

Měření měrného skupenského tepla tání ledu a varu vody

Úkol č. 1: Změřte měrné skupenské teplo tání ledu.

Pomůcky

Směšovací kalorimetr s míchačkou, laboratorní váhy, sada závaží, destilovaná voda, teploměr s rozsahem $-10^{\circ} - 50^{\circ} \text{C}$, stopky, termoska s ledem, kladívko, lžička, filtrační papír.

Teorie

Měrné skupenské teplo tání l_t je číselně rovno množství tepla, které je nutno dodat pevné látce o hmotnosti 1 kg, zahřáté na teplotu tání, aby se přeměnila v 1 kg kapaliny téže teploty. Udáváme ho v jednotkách $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$. Měrné skupenské teplo tání závisí na teplotě a tlaku. Za normálních podmínek (0°C , $101\,325 \text{ Pa}$) je měrné skupenské teplo tání ledu $l_t = 3,337 \cdot 10^5 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Měrné skupenské teplo tání měříme pomocí kalorimetru. Jeho tepelnou kapacitu K určíme experimentálně (viz Dodatek 3). Do kalorimetru obsahujícího vodu o hmotnosti m_1 , teplotě t_1 a měrné tepelné kapacitě c vložíme led o hmotnosti m_2 a teplotě $t_2 = 0^{\circ} \text{C}$. Led nejdříve roztaje při spotřebě skupenského tepla $L_t = m_2 l_t$ a vzniklá voda se ohřeje na výslednou teplotu t v kalorimetru. Pro výměnu tepla platí kalorimetrická rovnice

$$m_2 l_t + m_2 c t = (m_1 c + K)(t_1 - t), \quad (1)$$

z níž pro hledané měrné skupenské teplo l_t vychází

$$l_t = \frac{1}{m_2} (m_1 c + K)(t_1 - t) - c t. \quad (2)$$

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. Prázdný směšovací kalorimetr zvážíme metodou tří kyvů (m_0). Experimentálně určíme jeho tepelnou kapacitu K .
2. Kalorimetr naplníme asi ze dvou třetin destilovanou vodou o teplotě t_1 ($30^{\circ} - 40^{\circ} \text{C}$). Hmotnost m'_1 kalorimetru s vodou určíme metodou tří kyvů. Hmotnost vody v kalorimetru je tedy $m_1 = m'_1 - m_0$.

3. 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). Celkem změříme teplotu vody desetkrát.
4. Poslední odečtenou teplotu I. etapy zapíšeme jako první teplotu II. etapy a do kalorimetru vložíme led roztlučený na menší kousky a osušený filtračním papírem.
5. Za stálého míchání pokračujeme v půlminutovém odečítání. Teplota ve II. etapě klesá zprvu rychle, pak se pokles zpomalí. II. etapa trvá tak dlouho, dokud teplota klesá, tj. je ukončena naměřením nejnižší teploty, která by měla být nižší než je teplota místnosti.
6. Poslední teplotu II. etapy zapíšeme jako první teplotu III. etapy, kterou dokončíme devíti měřeními po každé následující půlminutě.
7. Po ukončení III. etapy kalorimetr znovu zvážíme metodou tří kyvů (m'_2), abychom určili hmotnost ledu $m_2 = m'_2 - m'_1$.
8. Do vztahu (2) dosadíme za t_1 poslední teplotu I. etapy a za t opravenou poslední teplotu II. etapy. 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
$\bar{t}_1 =$	$\frac{5\Delta_1}{\Delta_1} =$	$\bar{t} =$	$\bar{t}_2 =$	$\frac{5\Delta_2}{\Delta_2} =$

Chyba měření

Chybu měření vyhodnotíme jako chybu nepřímého měření. Ze vztahu (2) je zřejmé, že nepřímo měřené měrné skupenské teplo tání je funkcí pěti přímo měřených veličin $l_t = l_t(m_1, m_2, K, t_1, t)$ (c je tabulková hodnota, budeme ji považovat za konstantu). Chybu měření udává vztah

$$\bar{\Delta}l_t = \sqrt{\left(\frac{\partial l_t}{\partial m_1}\right)^2 |\bar{\Delta}m_1|^2 + \left(\frac{\partial l_t}{\partial m_2}\right)^2 |\bar{\Delta}m_2|^2 + \left(\frac{\partial l_t}{\partial K}\right)^2 |\bar{\Delta}K|^2 + \left(\frac{\partial l_t}{\partial t_1}\right)^2 |\bar{\Delta}t_1|^2 + \left(\frac{\partial l_t}{\partial t}\right)^2 |\bar{\Delta}t|^2}. \quad (3)$$

Po dosazení parciálních derivací

$$\frac{\partial l_t}{\partial m_1} = \frac{t_1 - t}{m_2} c, \quad \frac{\partial l_t}{\partial m_2} = -\frac{1}{m_2^2} (m_1 c + K)(t_1 - t), \quad \frac{\partial l_t}{\partial K} = \frac{1}{m_2} (t_1 - t), \quad \frac{\partial l_t}{\partial t_1} = \frac{1}{m_2} (m_1 c + K)$$

$$\text{a } \frac{\partial l_t}{\partial t} = -\frac{1}{m_2} (m_1 c + K) - c$$

do (3) obdržíme po vytknutí $\frac{t_1 - t}{m_2}$

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

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 $\bar{\Delta} m'_2$. Hmotnosti m_1 a m_2 byly vypočteny jako rozdíly $m_1 = m'_1 - m_0$ a $m_2 = m'_2 - m'_1$, jejich chyby $\bar{\Delta} m_1$ a $\bar{\Delta} m_2$ jsou proto dány výrazy

$$\bar{\Delta} m_1 = \sqrt{(\bar{\Delta} m'_1)^2 + (\bar{\Delta} m_0)^2} \quad \text{a} \quad \bar{\Delta} m_2 = \sqrt{(\bar{\Delta} m'_2)^2 + (\bar{\Delta} m'_1)^2}.$$

Doporučená literatura

SKLENÁK, L. *Základní praktikum z fyziky I*. 1. vyd. Ostrava: PdF v Ostravě, 1988. 5.2.3 Měření měrného skupenského tepla tání ledu, s. 89-91.

BROŽ, J. A KOL. *Základy fyzikálních měření I*. 2. vyd. Praha: SPN, 1983. 3.3.2.1 Skupenské teplo tání (tuhnutí), s. 230-231.

Úkol č. 2: Změřte měrné skupenské teplo varu vody.

Pomůcky

Směšovací kalorimetr s míchačkou, laboratorní váhy, sada závaží, destilovaná voda, teploměr s rozsahem 0 – 100 °C, stopky, varná baňka 200 ml – 2 ks, stojan – 2 ks, držáky, plynový kahan, třínožka, azbestová podložka, azbestová síťka.

Teorie

Měrné skupenské teplo varu l_v je číselně rovno množství tepla, které je nutno dodat kapalině o hmotnosti 1 kg, zahřáté na teplotu varu, aby se přeměnila v 1 kg páry téže teploty. Udáváme ho v jednotkách $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$. Měrné skupenské teplo varu závisí výrazně na teplotě a tlaku, s rostoucí teplotou klesá. Při teplotě 100°C a tlaku 101 325 Pa je měrné skupenské teplo varu vody $l_v = 2,257 \cdot 10^6 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$. Při měření měrného skupenského tepla varu využíváme skutečnosti, že toto teplo je rovno měrnému skupenskému teplu kondenzačnímu při téže teplotě.

Měrné skupenské teplo varu měříme pomocí kalorimetru. Jeho tepelnou kapacitu K určíme experimentálně (viz Dodatek 3). Do kalorimetru obsahujícího vodu o hmotnosti m_1 , teplotě t_1 a měrné tepelné kapacitě c přivedeme vodní páru o hmotnosti m_2 a teplotě t_2 . Pára spotřebuje při kondenzaci skupenské teplo $L_v = m_2 l_v$ a vzniklá voda se pak ochladí na výslednou teplotu t v kalorimetru. Pro výměnu tepla platí kalorimetrická rovnice

$$(m_1 c + K)(t - t_1) = m_2 l_v + m_2 c(t_2 - t), \quad (4)$$

z níž pro hledané měrné skupenské teplo l_v vychází

$$l_v = \frac{1}{m_2} (m_1 c + K)(t - t_1) - c(t_2 - t). \quad (5)$$

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

Postup měření

1. Prázdný směšovací kalorimetr zvážíme metodou tří kyvů (m_0). Experimentálně určíme jeho tepelnou kapacitu K .
2. Kalorimetr naplníme asi do poloviny destilovanou vodou. Hmotnost m'_1 kalorimetru s vodou určíme opět metodou tří kyvů. Hmotnost vody v kalorimetru je tedy $m_1 = m'_1 - m_0$.
3. Sestavíme aparaturu pro přípravu vodní páry. Destilovanou vodu v baňce uvedeme do varu nad plynovým kahanem a vzniklou páru vedeme do kondenzátoru a odtud do kalorimetru. Páru do kalorimetru začneme jímat po ukončení I. etapy měření teploty v kalorimetru.

4. Jakmile se teplota v kalorimetru zvýší asi o 10° C, jímání páry ukončíme. II. etapa měření však za stálého míchání pokračuje dále až do registrace nejvyšší teploty.
5. Předepsaným způsobem dokončíme kalorimetrické měření (III. etapa).
6. Po ukončení III. etapy kalorimetr znovu zvážíme metodou tří kyvů (m'_2), abychom určili hmotnost zkondenzované vodní páry $m_2 = m'_2 - m'_1$.
7. Do vztahu (5) dosadíme za t_1 poslední teplotu I. etapy, za teplotu t_2 tabelovanou hodnotu teploty varu vody pro změřený atmosférický tlak a za t opravenou poslední teplotu II. etapy. Výsledek srovnáme s tabelovanou hodnotou.

Chyba měření

Chybu měření vyhodnotíme jako chybu nepřímého měření. Ze vztahu (5) je zřejmé, že nepřímě měřené měrné skupenské teplo varu je funkcí pěti přímo měřených veličin $l_v = l_v(m_1, m_2, K, t_1, t)$ (c a t_2 jsou hodnoty z tabulek, budeme je považovat za konstanty).

Chybu měření udává vztah

$$\bar{\Delta}l_v = \sqrt{\left(\frac{\partial l_v}{\partial m_1}\right)^2 |\bar{\Delta}m_1|^2 + \left(\frac{\partial l_v}{\partial m_2}\right)^2 |\bar{\Delta}m_2|^2 + \left(\frac{\partial l_v}{\partial K}\right)^2 |\bar{\Delta}K|^2 + \left(\frac{\partial l_v}{\partial t_1}\right)^2 |\bar{\Delta}t_1|^2 + \left(\frac{\partial l_v}{\partial t}\right)^2 |\bar{\Delta}t|^2}. \quad (6)$$

Po dosazení parciálních derivací

$$\frac{\partial l_v}{\partial m_1} = \frac{1}{m_2}(t-t_1)c, \quad \frac{\partial l_v}{\partial m_2} = -\frac{1}{m_2}(m_1c + K)(t-t_1), \quad \frac{\partial l_v}{\partial K} = \frac{1}{m_2}(t-t_1), \quad \frac{\partial l_v}{\partial t_1} = -\frac{1}{m_2}(m_1c + K)$$

$$\text{a } \frac{\partial l_v}{\partial t} = \frac{1}{m_2}(m_1c + K) + c$$

do (6), obdržíme po vytknutí $\frac{t-t_1}{m_2}$

$$\bar{\Delta}l_v = \frac{t-t_1}{m_2} \sqrt{\left(c|\bar{\Delta}m_1|\right)^2 + (m_1c + K)^2 \left(\frac{|\bar{\Delta}m_2|}{m_2}\right)^2 + |\bar{\Delta}K|^2 + (m_1c + K)^2 \left(\frac{|\bar{\Delta}t_1|}{t-t_1}\right)^2 + (c(m_1 + m_2) + K)^2 \left(\frac{|\bar{\Delta}t|}{t-t_1}\right)^2}.$$

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 $\bar{\Delta}m'_2$. Hmotnosti m_1 a m_2 byly vypočteny jako rozdíly $m_1 = m'_1 - m_0$ a $m_2 = m'_2 - m'_1$, jejich chyby $\bar{\Delta}m_1$ a $\bar{\Delta}m_2$ jsou proto dány výrazy

$$\bar{\Delta}m_1 = \sqrt{(\bar{\Delta}m'_1)^2 + (\bar{\Delta}m_0)^2} \quad \text{a} \quad \bar{\Delta}m_2 = \sqrt{(\bar{\Delta}m'_2)^2 + (\bar{\Delta}m'_1)^2} .$$

Doporučená literatura

SKLENÁK, L. *Základní praktikum z fyziky I*. 1. vyd. Ostrava: PdF v Ostravě, 1988. 5.2.4 Měření měrného skupenského tepla varu vody, s. 91-93.

BROŽ, J. A KOL. *Základy fyzikálních měření I*. 2. vyd. Praha: SPN, 1983. 3.3.2.2 Skupenské teplo výparné, s. 231-235.