

Měření měrné tepelné kapacity pevných látek a kapalin

Úkol č. 1: Změřte měrnou tepelnou kapacitu kovového tělíska.

Pomůcky

Směšovací kalorimetr s míchačkou, laboratorní váhy, sada závaží, destilovaná voda, teploměr s rozsahem 0 – 100 °C, stopky, kovový váleček s očkem, kádinka 250 ml, plynový kahan, třínožka, azbestová podložka, azbestová síťka.

Teorie

Měrná tepelná kapacita c látky je množství tepla potřebného k zahřátí 1 kg látky o 1°C. Zahřeje-li se těleso o hmotnosti m přijetím tepla Q o Δt °C, je jeho měrná tepelná kapacita podle definice

$$c = \frac{Q}{m\Delta t}, \quad (1)$$

jednotkou měrné tepelné kapacity v SI je $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Měrnou tepelnou kapacitu pevné látky budeme měřit ve směšovacím kalorimetru, jehož tepelnou kapacitu K určíme experimentálně (viz Dodatek 3). Do kalorimetru nalijeme vodu o hmotnosti m_1 a teplotě t_1 . Pak do něj vložíme zkoumané těleso o hmotnosti m_2 , zahřáté ve vodní lázni na teplotu t_2 . Proběhne sdílení tepla a teplota v kalorimetru se ustálí na výsledné hodnotě t . Jsou-li c_1 , c_2 měrné tepelné kapacity vody a zkoumaného tělesa, platí kalorimetrická rovnice

$$(m_1c_1 + K)(t - t_1) = m_2c_2(t_2 - t), \quad (2)$$

z níž pro hledanou měrnou tepelnou kapacitu c_2 vychází

$$c_2 = \frac{(m_1c_1 + K)(t - t_1)}{m_2(t_2 - t)}. \quad (3)$$

Tepelná izolace kalorimetru není natolik dokonalá, aby při déletrvajících měřeních nedocházelo k výměně tepla s okolím. Proto u kalorimetrických měření provádíme opravu na výměnu tepla s okolím – měření provádíme ve třech etapách (viz Dodatek 3).

Postup měření

1. Metodou tří kyvů zjistíme hmotnost m_0 prázdné a suché vnitřní nádoby kalorimetru s víkem a míchačkou. Experimentálně určíme tepelnou kapacitu K kalorimetru.

2. Do kalorimetru nalijeme destilovanou vodu a vážením metodou tří kyvů určíme jeho hmotnost m'_1 . Hmotnost vody v kalorimetru je tedy $m_1 = m'_1 - m_0$.
3. Hmotnost zkoumaného tělesa m_2 určíme rovněž metodou tří kyvů. Poté těleso zahříváme ve vodní lázni nad kahanem až na teplotu varu vody.
4. Provedeme I. etapu kalorimetrického měření. Ve složeném a uzavřeném kalorimetru je pouze voda, jejíž teplotu měříme za stálého míchání každou půlminutu a zapisujeme ji do předem připravené tabulky (Tabulka 1). První etapa končí desátým odečtením teploty.
5. Poslední teplotu I. etapy zapíšeme jako první teplotu II. etapy a do kalorimetru vložíme (co nejrychleji) zkoumané těleso.
6. Za stálého míchání pokračujeme v půlminutovém odečítání. Teplota ve II. etapě roste zprvu rychle, pak se růst zpomalí. II. etapa trvá tak dlouho, dokud teplota roste, tj. je ukončena naměřením nejvyšší teploty, která by měla být vyšší než je teplota místnosti.
7. Poslední teplotu II. etapy zapíšeme jako první teplotu III. etapy, kterou dokončíme devíti měřeními po každé následující půlminutě.
8. Do vztahu (3) dosadíme za t_1 poslední teplotu I. etapy a za t opravenou poslední teplotu II. etapy. Teplotu t_2 vroucí vodní lázně nalezneme pro změřenou hodnotu atmosférického tlaku v tabulkách. Výsledek srovnáme s tabelovanou hodnotou.

Tabulka 1: Tabulka pro zápis teplot naměřených v etapách I-III.

I. etapa		II. etapa	III. etapa	
teplota / °C	Δt / °C	teplota / °C	teplota / °C	Δt / °C
$\bar{t}_1 =$	$\overline{5\Delta_1} =$ $\overline{\Delta_1} =$	$\bar{t} =$	$\bar{t}_2 =$	$\overline{5\Delta_2} =$ $\overline{\Delta_2} =$

Chyba měření

Chybu měření vyhodnotíme jako chybu nepřímého měření. Ze vztahu (3) je zřejmé, že nepřímě měřená měrná tepelná kapacita c_2 je funkcí pěti přímo měřených veličin $c_2 = c_2(m_1, m_2, K, t_1, t)$ (c_1 a t_2 jsou tabulkové hodnoty, budeme je považovat za konstanty). Chybu měření udává vztah

$$\bar{\Delta}c_2 = \sqrt{\left(\frac{\partial c_2}{\partial m_1}\right)^2 |\bar{\Delta}m_1|^2 + \left(\frac{\partial c_2}{\partial m_2}\right)^2 |\bar{\Delta}m_2|^2 + \left(\frac{\partial c_2}{\partial K}\right)^2 |\bar{\Delta}K|^2 + \left(\frac{\partial c_2}{\partial t_1}\right)^2 |\bar{\Delta}t_1|^2 + \left(\frac{\partial c_2}{\partial t}\right)^2 |\bar{\Delta}t|^2}. \quad (4)$$

Po dosazení parciálních derivací

$$\frac{\partial c_2}{\partial m_1} = \frac{t-t_1}{m_2(t_2-t)} c_1, \quad \frac{\partial c_2}{\partial m_2} = -\frac{(m_1c_1+K)(t-t_1)}{m_2^2(t_2-t)}, \quad \frac{\partial c_2}{\partial K} = \frac{t-t_1}{m_2(t_2-t)}, \quad \frac{\partial c_2}{\partial t_1} = -\frac{m_1c_1+K}{m_2(t_2-t)},$$

$$\text{a } \frac{\partial c_2}{\partial t} = \frac{(m_1c_1+K)(t_2-t_1)}{m_2(t_2-t)^2}$$

do (3) obdržíme po vytknutí $\frac{(m_1c_1+K)(t-t_1)}{m_2(t_2-t)} = c_2$

$$\bar{\Delta}c_2 = c_2 \sqrt{\left(\frac{c_1}{m_1c_1+K} |\bar{\Delta}m_1|\right)^2 + \left(\frac{|\bar{\Delta}m_2|}{m_2}\right)^2 + \left(\frac{|\bar{\Delta}K|}{m_1c_1+K}\right)^2 + \left(\frac{|\bar{\Delta}t_1|}{t-t_1}\right)^2 + \left(\frac{t_2-t_1}{(t_2-t)(t-t_1)} |\bar{\Delta}t|\right)^2}.$$

Chyby měření teplot $\bar{\Delta}t_1$ a $\bar{\Delta}t$ určíme podle použitého teploměru (polovina nejmenšího dílku stupnice), chybu kapacity kalorimetru vypočítáme jako chybu nepřímého měření (ze vztahu pro experimentální stanovení kapacity kalorimetru). Ze zpracování výsledků měření hmotností metodou tří kyvů vypočítáme chyby $\bar{\Delta}m_0$, $\bar{\Delta}m'_1$ a $\bar{\Delta}m_2$. Hmotnost m_1 byla vypočtena jako rozdíl $m_1 = m'_1 - m_0$, její chyba $\bar{\Delta}m_1$ je proto dána výrazem

$$\bar{\Delta}m_1 = \sqrt{(\bar{\Delta}m'_1)^2 + (\bar{\Delta}m_0)^2}.$$

Doporučená literatura

SKLENÁK, L. *Základní praktikum z fyziky I*. 1. vyd. Ostrava: PdF v Ostravě, 1988. 5.2.1 Měření měrného tepla pevných látek, s. 86-87.

BROŽ, J. A KOL. *Základy fyzikálních měření I*. 2. vyd. Praha: SPN, 1983. 3.2.1 Měrná tepelná kapacita látek pevných a kapalných, s. 204-212.

MÁDR, V., KNEJZLÍK, J., KOPEČNÝ, J. *Fyzikální měření*. Praha: SNTL, 1991. 4.4 Měrná tepelná kapacita, s. 152-155.

Úkol č. 2: Změřte měrnou tepelnou kapacitu oleje.

Pomůcky

Elektrický kalorimetr s míchačkou, laboratorní váhy, sada závaží, ricinový olej, reostat, zdroj stejnosměrného napětí (12 V), vodiče, měřicí přístroj DU 10 (2 ks), teploměr s rozsahem 0 – 50 °C, stopky.

Teorie

Měření měrného tepla kapalin provedeme v elektrickém kalorimetru. Do kapaliny v kalorimetru je ponořeno topné těleso, kterým po dobu τ prochází stejnosměrný elektrický proud I při napětí U . Spotřebovaná elektrická energie se uvnitř kalorimetru beze zbytku přemění na Joulovo teplo

$$Q_J = UI\tau. \quad (5)$$

Tímto teplem se zahřeje kapalina v kalorimetru, jeho vnitřní nádoba a příslušenství. Je-li K tepelná kapacita kalorimetru (určíme ji experimentálně, viz Dodatek3), m hmotnost kapaliny v kalorimetru, c její měrná tepelná kapacita, t_1 počáteční a t_2 výsledná teplota, platí pro sdílení tepla

$$Q_J = (mc + K)(t_2 - t_1) \quad (6)$$

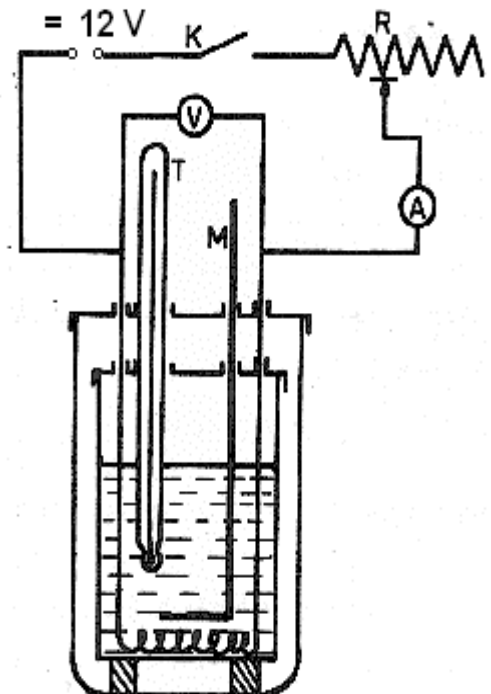
a odtud po dosazení za Q_J ze vztahu (4)

$$c = \frac{1}{m} \left(\frac{UI\tau}{t_2 - t_1} - K \right). \quad (7)$$

Vzhledem k nedokonalosti tepelné izolace kalorimetru provádíme měření opět ve třech etapách.

Postup měření

1. Prázdný elektrický kalorimetr zvážíme metodou tří kyvů (m_0). Experimentálně určíme jeho tepelnou kapacitu K .
2. Do kalorimetru nalijeme zkoumanou kapalinu (topné těleso musí být ponořeno) a vážením metodou tří kyvů určíme jeho hmotnost m_1 . Hmotnost kapaliny v kalorimetru je tedy $m = m_1 - m_0$.
3. Sestavíme obvod podle obrázku (Obrázek 1), který po kontrole vedoucím praktika zapojíme a posunem



jezdce reostatu nastavíme takový odpor, aby $U \approx 8 \text{ V}$ a $I \approx 4 \text{ A}$.

4. Obvod znovu odpojíme od zdroje napětí a začneme I. etapu měření teploty v kalorimetru.
5. Po posledním odečtení první etapy zapojíme obvod (spustíme stopky pro měření doby průchodu proudu τ) a za stálého míchání pokračujeme v půlminutových intervalech měření teploty. Poznamenané si hodnoty napětí U a proudu I , které nelze v průběhu II. etapy měnit.
6. Jakmile teplota vzroste asi o 10°C , obvod rozpojíme (poznáme si celkovou dobu průchodu proudu τ), II. etapa měření však stále pokračuje, neboť zahřáté topné těleso i nadále předává teplo kapalině. Poslední teplotou II. etapy je nejvyšší naměřená teplota.
7. Předepsaným způsobem kalorimetrické měření dokončíme (III. etapa).
8. Do vztahu (6) dosadíme za t_1 poslední teplotu I. etapy a za t_2 opravenou poslední teplotu II. etapy. Výsledek srovnáme s tabelovanou hodnotou.

Obrázek 1: Schéma zapojení elektrického kalorimetru

Chyba měření

Chybu měření vyhodnotíme jako chybu nepřímého měření. Ze vztahu (6) vyplývá, že nepřímě měřená měrná tepelná kapacita je funkcí sedmi přímo měřených veličin $c = c(m, U, I, \tau, K, t_1, t_2)$. Chybu měření udává vztah

$$\bar{\Delta}c = \sqrt{\left(\frac{\partial c}{\partial m}\right)^2 |\bar{\Delta}m_1|^2 + \left(\frac{\partial c}{\partial U}\right)^2 |\bar{\Delta}U|^2 + \left(\frac{\partial c}{\partial I}\right)^2 |\bar{\Delta}I|^2 + \left(\frac{\partial c}{\partial \tau}\right)^2 |\bar{\Delta}\tau|^2 + \left(\frac{\partial c}{\partial K}\right)^2 |\bar{\Delta}K|^2 + \left(\frac{\partial c}{\partial t_1}\right)^2 |\bar{\Delta}t_1|^2 + \left(\frac{\partial c}{\partial t_2}\right)^2 |\bar{\Delta}t_2|^2} \quad (8)$$

Po dosazení parciálních derivací

$$\frac{\partial c}{\partial m} = -\frac{1}{m^2} \left(\frac{UI\tau}{t_2 - t_1} - K \right), \quad \frac{\partial c}{\partial U} = \frac{I\tau}{m(t_2 - t_1)}, \quad \frac{\partial c}{\partial I} = \frac{U\tau}{m(t_2 - t_1)}, \quad \frac{\partial c}{\partial \tau} = \frac{UI}{m(t_2 - t_1)}, \quad \frac{\partial c}{\partial K} = -\frac{1}{m},$$

$$\frac{\partial c}{\partial t_1} = \frac{UI\tau}{m(t_2 - t_1)^2} \quad \text{a} \quad \frac{\partial c}{\partial t_2} = -\frac{UI\tau}{m(t_2 - t_1)^2}$$

do (7), obdržíme po vytknutí $\frac{UI\tau}{m(t_2 - t_1)}$

$$\bar{\Delta}c = \frac{UI\tau}{m(t_2 - t_1)} \sqrt{\left(\left(1 - \frac{K(t_2 - t_1)}{UI\tau} \right) \frac{|\bar{\Delta}m_1|}{m} \right)^2 + \left(\frac{|\bar{\Delta}U|}{U} \right)^2 + \left(\frac{|\bar{\Delta}I|}{I} \right)^2 + \left(\frac{|\bar{\Delta}\tau|}{\tau} \right)^2 + \left(\frac{t_2 - t_1}{UI\tau} |\bar{\Delta}K| \right)^2 + \left(\frac{|\bar{\Delta}t_1|}{t_2 - t_1} \right)^2 + \left(\frac{|\bar{\Delta}t_2|}{t_2 - t_1} \right)^2}.$$

Chyby měření teplot $\bar{\Delta}t_1$ a $\bar{\Delta}t_2$ určíme podle použitého teploměru (polovina nejmenšího dílku stupnice), stejně postupujte i u odhadu chyb $\bar{\Delta}U$, $\bar{\Delta}I$ a $\bar{\Delta}\tau$. Chybu kapacity kalorimetru vypočítáme jako chybu nepřímého měření (ze vztahu pro experimentální

stanovení kapacity kalorimetru). Ze zpracování výsledků měření hmotností metodou tří kyvů vypočítáme chyby $\overline{\Delta m_0}$ a $\overline{\Delta m_1}$. Hmotnost m byla vypočtena jako rozdíl $m = m_1 - m_0$, chyba $\overline{\Delta m}$ je proto dána výrazem

$$\overline{\Delta m} = \sqrt{(\overline{\Delta m_1})^2 + (\overline{\Delta m_0})^2} .$$

Doporučená literatura

SKLENÁK, L. *Základní praktikum z fyziky I*. 1. vyd. Ostrava: PdF v Ostravě, 1988. 5.2.2 Měření měrného tepla kapalin elektrickým kalorimetrem, s. 87-89.

BROŽ, J. A KOL. *Základy fyzikálních měření I*. 2. vyd. Praha: SPN, 1983. 3.2.1 Měrná tepelná kapacita látek pevných a kapalných, s. 204-212.

MÁDR, V., KNEJZLÍK, J., KOPEČNÝ, J. *Fyzikální měření*. Praha: SNTL, 1991. 4.4 Měrná tepelná kapacita, s. 152-155.