Martin Beránek, 1.F, X–11

VIII. Kalibrace odporového teploměru a termočlánku

PRACOVNÍ ÚKOL:

1. Okalibrujte pomocí bodu tání ledu, bodu varu vody a bodu tuhnutí cínu:
   (a) platinový odporový teploměr
   (b) termočlánek měď–konstantan.
2. Registrujte zapisovačem teplotní průběh termoelektrického napětí ε při ohřevu a varu vody a při tuhnutí cínu. Naměřené křivky s úplnými údaji o experimentu přiložte k referátu.
3. Nakreslete graf teplotní závislosti odporu R (kalibrační křivka odporového teploměru) a graf teplotní závislosti termoelektrického napětí ε (kalibrační křivka termočlánku).

TEORIE: Jako referenční teplotní body používám dva definiční body IPTS-68 a jeden druhotný referenční bod této stupnice. Je to bod varu vody, bod tuhnutí cínu a bod tání ledu. V ideálním případě bude zahřívaná (resp. ochlazovaná) látka stále měnit svojí tepotu až do té doby, kdy se dostane k teplotě, při které mění skupenství. Pak se veškeré dodávané teplo spotřebuje na fázovou přeměnu (resp. teplo vyprodukované fázovou přeměnou brání dalšímu ochlazování) a teprve poté se zase začne měnit teplota obecně jinou rychlostí, protože měrná tepelná kapacita je různá pro různá skupenství látek. Takže pomocí této skutečnosti je možné jednoduše zjistit potřebné teplotní body. V reálném případě sice popsaný děj neprobíhá v celém objemu látky současně, protože není dokonale tepelně vodivá, ale zastavení růstu (klesání) teploty je stále dobře registrovatelné. Teplotu odpovídající tání ledu lze velmi dobře udržet ve směsi ledu a vody. Teplo, které přichází z okolí se spotřebuje na roztátí části ledu a teplota směsi zůstává konstantní.

Hodnoty teplot podle IPTS-68 jsou:		
	Normální bod varu vody	100°C
	Bod tuhnutí cínu	231,968 °C
	Bod tání ledu	0°C

Bod varu vody je vztažen k normálnímu tlaku $p_0 = 101{,}325\,\mathrm{kPa}$. Skutečnou hodnotu lze získat podle následujícího vztahu ([1], str. 54)

$$t = \left[100 + 28{,}0216\left(\frac{p}{p_0} - 1\right) - 11{,}642\left(\frac{p}{p_0} - 1\right)^2 + 7{,}1\left(\frac{p}{p_0} - 1\right)^3\right]\,^\circ\mathrm{C}\,. \tag{1}$$

Přesná hodnota všech teplotních bodů závisí také na čistotě použitých látek.

Závislost odporu teploměru na teplotě se dá aproximovat polynomem. Budu používat aproximaci polynomem druhého stupně (viz [2], str. 57)

$$R = R_0(1 + At + Bt^2)\,. \tag{2}$$

Hodnoty odporu v jednotlivých referenčních bodech označím R_1, R_2 a R_3. Odpor R_1 měl teploměr při teplotě 0 °C, takže pro zjednodušení úprav mohu přímo napsat

$$R_0 = R_1\,. \tag{3}$$

Zbylé dvě konstanty vyjádřím jako

$$A = \frac{(R_1 - R_2)t_3^2 + (R_3 - R_1)t_2^2}{R_1 t_2 t_3 (t_2 - t_3)}\,, \tag{4}$$

$$B = \frac{(R_2 - R_1)t_3 + (R_1 - R_3)t_2}{R_1 t_2 t_3 (t_2 - t_3)}\,, \tag{5}$$

Kde odpor při teplotě t_2 je R_2 a při teplotě t_3 je R_3.

Závislost termoelektrického napětí termočlánku jde také aproximovat polynomem druhého stupně. Jeden spoj nechám ponořený ve směsi ledu a vody o teplotě 0 °C, takže rozdíl teplot odpovídá teplotě druhého spoje ve stupních Celsia. Předpokládám, že pokud budou mít oba spoje stejnou teplotu, bude

napětí nulové (pokud jsou oba spoje stejné, tak by tomu tak mělo být – tento předpoklad dále jen ověřím), takže mi k určení kvadratické závislosti chybí ještě dvě konstanty. Vztah pro napětí je

$$\varepsilon = a\Delta t + b(\Delta t)^2 \,. \tag{6}$$

Změřím napětí ε_1 a ε_2 při teplotě jednoho spoje 0 °C a druhého t_1 a t_2. Pro teploty ve stupních Celsia pak platí

$$a = \frac{\varepsilon_2 t_1^2 - \varepsilon_1 t_2^2}{t_1 t_2 (t_1 - t_2)} \,, \tag{7}$$

$$b = \frac{\varepsilon_1 t_2 - \varepsilon_2 t_1}{t_1 t_2 (t_1 - t_2)} \,. \tag{8}$$

MĚŘENÍ: Okolní tlak v době měření byl 98,07 kPa, takže podle vztahu (1) vychází teplota bodu varu vody $t_\mathrm{v} = (99{,}09 \pm 0{,}09)$ °C. Počítám pouze chybu způsobenou nepřesným určením tlaku. Chyba určení normálního tlaku a chyba vztahu (1) je mnohem menší.

Odpor platinového teploměru jsem měřil digitálním ohmmetrem, který má pro mnou použitý rozsah udanou přesnost 0,5%. Pro teploměr ponořený ve směsi vody a ledu jsem získal hodnotu

$$R_1 = R_0 = (100{,}2 \pm 0{,}5)\,\Omega \,.$$

Když byl teploměr v parách vroucí vody o teplotě $t_2 = t_\mathrm{v}$, jeho odpor činil

$$R_2 = (138{,}4 \pm 0{,}7)\,\Omega \,.$$

Odpor teploměru při ponoření do tuhnoucího cínu je zaznamenán na pravé straně grafu 1 (příloha). Odpor ve chvíli, kdy se zastavil pokles teploty (a tedy ve chvíli, kdy došlo k požadované fázové přeměně) je

$$R_3 = (187{,}1 \pm 0{,}9)\,\Omega \,.$$

a tomu odpovídající teplota $t_3 = 231{,}968$ °C.

Podle vztahů (4) a (5) určím konstanty A a B (počítám pouze chyby určení odporu, protože teploty buďto znám dostatečně přesně, nebo pokud jsou tam nepřesnosti způsobené nečistotami ve vzorcích, tak je stejně nedokážu odhadnout)

$$A = (3{,}39 \pm 0{,}16) \cdot 10^{-3}\,\mathrm{K}^{-1} \,,$$

$$B = (0{,}8 \pm 0{,}7) \cdot 10^{-6}\,\mathrm{K}^{-2} \,.$$

Velká chyba konstanty B je dána hlavně malou hodnotou součtu v čitateli zlomku (5), resp. jeden ze sčítanců je záporný, takže jde o rozdíl dvou blízkých hodnot zatížených určitou chybou. Výsledný vzorec pro odpor teploměru v závislosti na teplotě je pak

$$\underline{\underline{R(t) = \left[100{,}2 \cdot (1 + 3{,}39 \cdot 10^{-3} \cdot t + 0{,}8 \cdot 10^{-6} \cdot t^2)\right]\ \Omega \,.}}$$

Nepřesnost tohoto vztahu závisí na teplotě. Pro teploty blízké 0 °C je chyba dána pouze nepřesností R_1, tedy asi 0,5%, ale s rostoucí teplotou roste a při teplotě 232 °C činí asi 5%.

Termoelektrické napětí jsem měřil pomocí zapisovače TZ 4200. Podle [2] je jeho chyba ±0,025 mV pro rozsah 5 mV a ±0,1 mV pro rozsah 20 mV.

Podle grafu 3 (příloha) je vidět, že napětí v případě, kdy mají oba spoje stejnou tepotu je skutečně rovno nule v mezích přesnosti zapisovače a mohu použít vztah (6). Záznam průběhu napětí při chladnutí roztaveného cínu je na grafu 1. V čase přibližně 1500 s bylo napětí konstantní a jeho hodnota je $\varepsilon_1 = (10{,}9 \pm 0{,}1)$ mV při teplotě $t_1 = 231{,}968$ °C. Záznam průběhu napětí při zahřívání vody a jejím varu pro jeden spoj termočlánku umístěný ve vodních parách je na grafu 2 (příloha). V okamžiku, kdy se růst napětí zastavil (a kdy tedy došlo k varu) byla hodnota $\varepsilon_2 = (4{,}28 \pm 0{,}03)$ mV pro teplotu $t_2 = (99{,}09 \pm 0{,}09)$ °C.

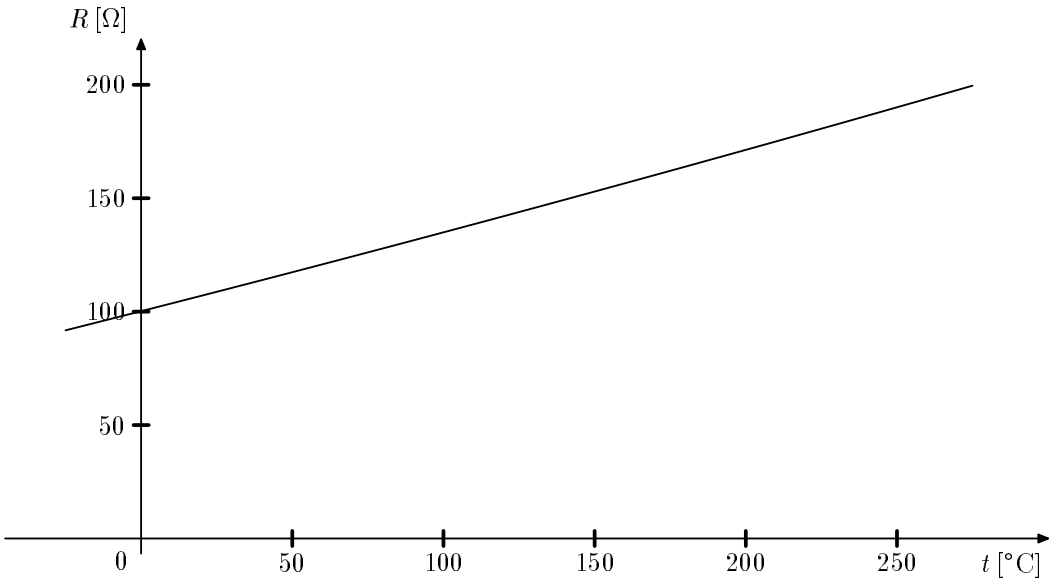
Podle vztahů (7) a (8) vyjádřím konstanty ze vzorce (6)

$$a = (0{,}0404 \pm 0{,}0006)\,\mathrm{mV\,K^{-1}}\,,$$
$$b = (0{,}029 \pm 0{,}004) \cdot 10^{-3}\,\mathrm{mV\,K^{-2}}\,.$$

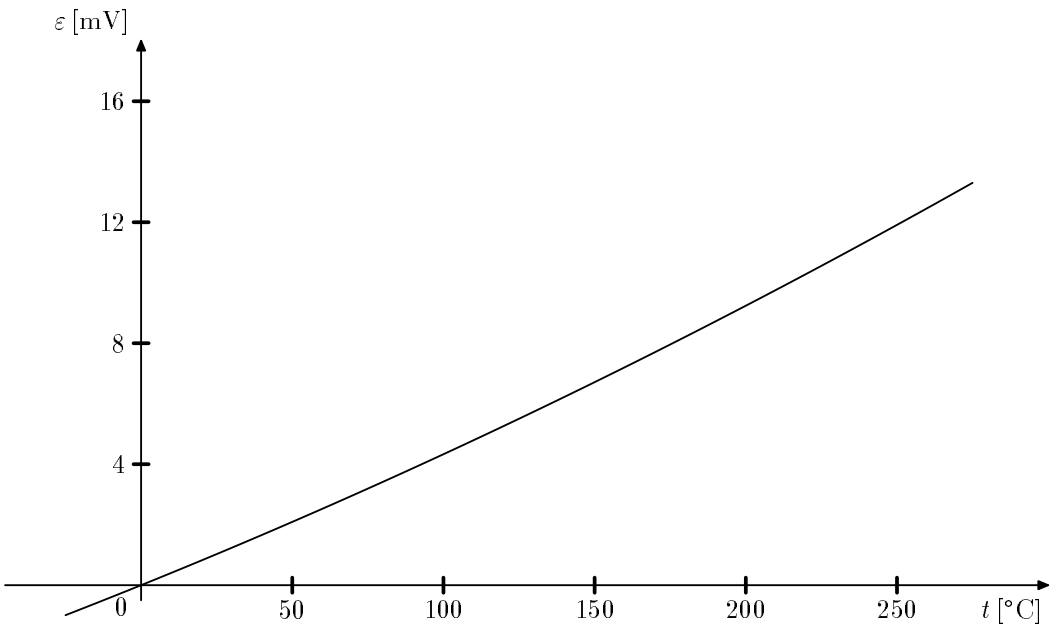
a mohu tedy psát vztah pro termoelektrické napětí termočlánku

$$\underline{\underline{\varepsilon(\Delta t) = \left[0{,}0404\Delta t + 0{,}000029(\Delta t)^2\right]\ \mathrm{mV}}}\,.$$

Dále uvádím grafy závislosti odporu teploměru na teplotě (graf 4) a termoelektrického napětí na teplotě (graf 5).



Graf 4



Graf 5

ZÁVĚR: Zjistil jsem kalibrační křivky odporového teploměru a termočlánku měď–konstantan tak, jak jsou zobrazeny na grafech 4 a 5.

Časový záznam chladnutí roztaveného cínu odpovídá teorii. Je vidět, že měrná tepelná kapacita cínu v pevném stavu je větší než v kapalném.

Chyby u jednotlivých konstant ve vztazích (2) a (6) jsem určil pouze z odchylky měřících přístrojů. Je možné, že jsem nezapočítal další chyby, způsobené tím, že nešlo o zcela čisté látky a teploty fázových přeměn tedy neodpovídaly zcela podmínkám IPTS-68. Tuto chybu ale nejsem schopný ani nijak odhadnout a jediná kompenzace je použít co možná nejčistší látky.

LITERATURA:

[1] J. Brož, V. Roskovec, M. Valouch: Fyzikální a matematické tabulky SNTL, Praha 1980
[2] D. Slavínská, I. Stulíková, P. Vostrý: Fyzikální praktikum I. SPN, Praha 1989