studenú vodu a celú nádobu aj s vodou odvážime na váhach. Od takto získanej hmotnosti odčítame hmotnosť prázdnej nádoby  $m_0$ , čo nám dáva hmotnosť studenej vody  $m_4$ .
3. Vnútornú nádobu aj so studenou vodou vložíme do vonkajšej nádoby kalorimetra a celý kalorimeter uzavrieme. Miešačkou miešame vodu v kalorimetri, kým sa teplota vody a kalorimetra s príslušenstvom ustália na teplote  $t_4$ .

- Na variči nahrejeme primerané množstvo vody na teplotu napr. zhruba 60-70 °C. Túto teplotu zmeriame – teplota  $t_5$  – a čo najrýchlejšie vlejeme teplú vodu do studenej vody nachádzajúcej sa vo vnútornej nádobe kalorimetra. Kalorimeter uzavrieme a miešačkou miešame vodu v ňom, pričom stále sledujeme teplomer. Keď už teplota prestane stúpať, odmeriame ju. Toto je výsledná teplota  $t^*$ .
- Po odmeraní teploty  $t^*$  vyberieme vnútornú nádobu kalorimetra z jeho vonkajšej nádoby a odvážime na váhach. Od tejto hmotnosti odčítame hmotnosti  $m_0$  a  $m_4$ , výsledkom čoho je hmotnosť teplej vody  $m_5$ .
- Namerané hmotnosti  $m_4$  a  $m_5$  v kilogramoch, teploty  $t^*$ ,  $t_4$  a  $t_5$  a hmotnostnú tepelnú kapacitu vody  $c_1 = 4186 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$  dosadíme do rovnice (14) a vypočítame tepelnú kapacitu kalorimetra  $K$ .

#### *Určenie hmotnostných tepelných kapacít tuhých látok*

K meraniu sú k dispozícii tri alebo štyri telieska valcovitého tvaru, ktoré sú vyrobené z mosadze, železa, medi a hliníka. Postup merania je nasledovný:

- Na váhach zvážíme aspoň tri telieska, každé zvlášť. Hmotnosť telieska vystupuje v rovnici (8) ako  $m_2$ .
- Do vnútornej nádoby kalorimetra dáme dostatočné množstvo vody tak, aby v nej bolo teliesko úplne ponorené, keď ho tam po zahriatí vložíme. Známym postupom zistíme hmotnosť vody v kalorimetri  $m_1$  a teplotu vody a kalorimetra s príslušenstvom  $t_1$ .
- Vyšetrované teliesko vložíme do nádoby s vodou tak, aby v nej bolo úplne ponorené. Nádobu s telieskom zahrievame, až kým teplota vody nedosiahne opäť zhruba 60-70 °C. Budeme predpokladať, že takúto teplotu má aj teliesko a označíme ju  $t_2$ .
- Teplotu kúpeľa odmeriame a čo najrýchlejšie, aby tepelné straty boli čo najmenšie, preniesieme jedno z teliesok do kalorimetra. Kalorimeter zatvoríme a miešačkou miešame vodu v ňom dovtedy, kým teplota prestane stúpať, t. j. kým sa výmena tepla medzi telieskom, vodou a kalorimetrom neukončí. Túto teplotu zmeriame a označíme  $t$ .
- Použijúc namerané hmotnosti  $m_1$  a  $m_2$  (v kilogramoch), teploty  $t$ ,  $t_1$  a  $t_2$  a experimentálne zistenú tepelnú kapacitu kalorimetra  $K$ , vypočítame hmotnostnú tepelnú kapacitu  $c$  vyšetrovaného telieska.
- Body 2 až 5 opakujeme aj pre ostatné telieska. Pre každé teliesko do kalorimetra vždy nalievame novú vodu a zisťujeme  $m_1$  a  $t_1$ , ako aj teplotu kúpeľa  $t_2$ . Aspoň vnútorné časti kalorimetra, ktoré sú najviac zahriate z predchádzajúceho merania, pred ďalším meraním ochladíme pod tečúcou vodou.
- Vypočítané hmotnostné tepelné kapacity porovnáme s tabuľkovými hodnotami a urobíme diskusiu o možných zdrojoch chýb merania.

Poznamenávame, že hmotnosti vody  $m_1$ ,  $m_4$  a  $m_5$  môžeme určovať aj bez rozoberania kalorimetra, keď budeme vážiť celý kalorimeter aj s príslušenstvom.

#### **Kontrolné otázky:**

- Objasnite pojmy tepelná kapacita, hmotnostná tepelná kapacita a uveďte súvislosť medzi nimi.
- Objasnite pojem teplo a teplota.
- Odvoďte vzťah (8) pre hmotnostnú tepelnú kapacitu tuhej látky určovanú zmiešavacím kalorimetrom.
- Odvoďte vzťah (14) pre tepelnú kapacitu kalorimetra.
- Prečo rozdiel teplôt udaných v kelvinoch sa rovná rozdielu teplôt udaných v stupňoch celzia, t. j.  $\Delta T = \Delta t$ ?

**Doplnená a upravená úloha zo skrípt:**

Doc. RNDr. Drahošlav Vajda, CSc., Doc. Ing. Július Štelina, CSc., RNDr. Jaroslav Kovár, Ing. Ctibor Musil, CSc., RNDr. Ivan Bellan, Doc. Ing. Igor Jamnický, CSc., „*Návody k laboratórnym cvičeniam z fyziky*“, vydala Žilinská univerzita vo vydavateľstve EDIS, 2. nezmenené vydanie, rok 2003