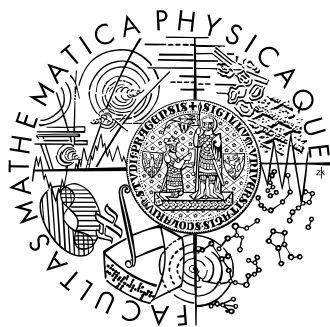


Univerzita Karlova v Praze
Matematicko-fyzikální fakulta

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



Pavλίna Böhmová

Termodynamika pevných bodů Mezinárodní teplotní stupnice ITS-90

Katedra fyziky nízkých teplot

Vedoucí bakalářské práce: Doc. RNDr. Miloš Rotter, CSc.

Studijní program: Fyzika, Obecná fyzika

2008

Děkuji Doc. RNDr. Miloši Rotterovi, CSc., vedoucímu bakalářské práce, za jeho cenné rady a trpělivost při zpracování bakalářské práce.

Děk patří také RNDr. Michaele Králové - Blažkové, Ph.D. za pomoc při ověřování trojného bodu vody a v neposlední řadě RNDr. Jiřímu Matasovi, CSc. za vstřícnost při měření v prostorách Praktika II.

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci napsala samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů. Souhlasím se zapůjčováním práce.

V Praze dne 26.5.2008

Pavλίna Böhmová

OBSAH

Úvod	5
I. TEORETICKÁ ČÁST	
1. Teplota	6
1.1 Empirická teplota.....	6
1.2 Absolutní termodynamická teplota.....	7
2. Měření teploty	9
2.1 Pevné body.....	9
2.2 Fázový diagram.....	9
2.3 Fázové přechody.....	10
2.4 Mezinárodní teplotní stupnice ITS-90.....	11
3. Praktická termometrie	15
3.1 Realizace pevných bodů.....	15
3.2 Obecné termometrické požadavky.....	18
II. PRAKTICKÁ ČÁST	
1. Platinový odporový teploměr Tinsley 5187L	20
2. Trojný bod vody	21
2.1 Realizace trojného bodu vody.....	21
2.2 Výsledky měření trojného bodu vody.....	22
2.3 Závěry měření trojného bodu vody.....	27
3. Bod tání gallia	29
3.1 Realizace bodu tání gallia.....	29
3.2 Výsledky měření bodu tání gallia.....	30
3.3 Závěry měření bodu tání gallia.....	32
4. Trojný bod rtuti	34
4.1 Realizace trojného bodu rtuti.....	34
4.2 Výsledky měření trojného bodu rtuti.....	34
4.3 Závěry měření trojného bodu rtuti.....	36
5. Závěr	37
Literatura	38

Název práce: Termodynamika pevných bodů Mezinárodní teplotní stupnice ITS-90
Autor: Pavlína Böhmová
Katedra: Katedra fyziky nízkých teplot
Vedoucí bakalářské práce: Doc. RNDr. Miloš Rotter, CSc.
e-mail vedoucího: rotter@mbox.troja.mff.cuni.cz

Abstrakt: Tato bakalářská práce vznikla jako příprava k vytvoření nové úlohy fyzikálního praktika na MFF UK, zabývající se termometrií a zásadami pro vysoce přesná teplotní měření.

Ambicí teoretické části práce je položení fyzikálních základů termometrie, spočívajících v objasnění definice teploty, zdůvodnění potřeby vytvářet teplotní stupnice a zavedení zásad pro její precizní určování.

Pro účely připravované úlohy fyzikálního praktika byly vytvořeny tři buňky pro realizaci pevných bodů. Praktická část práce se zabývá zkoumáním vlastností buněk pro realizaci trojného bodu vody, bodu tání gallia a trojného bodu rtuti ve snaze nalézt optimální experimentální uspořádání. Výsledkem práce je diskuse faktorů ovlivňujících přesnost měření a návrhy na zlepšení.

Klíčová slova: Teplota, Termometrie, Teplotní stupnice, Pevné body

Title: Thermodynamics of fixed points of the International Temperature Scale ITS-90

Autor: Pavlína Böhmová
Department: Department of Low Temperature Physics
Supervisor: Doc. RNDr. Miloš Rotter, CSc.
Supervisor's email address: rotter@mbox.troja.mff.cuni.cz

Abstrakt: This bachelor thesis originated from an idea of creating a new task for using in basic physics laboratory training at MFF UK. This task will deal with thermometry and basic principles of high accuracy temperature measurements.

Thermometry indeed is an ordinary part of an everyday life. The ambition of the theoretical part of this work is to provide a basic scientific background to this word by explaining the definition of temperature, giving reasons for a need of creating temperature scales and setting principles of precious temperature measurements.

For the purpose of the new laboratory task, three fixed points cells have been made. The practical part of this thesis deals with properties examinations of the triple point of water cell, the melting point of gallium cell and the triple point of mercury cell to develop the optimal experiment settings for high accuracy measurements. As a result, the influence of many factors is discussed and some improvements are suggested.

Keywords: Temperature, Thermometry, Temperature Scale, Fixed Points

Úvod

Tato bakalářská práce si klade za cíl rozvoj přípravy nové úlohy fyzikálního praktika, která by studentům zprostředkovala bližší seznámení s termometrií jakožto vědním oborem a jejími praktickými zásadami, nutnými pro realizaci měření s nejvyšší možnou přesností (danou experimentálním vybavením). Navazuje tak na diplomovou práci Ladislava Holejšovského z roku 2006 a na měření, která v témže roce prováděl Julien Paris během své letní stáže Erasmus. Na náklady vedení této připravované úlohy fyzikálního praktika bylo přispěno i z grantu RVŠ.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 Teplota

Je přirozeností lidstva (a především fyziků) poznávat a popisovat okolní svět. Vlastnosti přírody jsou zaznamenávány, klasifikovány a měřeny. Jednou z těchto vlastností je teplota.

Jak uvádí Obdržálek, Vaněk [3], příjemným atributem teploty je její jednorozměrnost, tedy to, že danému tělesu je možno přiřadit právě jednu číselnou hodnotu, což umožňuje její přímé porovnávání v relacích „větší – menší“ a tím i zavedení stupnice. Toto není samozřejmým rysem přírody, např. barva je veličinou vícerozměrnou, k jejímuž přesnému určení je zapotřebí udat odstín, sytost a jas, jak dodává Obdržálek, Vaněk [3].

1.1 Empirická teplota

Tzv. Nultý zákon termodynamiky uvádí, že „Je-li každé z těles A i B v tepelné rovnováze se třetím tělesem C, budou v tepelné rovnováze také tělesa A a B navzájem, tedy stav tepelné rovnováhy je tranzitivní. Stav tepelné rovnováhy lze charakterizovat jediným spojitě proměnným parametrem – teplotou,“ formulace převzata z [12]. Z tohoto zákona vyplývá zavedení empirické teplotní stupnice (a empirické teploty jakožto jejích hodnot), libovolně očíslované stupnice splňující tato kritéria:

- (i) tělesa, kterým je přiřazena různá teplota nejsou spolu v rovnováze,
- (ii) tělesa, kterým je přiřazena stejná teplota jsou spolu v tepelné rovnováze,
- (iii) při reálných dějích se empirická teplota mění spojitě.

Tato definice připouští nekonečné množství způsobů zavedení empirické teploty, protože každá spojitá rostoucí funkce teploty je opět teplotou. To je také příčinou koexistence např. Celsiovy a Fahrenheitovy stupnice.

Libovolné zavedení stupnice však nebylo jedinou komplikací při porovnávání výsledků měření fyziků např. v Evropě a v Americe. Výraznější problém byl v „rovnoměrnosti“ rozdělení stupnice. Totiž, stupnice byla obvykle zavedena dvěma „stabilními“ teplotami, např. teplota směsi kuchyňské soli a ledu byla označena za 0 °F, teplota těla pana Fahrenheita za 96 °F; mezi těmito body byla lineárně rozdělena. Ovšem, měřila-li se teplota daného tělesa teploměrem využívajícím

teplotní roztažnosti rtuti, lišil se výsledek od toho, který byl získán teploměrem naplněným vodou či toho, který udával teploměr založený na teplotně závislé změně odporu platinového drátu.

Proto se úsilí fyziků zaměřilo na zavedení nové definice teploty, oproštěné od konkrétního materiálu či teplotně závislého jevu.

1.2 Absolutní termodynamická teplota

Termodynamickou teplotu definuje např. Chandler [2] jakožto derivaci vnitřní energie podle entropie za konstantního objemu

$$T \equiv (\partial U / \partial S)_V. \quad (1)$$

Pro takto zavedenou teplotu Chandler [2] okamžitě odvozuje několik zajímavých vlastností:

(i) Předně, termodynamická teplota je nezápornou veličinou.

K důkazu tohoto tvrzení stačí uvážit, že entropie je monotónně rostoucí funkcí vnitřní energie, $(\partial S / \partial U)_V > 0$, tedy $(\partial U / \partial S)_V \geq 0$.

(ii) Jsou-li dvě tělesa ve stavu tepelné rovnováhy, pak mají stejnou teplotu.

Uvažme „malé“ vychýlení z rovnovážného stavu systému dvou těles označených 1 a 2. Protože entropie nabývá ve stavu rovnováhy svého maxima, musí se při tomto vychýlení nutně zmenšit, $(\delta S)_{U,V} \leq 0$. Je aditivní veličinou, proto

$$\delta S = \delta S^{(1)} + \delta S^{(2)}. \quad (2)$$

A platí zákon zachování energie

$$\delta U^{(1)} = -\delta U^{(2)}. \quad (3)$$

Celkem tedy dostáváme

$$\delta S = \delta S^{(1)} + \delta S^{(2)} = \left(\partial S^{(1)} / \partial U^{(1)} \right)_V \delta U^{(1)} + \left(\partial S^{(2)} / \partial U^{(2)} \right)_V \delta U^{(2)} = \left(1/T^{(1)} - 1/T^{(2)} \right) \delta U^{(1)} \leq 0, \quad (4)$$

pro kladné i záporné malé změny $\delta U^{(1)}$. Tuto nerovnost lze splnit pouze postulováním $T^{(1)} = T^{(2)}$ ve stavu rovnováhy.

(iii) Při nastolování tepelné rovnováhy mezi dvěma tělesy předává těleso s vyšší teplotou teplo tělesu s nižší teplotou.

Mějme systém dvou těles označených 1, 2, která nejsou ve stavu tepelné rovnováhy, tedy $T^{(1)} \neq T^{(2)}$, bez újmy na obecnosti $T^{(1)} > T^{(2)}$. Nastolování rovnováhy je přírodním procesem, tedy při něm narůstá entropie, $(\delta S)_{U,V} > 0$.

Obdobnou sadou úprav a předpokladů jako u (4) dostaneme $(1/T^{(1)} - 1/T^{(2)})\delta U^{(1)} > 0$, což může být splněno, pouze pokud $\delta U^{(1)} < 0$.

Termodynamická teplota tedy splňuje požadavky kladené na empirickou teplotu. Její definici je ještě nutno doplnit zavedením jednotky. Ta byla nazvána Kelvin K a trojnému bodu vody byla přiřazena teplota 273,16 K (to proto, aby rozdíl teplot 1 K byl roven rozdílu teplot 1 °C). Druhým významným bodem termodynamické teplotní stupnice je 0 K, tzv. absolutní nula, teplota odpovídající stavu tělesa s minimální vnitřní energií (jak připouští kvantová teorie, základní energie kvantově-mechanického systému nemusí být nulová). Podle Třetího zákona termodynamiky je možné se této teplotě limitně blížit, konečným počtem kroků je ale nedosažitelná.

2. Měření teploty

V předchozí kapitole byl vymezen pojem teploty a byla zavedena její jednotka. Protože se jedná o intenzivní veličinu (nezávisí na velikosti systému), není jí možné přímo přiřadit etalon, jakým je např. metr pro extenzivní veličinu délka. Proto je vhodné doplnit stupnici „pomocnými body“, pevnými body, jejichž hodnoty je třeba určit měřením a neustálým porovnáváním. Tato kapitola se tedy bude zabývat hledáním vhodných objektů, jejichž teplota je za daných podmínek neměnná.

2.1 Pevné body

Mezi pevné body patří body tání a tuhnutí daných čistých látek za určitého tlaku (tedy teploty rovnovážných stavů pevných a kapalných fází látek), body varu při určitém tlaku (teploty, při kterých se tlak par kapalin vyrovná okolnímu tlaku) a trojné body (teploty koexistence pevných, kapalných a plynných fází, v praxi nahlížené jako body tání nebo tuhnutí za tlaku vlastních par). Tyto teploty jsou „pevně dané“, tj. budou výsledkem všech pečlivě provedených výše zmíněných experimentů s velmi (chemicky) čistými látkami.

Pro účely termometrie jsou vhodnější trojné body a body tání a tuhnutí více než body varu, jejichž příprava vyžaduje měření tlaku s velmi obtížně dosahovanou přesností. Problém ilustruje Quinn [4] uváděje, že při realizaci bodu varu síry změna tlaku 0,3 Pa vede ke změně teploty 0,2 mK.

V oblasti nižších teplot se jako pevné body mohou využít i teploty supravodivých přechodů.

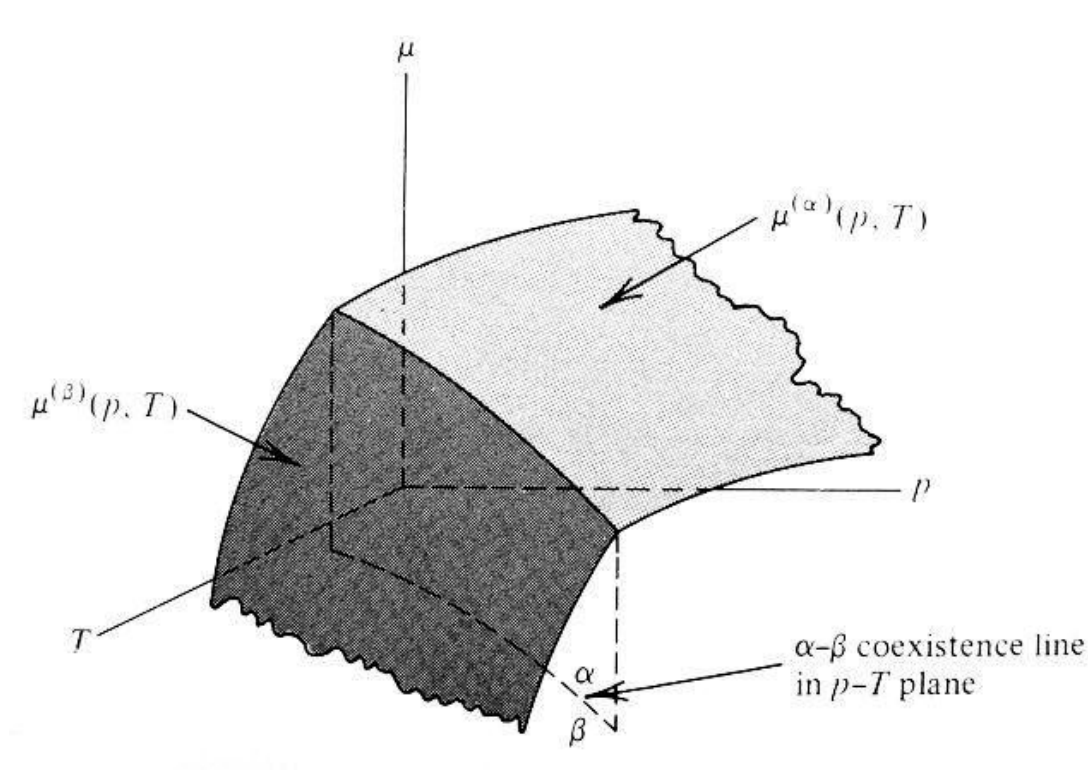
2.2 Fázový diagram

Gibbsovo fázové pravidlo

$$V = S - F + 2 \quad (5)$$

určuje počet stupňů volnosti V rovnovážné soustavy s F fázemi složené z S nezávislých složek, formulace převzata z [3]. Pro jednosložkový systém vyskytující se v jediném skupenství odtud vyplývá nezávislost dvou stavových veličin (obvykle je volen tlak P a teplota T). Přítomnost dvou skupenství znamená závislost mezi těmito dvěma veličinami a všechny tři fáze mohou koexistovat pouze při jediné vhodné konstelaci tlaku a teploty.

Situaci popisuje fázový diagram – třírozměrné vyjádření vzájemného vztahu tlaku, teploty a chemického potenciálu μ . Jak uvádí Chandler [2], jednotlivé fáze představují plochy $\mu^{(i)}(P,T)$. Jejich průsečíky jsou křivky $\mu^{(\alpha)}(P,T) = \mu^{(\beta)}(P,T)$, podél kterých se systém vyskytuje ve dvou fázích (tlak a teplota jsou závislé). Všechny tři plochy se protínají v jediném bodě; při tomto tlaku a teplotě jsou v rovnováze tři fáze. Situace, kdy se protínají dvě fázové plochy příslušející fázím α a β je zachycena na obrázku 1, převzatém z [2].



Obr. 1: Plochy chemického potenciálu pro dvě fáze

2.3 Fázové přechody

Při pohybu z jedné do jiné plochy fázového diagramu dochází k fázovému přechodu. Jejich klasifikaci navrhl Ehrenfest na základě chování prvních derivací chemického potenciálu na rozhraní obou ploch. Navazují-li na sebe chemické potenciály hladce, jedná se o fázový přechod prvního druhu, jsou-li potenciál i jeho první derivace spojité a druhé derivace nespojitě, jedná se o fázový přechod druhého druhu.

Při fázových přechodech prvního druhu dochází ke změně molárního objemu V_m a molární entropie S_m , což je právě fyzikální význam prvních derivací chemického potenciálu:

$$\left(\frac{\partial\mu}{\partial P}\right)_T = \left(\frac{\partial G}{\partial P}\right)_T / n = V_m; \quad (6)$$

$$\left(\frac{\partial\mu}{\partial T}\right)_P = \left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_P / n = -S_m, \quad (7)$$

kde G je Gibbsův potenciál a n látkové množství. Skok entropie za konstantní teploty má význam tepla $T\Delta S = Q$. Fázové přechody prvního druhu tedy vyžadují výměnu tepla a jsou provázány objemovými změnami. To je typické pro všechny skupenské přechody.

Jak je uvedeno výše, fázový přechod odpovídá přechodu mezi plochami fázového diagramu. „Platná“ plocha je ta s nižším Gibbsovým potenciálem (v diskutovaném případě jednosložkového systému o daném látkovém množství je to ta s nižším chemickým potenciálem), druhá plocha odpovídá metastabilnímu stavu. U velmi (chemicky) čistých látek jsou známy jevy přehřátí a podchlazení, kdy se systém vyskytuje právě v těchto metastabilních oblastech. Jak uvádí např. Obdržálek, Vaněk [3], příčinou je komplikovanost fázových přechodů prvního druhu – je třeba narušit stávající strukturu, což probíhá snadněji u materiálů s nečistotami, např. bublinky vznikající v kapalině při varu jsou vzhledem ke své velké křivosti podrobeny významnému tlaku povrchového napětí. Při vnějším podnětu však systém metastabilní fázi opouští a rychle přejde do stabilní oblasti na ploše odpovídající nové fázi. Na tomto jevu je založena Wilsonova mlžná komora, která zaznamenává trajektorie částic na základě kondenzace, kterou vyvolávají při vletu do podchlazené páry, jak dodává Obdržálek, Vaněk [3]. Pokud nedojde k vnějšímu podnětu, přechod systému do stabilní oblasti bude vyvolán fluktuacemi.

U fázových přechodů druhého druhu ke změnám molárního objemu ani molární entropie nedochází, proto nejsou patrné ani výše zmiňované metastabilní fáze. To je případ např. kritického bodu.

2.4 Mezinárodní teplotní stupnice ITS-90

V předchozích podkapitolách jsme pojednali o pevných termometrických bodech a z jejich polohy ve fázovém diagramu vyvodili některé z jejich podstatných vlastností. Z těchto pevných bodů na svých zasedáních Comité International des Poids et Mesures vybírá a sestavuje mezinárodní teplotní stupnici tak, aby byl pokryt

potřebný interval teplot. Pro oblasti mezi pevnými body pak zavádí interpolační vztahy a měřidla tak, aby numerická hodnota teploty definovaná touto mezinárodní teplotní stupnicí byla blízkým přiblížením numerické hodnoty termodynamické teploty (tu lze získat např. ze známé účinnosti η Carnotova stroje pracujícího mezi měřenou teplotou T a trojným bodem vody T_{TPW} , $T = T_{TPW} (1 - \eta)$). Měření teploty pomocí mezinárodní teplotní stupnice je snadněji proveditelné, přesnější a vysoce reprodukovatelné, jak je uvedeno v její nejnovější deklaraci [7].

V době sepsání této práce je platná Mezinárodní teplotní stupnice ITS-90, zahrnující teploty od 0,65 K výše. Předcházely jí stupnice ITS-27, IPTS-48, IPTS-68 a EPT-76. V oblasti 0,65 K – 5 K je teplota mezinárodní teplotní stupnice T_{90} definovaná prostřednictvím experimentálně stanovených teplotních závislostí tlaků par izotopů helia ^3He a ^4He . V rozmezí 3 K – 24,5561 K se k definování teploty T_{90} používá heliový plynový teploměr kalibrovaný v trojném bodě neonu, trojném bodě rovnovážného vodíku (tj. vodíku s rovnovážnou koncentrací molekulárních forem ortho a para) a v jedné z teplot z předchozího intervalu. Mezi 13,8033 K a 1234,93 K je etalonem platinový odporový teploměr kalibrovaný v sadě vybraných pevných bodů. Mezi těmito body je stupnice rozčleněna na podintervaly, ve kterých jsou zavedeny referenční a deviační funkce, pomocí nichž se k zjištěnému odporu přiřadí příslušná teplota T_{90} .

Protože žádný platinový odporový teploměr není schopen poskytnout vysokou přesnost měření v celé této oblasti, je třeba vybrat teploměr s vhodným rozsahem, okalibrovat jej v nejbližších pevných bodech a ověřit, zda splňuje alespoň jednu z podmínek uváděných v deklaraci [7]:

$$(i) W(302,9146K) \geq 1,11807, \quad (8)$$

$$(ii) W(234,3156K) \leq 0,844235, \quad (9)$$

kde

$$W(T_{90}) = R(T_{90}) / R(273,16K); \quad (10)$$

$R(T_{90})$ značí odpor teploměru při teplotě T_{90} .

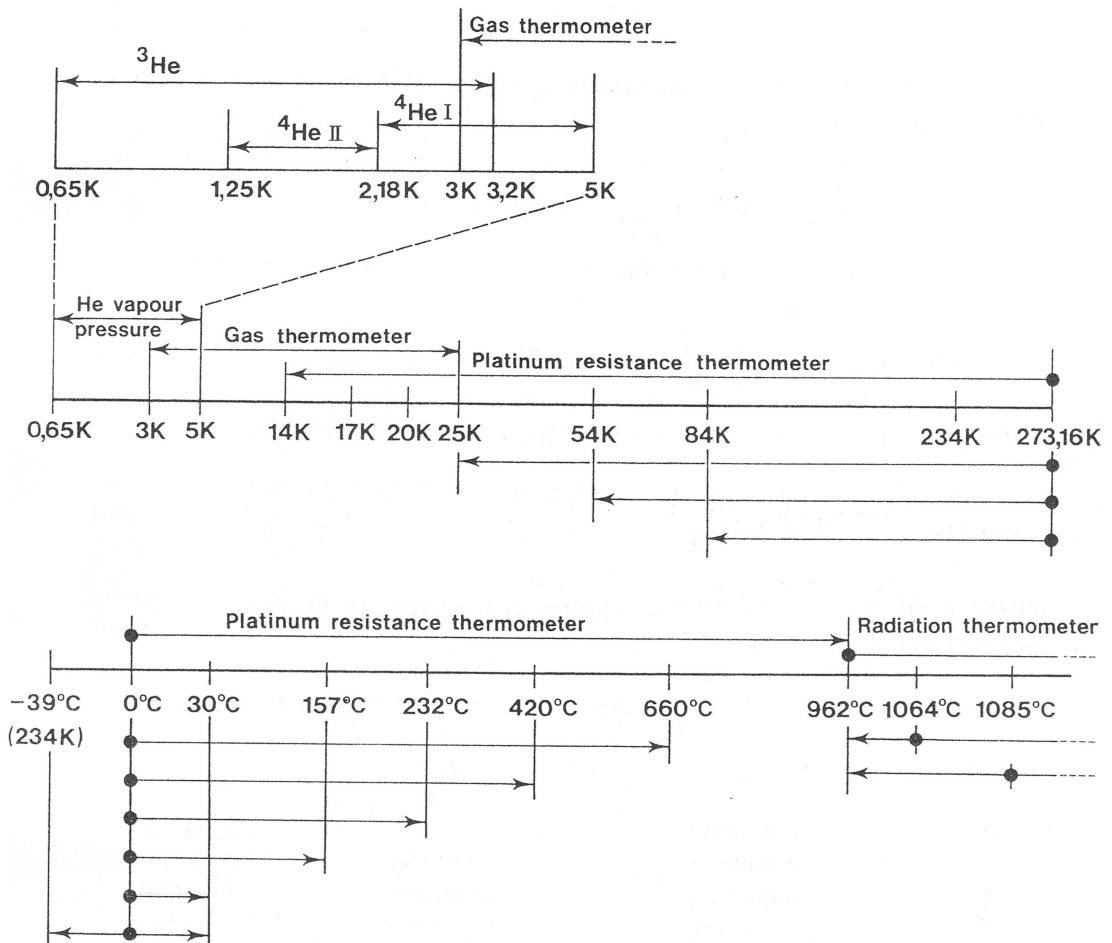
V oblasti nad 1234,93 K je teplota T_{90} definovaná pomocí Planckova vyzařovacího zákona.

Pevné body Mezinárodní teplotní stupnice ITS-90 jsou uvedeny v tabulce 1, body tání a tuhnutí jsou stanoveny za normálního tlaku 101 325 Pa.

Rozdělení na podintervaly s vyznačenými standardními instrumenty je znázorněno v obrázku 2, převzatém z [6]. Tabulky referenčních a deviačních funkcí pro oblast platinového odporového teploměru spolu s popisem postupu při přiřazování mezi odporem a teplotou jsou uvedeny v dřívější práci Holejšovského [1].

teplota [K]	pevný bod
3 až 5	bod podle tlaku par helia
13.8033	trojný bod rovnovážného vodíku
cca 17	bod podle tlaku par rovnovážného vodíku nebo bod podle heliového plynového teploměru
cca 20.3	bod podle tlaku par rovnovážného vodíku nebo bod podle heliového plynového teploměru
24.5561	trojný bod neonu
54.3584	trojný bod kyslíku
83.8058	trojný bod argonu
234.3156	trojný bod rtuti
273.16	trojný bod vody
302.9146	bod tání gallia
429.7485	bod tuhnutí india
505.078	bod tuhnutí cínu
692.677	bod tuhnutí zinku
933.473	bod tuhnutí hliníku
1234.93	bod tuhnutí stříbra
1337.33	bod tuhnutí zlata
1357.77	bod tuhnutí mědi

Tab. 1: Pevné body Mezinárodní teplotní stupnice ITS-90



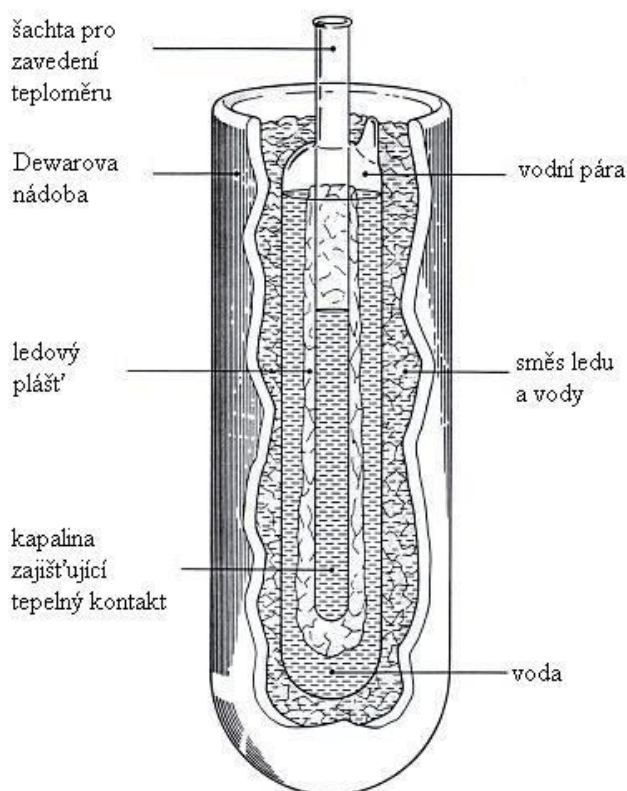
Obr. 2: Mezinárodní teplotní stupnice ITS-90, její rozčlenění na intervaly a standardní měřicí instrumenty

3. Praktická termometrie

První kapitola se zabývala zavedením teploty jako fyzikální veličiny, v druhé kapitole byla deklarována vhodná stupnice a navržen způsob měření. Tato kapitola se bude zabývat samotným měřením a okolnostmi podstatnými pro zabezpečení jeho přesnosti a reprodukovatelnosti.

3.1 Realizace pevných bodů

K realizaci pevných bodů se používá speciálních nádob. Pro trojné body je obvykle používána uzavřená válcová buňka s válcovou šachtou, umístěnou v ose buňky, pro vložení termometru. Z buňky je vyčerpán vzduch a vyskytuje se v ní pouze měřená substance a její páry. Před měřením je třeba vytvořit pevnou fázi tak, aby existovalo vnější (u stěny buňky) a vnitřní (u šachty) rozhraní s kapalinou. Takto připravená nádoba je vložena do vhodné lázně, která uchovává měřený systém v okolí požadované teploty. Skleněná buňka připravená pro realizaci trojného bodu vody je zobrazena na obrázku 3, převzatém ze stránek The National Physical Laboratory (NPL), britského metrologického institutu [10].



Obr. 3: Buňka připravená pro realizaci trojného bodu vody

V dodatku k deklaraci mezinárodní teplotní stupnice [6] jsou diskutovány faktory ovlivňující přesnost měření. V případě trojného bodu vody se jedná především o izotopické složení vody, efekt hydrostatického tlaku a dobu existence ledového pláště.

Mořská voda se od sladké liší koncentrací izotopu 2H na 1 mol izotopu 1H , při destilaci se obsah 2H ještě snižuje. Běžný rozdíl v teplotách trojných bodů je $40 \mu K$, maximální byl zjištěn $0,25 \text{ mK}$, a to mezi jezerní vodou a vodou získanou táním polárního ledovce. Situaci ilustruje obrázek 4, převzatý ze stránek amerického výrobce termometrické techniky [8].



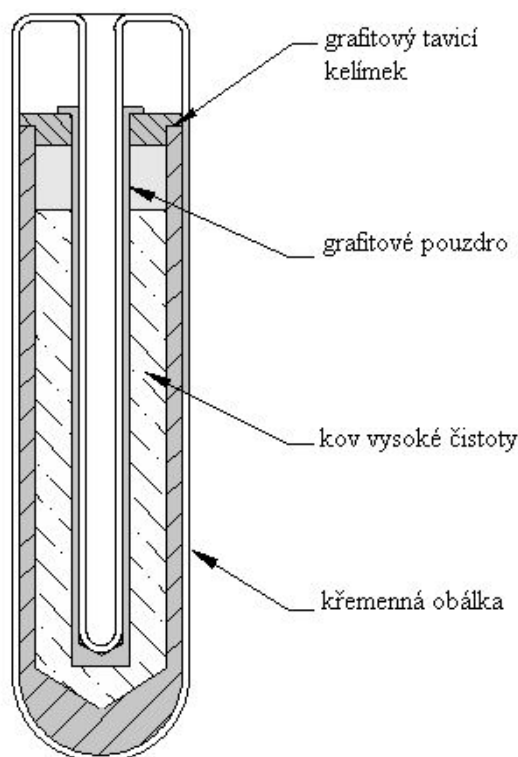
Obr. 4: Ilustrace vlivu izotopického složení vody na teplotu trojného bodu

Teplota trojného bodu se vyskytuje na hladině kapaliny, rovnovážná teplota t rozhraní ledu a vody v hloubce l pod povrchem je dána vztahem $t = 273,16 - 7,3 \cdot 10^{-4} l$. Při měření v hloubce 10 cm je tedy rozdíl teplot $73 \mu K$.

Teplota čerstvě připraveného trojného bodu vody je přibližně o 0,5 mK nižší, během jednoho až dvou dnů postupně dosahuje stabilní hodnoty. Tento jev je připisován na vrub napětí vznikajícímu v nově zmrzlém ledu, které se postupně uvolňuje, když led sílí.

Buňky pro realizaci trojného bodu rtuti jsou vyráběny z nerezové oceli, ve které se rtuť příliš nepodchladzuje (jen asi 0,1 – 0,3 K, kdežto např. v borosilikátovém sklu dochází k podchlazení až 6 K). Efekt hydrostatického tlaku je asi desetkrát větší než u vody, způsobuje rozdíl teplot $710 \mu\text{K}$ na 10 cm hloubky.

Nádoby pro realizaci bodů tání a tuhnutí kovů se obvykle skládají z tavicího kelímku z velmi čistého grafitu, v něm je ingot vysoce čistého kovu (obvykle se používá „šestidevítková“, popř. „sedmidevítková“ čistota, to je čistota 99,9999%, popř. 99,99999%). Kelímek je s argonovou atmosférou zataven v křemenné obálce, opět s šachtou pro zavedení teploměru. Náčrt buňky je na obrázku 5, převzatém z podpůrných stránek stupnice ITS-90 [9].



Obr. 5: Náčrt obvyklé buňky pro realizaci bodů tání a tuhnutí kovů

Před samotným měřením je, podobně jako u trojného bodu vody, třeba navodit vnější a vnitřní rozhraní mezi kapalnou a pevnou fází. Pomalé tuhnutí substance začíná od vnějšího rozhraní a způsobuje tak vytvoření „skořápky“ kolem kapaliny,

kteřá obklopuje řachtu s teploměrem, jak je uvedeno v podpůrných materiálech deklarace Mezinárodní teplotní stupnice ITS-90 [6]. Vnitřní rozhraní je tedy stálé, mimo vyvedení z tepelné rovnováhy vnějším zásahem, např. vložením chladnějšiho teploměru. Existence „ochranné schránky“ je důvodem, proč je při nejpřesnějších měřeních preferován bod tuhnutí před bodem tání. Není-li nejvyšší přesnost vyžadována, dojdou ocenění body tání, které jsou snadněji realizovatelné a eliminují efekty jako vytváření zárodků a přechlazení. Ovšem ani hladiny tání ani hladiny tuhnutí nemají po celé své délce konstantní teplotu. To je třeba zohlednit a vyřadit prvních a posledních 20% měření, jak doporučuje podpůrný materiál Mezinárodní teplotní stupnice ITS-90 [6].

V případě gallia se jako pevný bod používá bod tání místo bodu tuhnutí, protože při tuhnutí gallium vykazuje značné podchlazení. Tuhnutí je také provázeno expanzí, až o 3,1%, proto se pro realizaci buňky bodu tání gallia používají flexibilní plasty nebo plastová výstelka v kovové buňce. Efekt hydrostatického tlaku gallia způsobuje rozdíl teplot $120 \mu\text{K}$ na 10 cm hloubky.

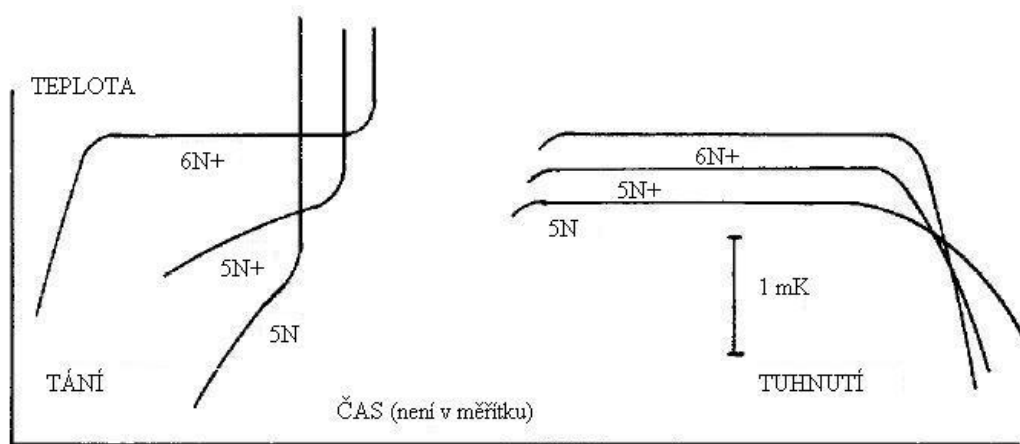
3.2 Obecné termometrické požadavky

Jak bylo uvedeno výše, v bodech tání a tuhnutí i v trojném bodě dochází k fázovým přechodům prvního druhu, které jsou doprovázeny výměnou tepla s okolím. Praktická termometrie usiluje o co nejdelší trvání této výměny, tedy o co nejdelší setrvání systému v daném pevném bodě, neboť tak se vyloučí případné metastabilní fáze a náhodné fluktuace.

The National Physical Laboratory (NPL), na svých stránkách [10] nabízí nádoby pro realizaci pevných bodů, u kterých bylo dosaženo minimálně šestihodinového setrvání na hladině tání a tuhnutí. Nejistota v realizaci pevných bodů těmito buňkami se mění s měřenou látkou od 0,2 mK u rtuti a gallia až po 3 mK pro stříbro.

Pro měření aspirující na vysokou přesnost je samozřejmostí použití vysoce (chemicky) čistého materiálu. Přítomnost nečistot způsobuje posun hladiny tuhnutí a deformuje hladinu tání, jak demonstruje obrázek 6, převzatý z podpůrných stránek stupnice ITS-90 [9] (6N+ znamená čistotu „šestidevítkovou“ a lepší apod.). Rozhodnutí, do jaké míry mohou být nečistoty tolerovány, není snadné, jak uvádí

Quinn [4], a závisí na vlastnostech nečistot, na tom, zda zvyšují či snižují teplotu pevného bodu, na jejich rozpustnosti a na termální historii vzorku.



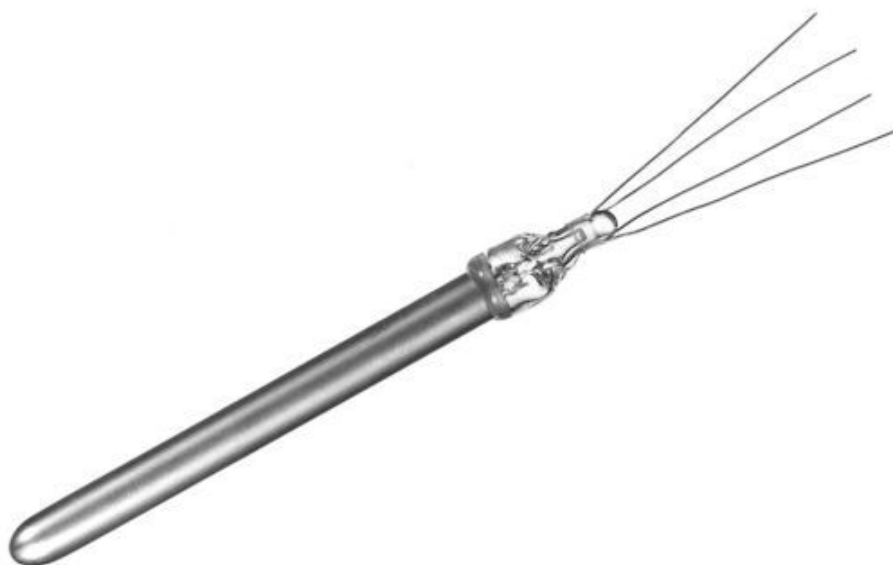
Obr. 6: Vliv čistoty materiálu na průběh tání a tuhnutí

Důležitým požadavkem je také použití vhodné kapaliny zprostředkující tepelný kontakt teploměru a nádoby pro realizaci pevného bodu, dostatečná délka šachty pro zavedení teploměru (tak, aby byl celý v tepelném kontaktu s měřenou substancí) a dobrá tepelná izolace celého systému od okolí.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

1. Platinový odporový teploměr Tinsley 5187L

Pro veškerá teplotní měření byl použit platinový odporový teploměr Tinsley 5187L. Jeho teploměrný element je tvořen platinovým drátkem vysoké čistoty stočeným do spirály, aby se předešlo mechanickému pnutí. Ten je zataven v křemenném pouzdře s platinovým pláštěm a je naplněn heliovou atmosférou o tlaku cca 30 kPa při 20 °C, což snižuje reakční dobu teploměru na 2 s. Průměr pouzdra je 5,2 mm při délce 47 mm, ze snímače jsou průtavem vyvedeny čtyři platinové vodiče (dva proudové, dva napěťové), prodlužující tak celkovou délku na 65 mm. Teploměr Tinsley 5187L je na obrázku 7, převzatém ze stránek výrobce [11].



Obr. 7: Platinový odporový teploměr Tinsley 5187L

Teploměr je vhodný pro měření teplot v rozsahu 13,8 - 303 K s přesností 2 mK a reprodukovatelností 1 mK, jak uvádí výrobce [11]. Poměr odporu v bodě tání gallia k odporu v trojném bodě vody vyhovuje podmínce kladené na kalibrační teploměr (8), uvedené v teoretické části. Odpor v trojném bodě je $(25,0 \pm 0,5) \Omega$.

2. Trojný bod vody

Trojný bod vody má v metrologii významné postavení, protože je základem pro definici velikosti jednotky teploty. Dohodou mu byla připsána teplota 273,16 K.

2.1 Realizace trojného bodu vody

Při měření byly použity buňky pro realizaci trojného bodu zobrazené na obrázku 8. Byly nejprve ochlazeny v ledničce a posléze v lázni tvořené směsí ledu a vody. Opakovaným vkládáním tyče ochlazené v kapalném dusíku do šachty sloužící pro zavedení teploměru došlo ke vzniku pevné fáze a vnějšího rozhraní v buňce. Vnitřní rozhraní bylo vytvořeno vkládáním tyče o pokojové teplotě. Takto připravený trojný bod byl umístěn v termosce se směsí drceného ledu a vody.

Do šachtice v buňce byl zasunut teploměr a tepelný kontakt mezi ním a trojným bodem zajišťoval etanol.

Pro účely měření byl sestaven jednoduchý elektrický obvod se sériově zapojeným teploměrem a odporovým normálem o nominální hodnotě 100 Ω . Napětí na obou prvcích bylo snímáno a ze zjištěných hodnot byl určen odpor teploměru použitím vztahu

$$R = UR_N / U_N, \quad (11)$$

kde U je napětí na teploměru, R_N odpor normálu (tedy 100 Ω) a U_N napětí na normálu.

Mezi jednotlivými měřeními byl trojný bod uchováván v ledničce a dle potřeby byl obnovován.



Obr. 8: Buňky použité při realizaci trojného bodu vody

2.2 Výsledky měření trojného bodu vody

První sada měření proběhla s menší buňkou (na obrázku 8 dole).

Napětí bylo snímáno multimetrem Keithley, model 2000, výrobce udává chybu měření 30 ppm z měřené hodnoty. Při použití proudu 1 mA to znamená chybu určení odporu $0,0008\Omega$. Pro výpočet chyby teploty je možno uvažovat lineární vztah

$$\Delta R = R_0 \alpha \Delta T, \quad (12)$$

kde $\alpha = 0,00385 \Omega K^{-1}$. Odtud plyne chyba v určení teploty 8 mK (při použití proudu 1 mA).

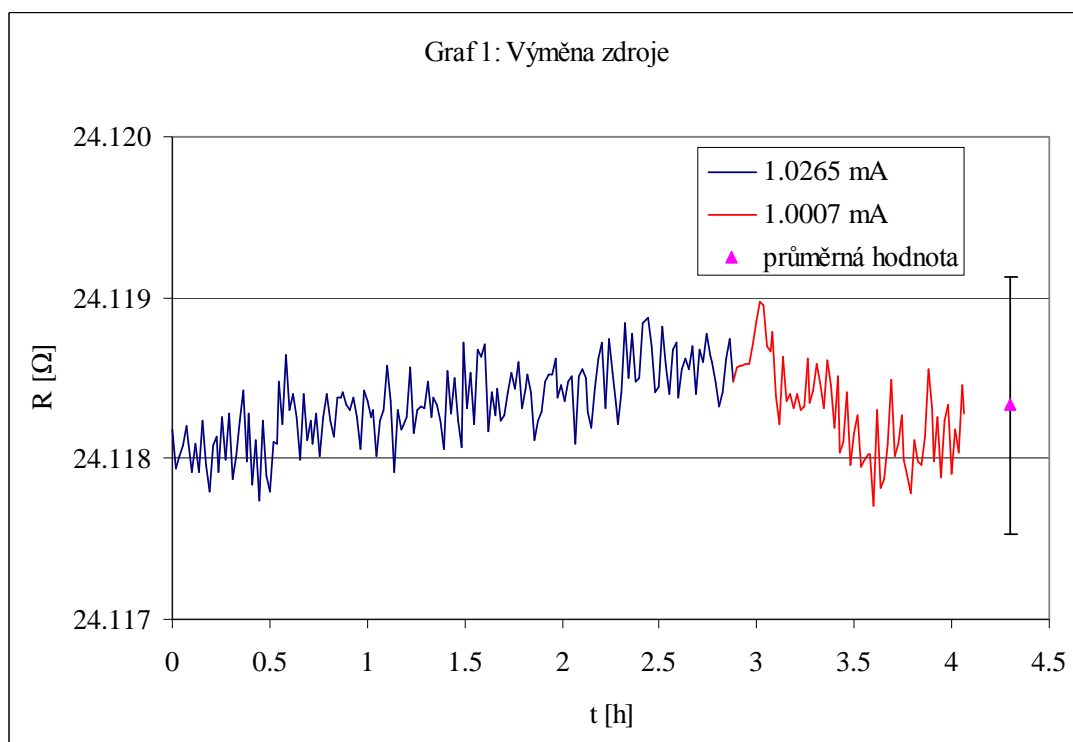
Jak bylo zjištěno v dřívější práci Holejšovského [1], na přívodních vodičích se vytváří termoelektrické napětí, proto byl odpor teploměru proměřen i při záporné polaritě proudu a při více velikostech. Největší počet měření byl proveden při proudu 1 mA, jak je obvyklé v metrologii, což je hodnota dostatečně nízká, aby nedošlo ke zbytečnému ohřevu buňky Jouleovým teplem (jak ukázal Holejšovský [1]), a zároveň dostatečně vysoká, aby se výrazně neprojevila nestálost zdroje. Hodnoty odporu při jiných velikostech proudu byly získány poměrně rychlým přepínáním zdroje (přibližně po 5 minutách) při ustálené hodnotě odporu při průchodu proudu 1 mA. Z dvanácti provedených měření bylo vybráno třiačtyřicet hodnot odporu teploměru příslušných různým hodnotám procházejícího proudu (29 při kladné polaritě a 14 při záporné), jsou uvedeny v tabulce 2. Jak ukazuje jedno z měření (graf 1), odchylka ve velikosti proudu o cca 2,5% se ve sledované hodnotě odporu neprojeví, proto jsou v tabulce 2 velikosti proudu často uvedeny v celočíselných hodnotách, i když okolo této hodnoty varírují (ale vždy o méně než zmíněné procento). U hodnot označených * byl trojný bod udržován více než hodinu, u hodnoty označené ** setrval systém v požadovaném stavu až 5 hodin.

Na tato data byla aplikována metoda lineární regrese podle vztahu

$$RI = U_{TE} + R_{Pt} I, \quad (13)$$

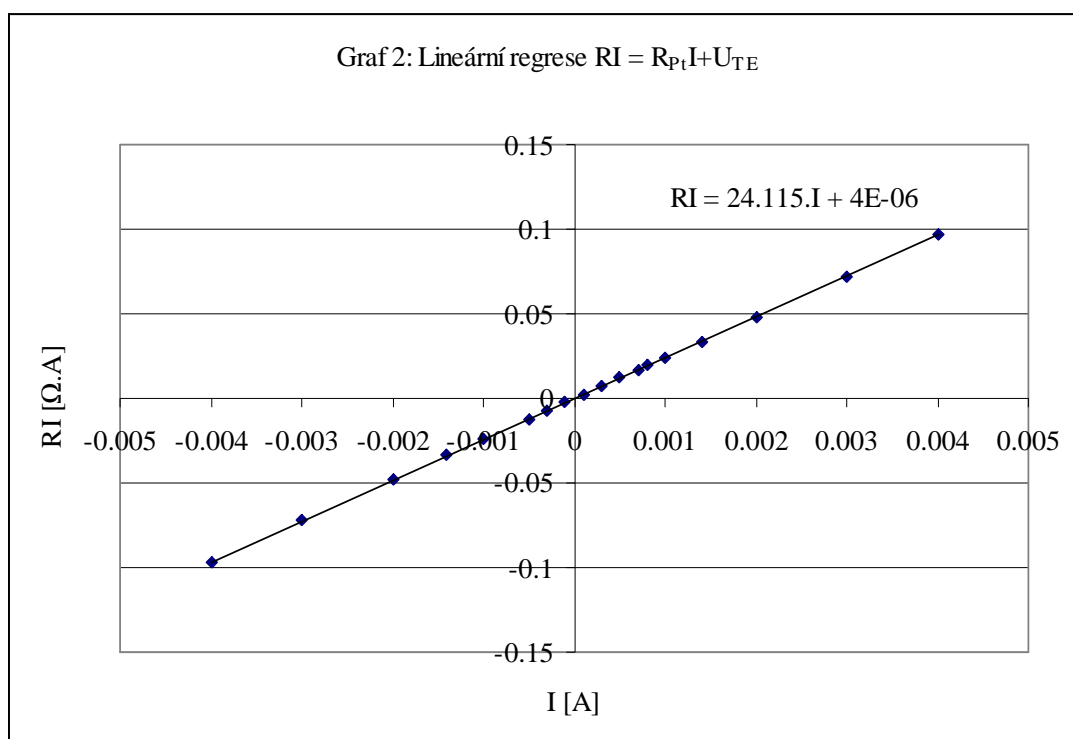
kde U_{TE} značí termoelektrické napětí a R_{Pt} „skutečný“ odpor platinového teploměru. Proložení regresní přímkou je zobrazeno v grafu 2. Touto metodou byla pro měření v trojném bodě vody určena velikost termoelektrického napětí $U_{TE} = 4.10^{-6}$ V a odpor platinového teploměru $R_{Pt} = 24,115 \Omega$, což je po dosažení do vztahu (11) v dobré shodě s nejpřesnější naměřenou hodnotou odpovídající proudu 1 mA, a to $24,119 \Omega$ získáno regresí a $24,1190 \Omega$ naměřeno (tabulka 2, označeno

**). Vzhledem k dosahované přesnosti měření a značnému rozptylu hodnot odporu získaných při měření se stejnou velikostí proudu jsou regresní výsledky uváděny jakožto orientační.



kladná polarita					
I [mA]	R [Ω]				
4	24.1164				
3	24.1154				
2	24.1153				
1.4	24.1157				
1	24.1188*	24.1222*	24.1183*	24.1189*	24.1190**
	24.1182*	24.1186	24.1176	24.1166	24.1176
	24.1185*	24.1200*	24.1168	24.1189*	24.1187*
0.8	24.1192				
0.7	24.1202				
0.5	24.1231	24.1239	24.1233	24.1211	
0.3	24.1301			24.1257	
0.1	24.1540			24.1454	
záporná polarita					
I [mA]	R [Ω]				
-4	24.1145				
-3	24.1133				
-2	24.1120				
-1.4	24.1104			24.1087	
-1	24.1104*	24.1101	24.1095	24.1079	24.1094
	24.1066				
-0.5	24.1067				
-0.3	24.1022				
-0.1	24.0824				

Tab. 2: První sada měření v trojném bodě vody

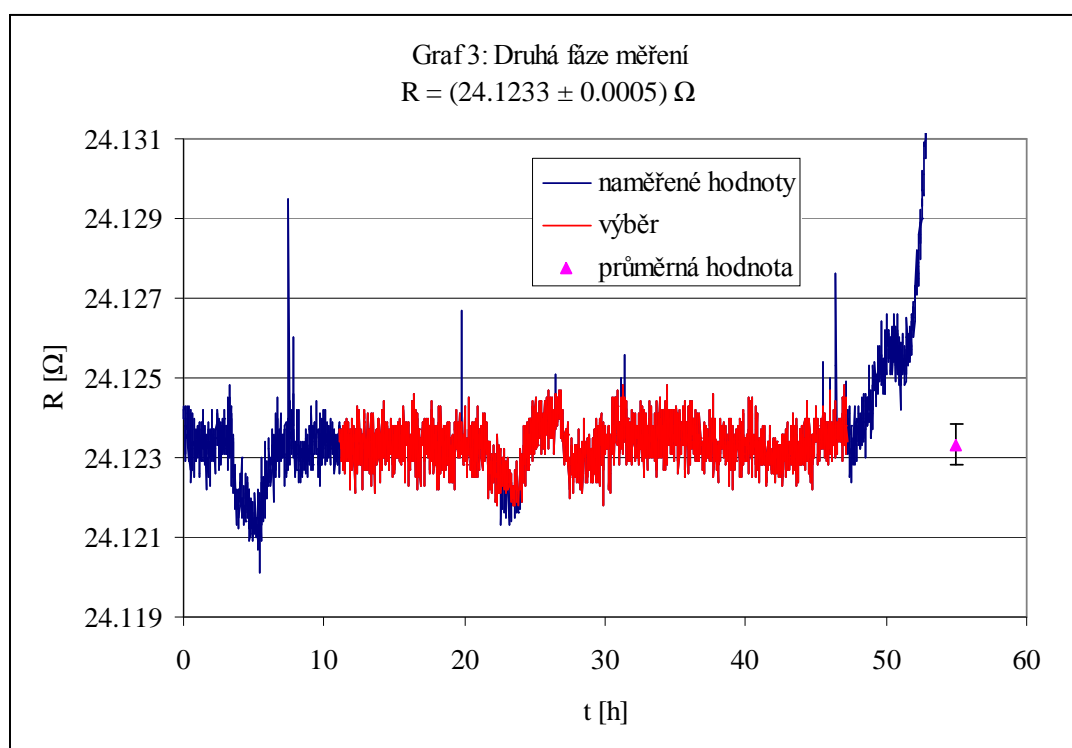


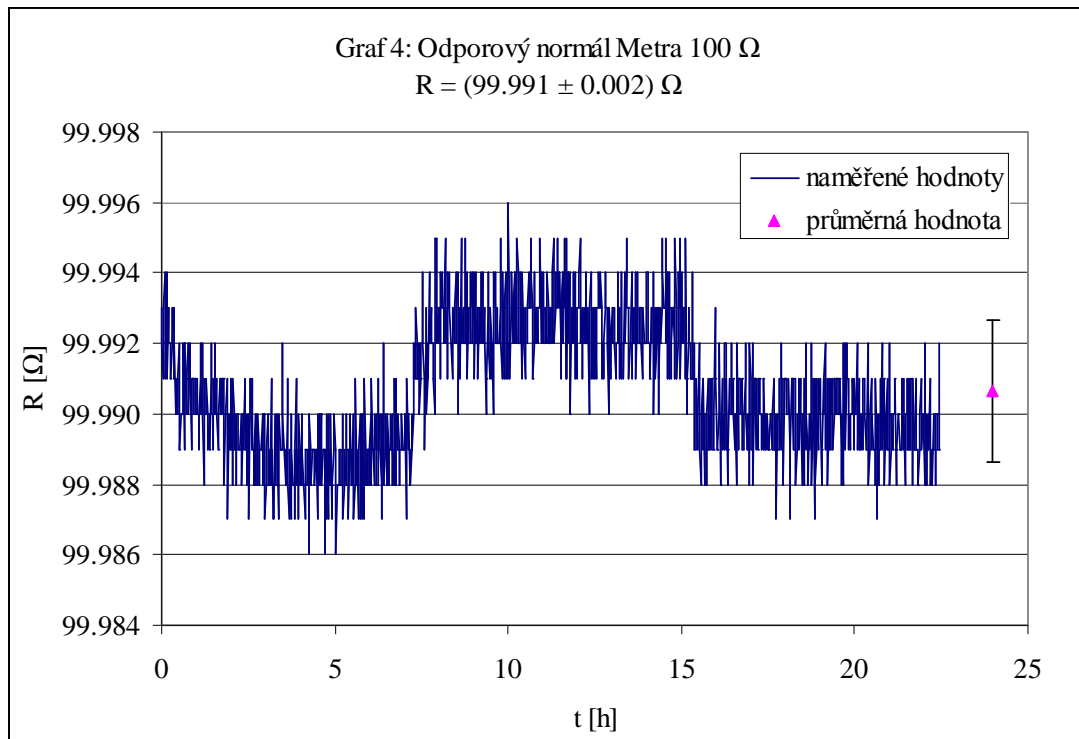
Druhá sada měření byla provedena v laboratorních podmínkách umožňujících použití střídavého proudu, tedy byl vyloučen vliv termoelektrického napětí. K měření odporu byl použit nízkofrekvenční automatizovaný odporový můstek Conductus. Proběhlo 7 měření, jejichž výsledkem bylo navrzení takového uspořádání experimentu, při kterém systém setrval v trojném bodě po dobu 36 hodin. Toho bylo dosaženo umístěním buňky s trojným bodem do termosky se směsí vody a ledu, termoska pak byla uzavřena ve velké polystyrénové nádobě, do níž byl nasypán led. Záznam tohoto měření je v grafu 3, červeně je označen výběr vyhovující statistické podmínce

$$|x_i - \mu| < 3\sigma \quad (14)$$

(kde x_i je naměřená hodnota, μ průměrná hodnota a σ statistická odchylka), průměrná hodnota výběru je uvedena se statistickou chybou. Touto metodou byl určen odpor platinového teploměru při teplotě trojného bodu vody $R = (24,1233 \pm 0,0005) \Omega$.

Součástí této fáze bylo také ověření velikosti nominálního odporu používaného odporového normálu Metra, to je ukázáno v grafu 4. Ačkoli byla tato hodnota určena jako $(99,991 \pm 0,002) \Omega$, vzhledem k nízké přesnosti měření lze nominální hodnotu odporového normálu považovat za ověřenou.



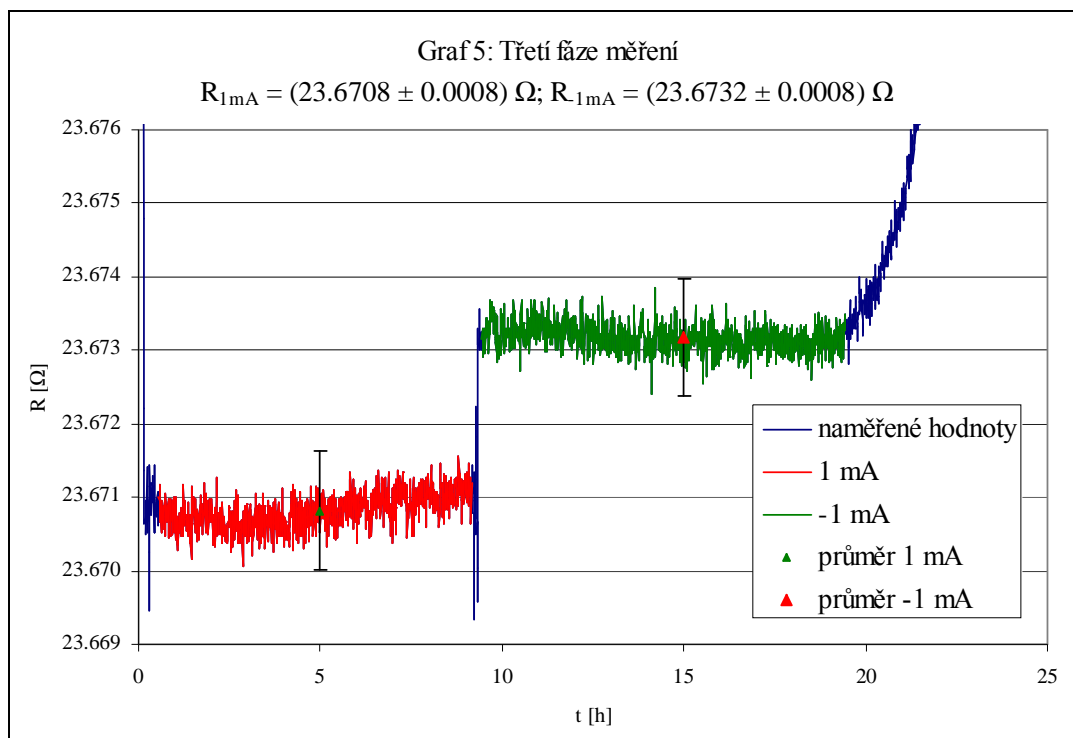


Ve třetí, poslední fázi měření byla vyrobena druhá buňka (na obrázku 8 nahoře), která svou délkou umožnila vložení celého teploměru do šachtice tak, aby v celé délce sousedil s vytvořeným ledem v buňce, tím byla zajištěna homogenita teploty po celé délce teploměru. Také bylo opraveno připojení teploměru dostatečně dlouhými manganinovými dráty. S novou buňkou bylo provedeno dalších pět měření ve stejném experimentálním uspořádání jako v první fázi. Ze získaných dat bylo vybráno pět hodnot odporů při proudu 1 mA a jedna hodnota při proudu -1 mA, které jsou uvedeny v tabulce 3. Ve všech případech byl trojný bod udržován minimálně po dobu čtyř hodin. U hodnoty označené * systém setrval při konstantním odporu 8,5 hodin při kladné polaritě proudu a 10 hodin při záporné polaritě proudu. Příslušný fázový přechod je znázorněn v grafu 5. Výsledné hodnoty odporu platinového teploměru při teplotě trojného bodu jsou výrazně nižší než ty dříve naměřené, což je způsobeno zajištěním tepelného kontaktu celého teploměru s měřenou buňkou. Také se změnil rozdíl mezi hodnotami získanými při kladné a záporné polaritě. To bylo způsobeno novým připájením spojů na teploměru.

Použitím vztahu (11) na hodnoty označené * v tabulce 3 dostáváme odpor platinového teploměru při teplotě trojného bodu vody $R_{Pt} = (23,6720 \pm 0,0008) \Omega$ a hodnotu termoelektrického napětí $U_{TE} = 1,2 \cdot 10^{-6}$ V.

kladná polarita					
I [mA]	R [Ω]				
1	23.6691	23.6723	23.6705	23.6707	23.6708*
záporná polarita					
I [mA]	R [Ω]				
-1	23.6732*				

Tab. 3: Třetí sada měření v trojném bodě vody



2.2 Závěry měření trojného bodu vody

Hodnota odporu platinového teploměru při teplotě trojného bodu vody určená metodou lineární regrese se od hodnoty určené z 36 hodinového stabilizovaného stavu liší o cca $0,008 \Omega$, což odpovídá přibližně 80 mK (podle vztahu (12)). Dlouhé prodlevy ve stabilizovaném stavu systému bylo dosaženo nově navrženým experimentálním uspořádáním (buňka s trojným bodem byla umístěna do termosky se směsí vody a ledu, termoska pak byla uzavřena ve velké polystyrénové nádobě, do níž byl nasypán led).

Pro přesnost měření je podstatné zajistit homogenitu teploty po celé délce teploměru, čehož bylo dosaženo vyrobením nové buňky pro realizaci trojného bodu vody. Výsledky měření vyhovující tomuto požadavku se od těch předchozích liší o cca $0,5 \Omega$, což odpovídá rozdílu teplot přibližně 5 K.

Hodnota odporu platinového odporového teploměru při teplotě trojného bodu vody byla určena jako $R_{Pt} = (23,6720 \pm 0,0008) \Omega$. Hodnota termoelektrického napětí vytvářejícího se na přírodních vodičích při měření při této teplotě byla určena jako $U_{TE} = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ V}$.

Ačkoli výrobce teploměru na svých stránkách [11] proklamuje hodnotu odporu při teplotě trojného bodu vody $R = (25,0 \pm 0,5) \Omega$, tato hodnota nebyla zjištěna nyní ani v dřívější práci Holejšovského [1]. Důvěryhodnost určené hodnoty odporu $R_{Pt} = (23,6720 \pm 0,0008) \Omega$ podpírá také fakt, že úpravou experimentu tak, aby vyhovoval termometrickým zásadám (konkrétně zajištěním homogenity teploty po celé délce teploměru), se hodnota odporu ještě snížila, tedy zpřesněním měření došlo k ještě většímu odklonu od hodnoty uváděné výrobcem.

3. Bod tání gallia

Bod tání gallia se v Mezinárodní teplotní stupnici ITS-90 vyskytuje v bezprostřední blízkosti trojného bodu vody a pomáhá tak definovat hodnoty teploty v oblasti, se kterou se setkáváme v běžném životě. Jeho teplota je 302,9146 K, tj. 29,7646 °C.

3.1 Realizace bodu tání gallia

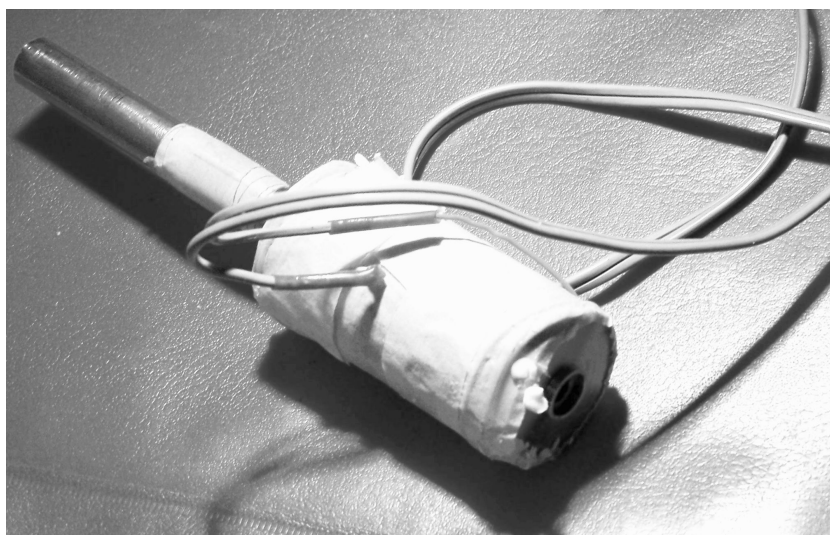
Při měření byla použita buňka pro realizaci bodu tání gallia s teflonovou výstelkou kolem vnější stěny, vršku nádoby a kolem šachtice, buňka je zobrazena na obrázku 9. Za povšimnutí stojí skutečnost, že teploměr je do ní zasouván zespoda (to kvůli objemovým změnám gallia při tuhnutí, zmíněným v teoretické části). Kolem buňky byl navinut odporový drát o celkovém odporu 205 Ω. Ten byl napájen z laboratorního zdroje stejnosměrného proudu a ohříval buňku výkonem podle vztahu

$$P = UI = U^2 / R. \quad (15)$$

Buňka byla obalena polyuretanovou pěnou Tubolit, používanou k tepelné izolaci potrubí.

Pro účely měření byl použit stejný elektrický obvod jako u měření s trojným bodem vody.

Za pokojové teploty se gallium vyskytuje v pevném stavu, nebylo jej tedy třeba vytvářet.



Obr. 9: Buňka použitá při realizaci bodu tání gallia

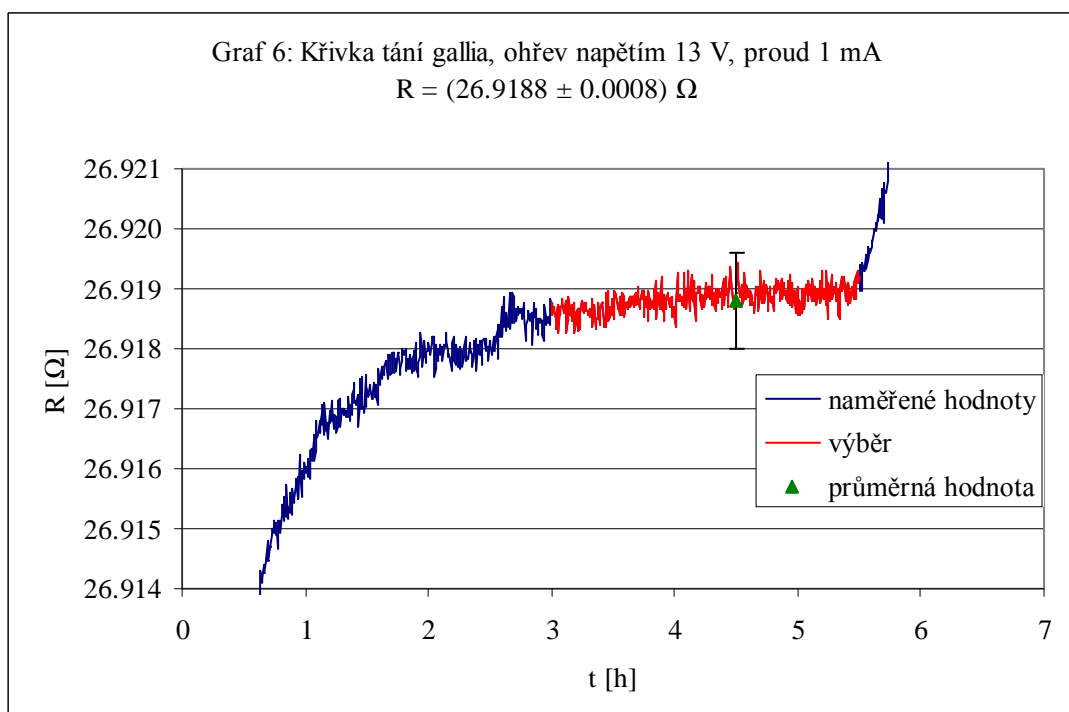
3.2 Výsledky měření bodu tání gallia

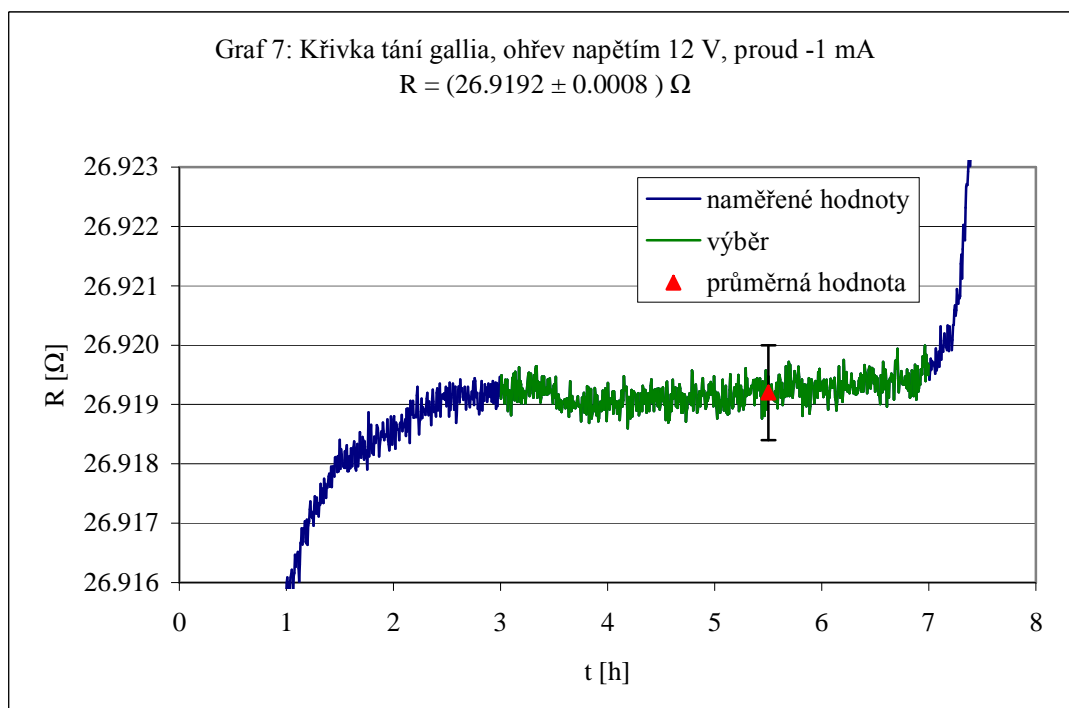
V bodě tání gallia bylo provedeno devět měření, v osmi z nich došlo k fázovému přechodu. Zjištěné hodnoty odporu jsou uvedeny v tabulce 4, u hodnot označených * setrval systém v požadovaném pevném bodě po dobu delší než 2 hodiny.

kladná polarita				
I [mA]	R [Ω]			
1	26.91 - 26.93	26.918 - 26.919	26.918 - 26.92	26.918 - 26.921
	26.918 - 26.921	26.9179*	26.9188*	
záporná polarita				
I [mA]	R [Ω]			
-1	26.9192*			

Tab. 4: Měření v bodě tání gallia

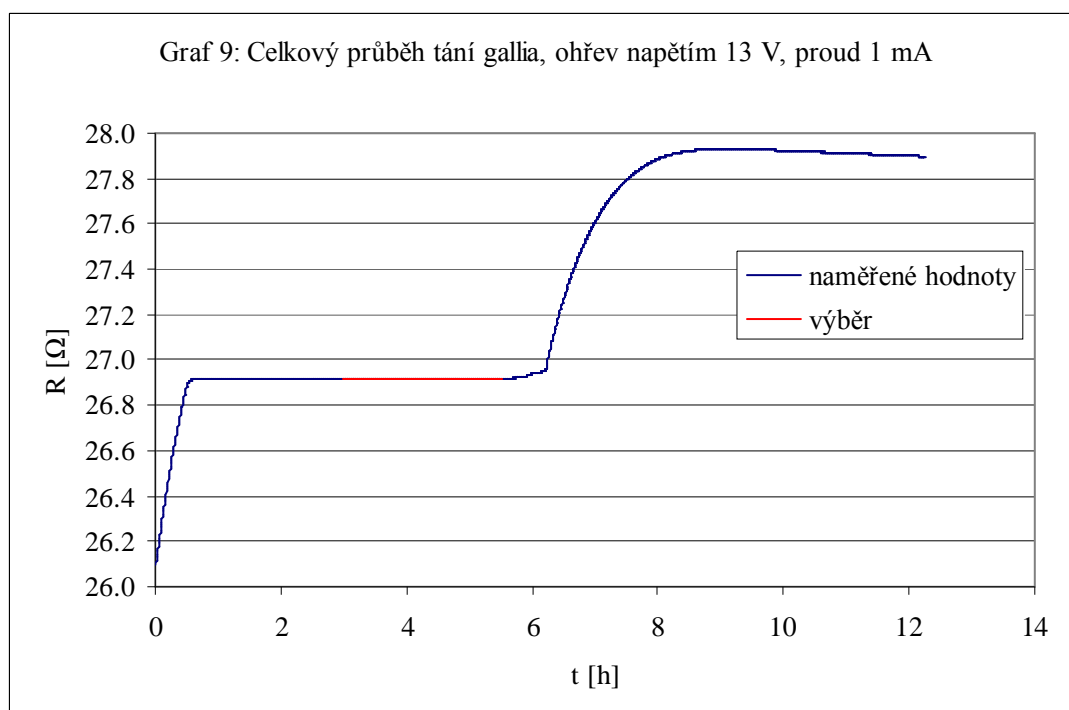
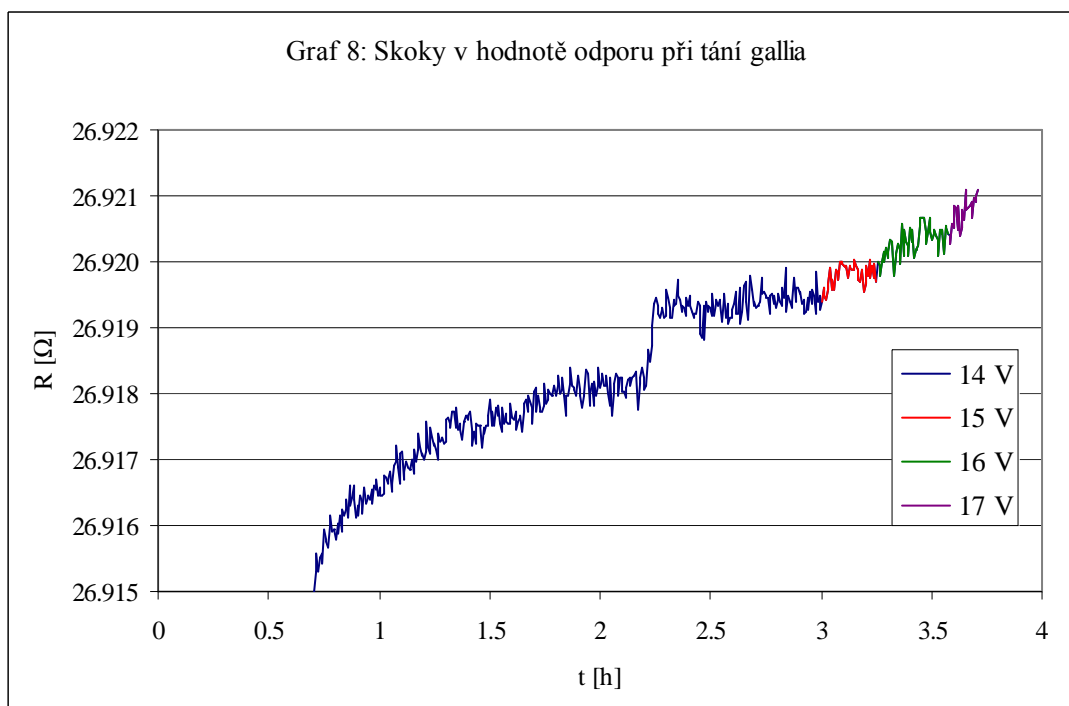
Výsledkem této sady měření bylo navržení optimální velikosti napětí přiváděného na odporový drát. Toto napětí bylo určeno jako $U = 12 \text{ V} - 13 \text{ V}$, což odpovídá příkonu cca $0,75 \text{ W}$. V grafech 6 a 7 jsou zachyceny detaily křivky tání získané ohřevem buňky tímto příkonem. Pro posouzení vlivu termoelektrického napětí bylo měřeno s proudem $I = 1 \text{ mA}$ (graf 6) a $I = -1 \text{ mA}$ (graf 7).





Tání gallia bylo často provázeno skoky v hodnotách odporu platinového teploměru, jak je ukázáno např. v grafu 8, kde je jejich velikost porovnávána s rozdíly způsobenými zvýšením ohřevu. Přínos záznamu celých měření, jejichž výřezy jsou znázorněny v grafech 6 a 7, spočívá také v potvrzení, že nová úroveň skoků nepředstavuje stabilizované stavy, kdy je buňce s gallií dodáváno přesně teplo potřebné k jeho udržení v tekutém stavu. Celkový průběh tání, jehož hlavní část byla předmětem grafu 6, je zobrazen v grafu 9.

Výsledná hodnota odporu platinového teploměru odpovídající bodu tání gallia byla určena jako průměr hodnot označených * v tabulce 4, tedy $R = (26,9186 \pm 0,0008) \Omega$. S touto výslednou hodnotou se všechny tři průměrované v rámci chyby shodují.



3.3 Závěry měření bodu tání gallia

Jak bylo zmíněno v teoretickém úvodu, hladina tání nemá po celé své délce konstantní teplotu. To se projevuje skoky v hodnotách odporu platinového teploměru. Bylo ukázáno, že přítomnost skoků nesouvisí se zvyšováním příkonu topení ani se stabilizovanými stavy.

Optimální příkon topného drátu byl určen jako cca 0,75 W. Při použití tohoto příkonu byl realizován fázový přechod, při kterém systém setrval v bodě tání gallia po dobu až čtyř hodin.

Vliv termoelektrického napětí se neprojevuje.

Teplotě bodu tání gallia odpovídá hodnota odporu platinového teploměru $R = (26,9186 \pm 0,0008) \Omega$.

4. Trojný bod rtuti

Trojný bod rtuti v Mezinárodní teplotní stupnici ITS-90 sousedí s trojným bodem vody. Jeho teplota je 234,3156 K, tj. -38,8344 °C.

4.1 Realizace trojného bodu rtuti

Pro realizaci trojného bodu rtuti byla použita uzavřená kovová buňka, která byla nejprve ochlazena v kapalném dusíku (o teplotě cca 77 K). Tím se vytvořila pevná fáze. Poté byla buňka tepelně zaizolována a ponechána při pokojové teplotě. Jak ukázal Holejšovský [1], tento postup, tedy dosažení trojného bodu táním, je z hlediska trvání fázového přechodu lepší, než kdyby bylo využito tuhnutí.

Při měření v trojném bodě rtuti bylo použito stejné experimentální uspořádání jako při měření v trojném bodě vody.

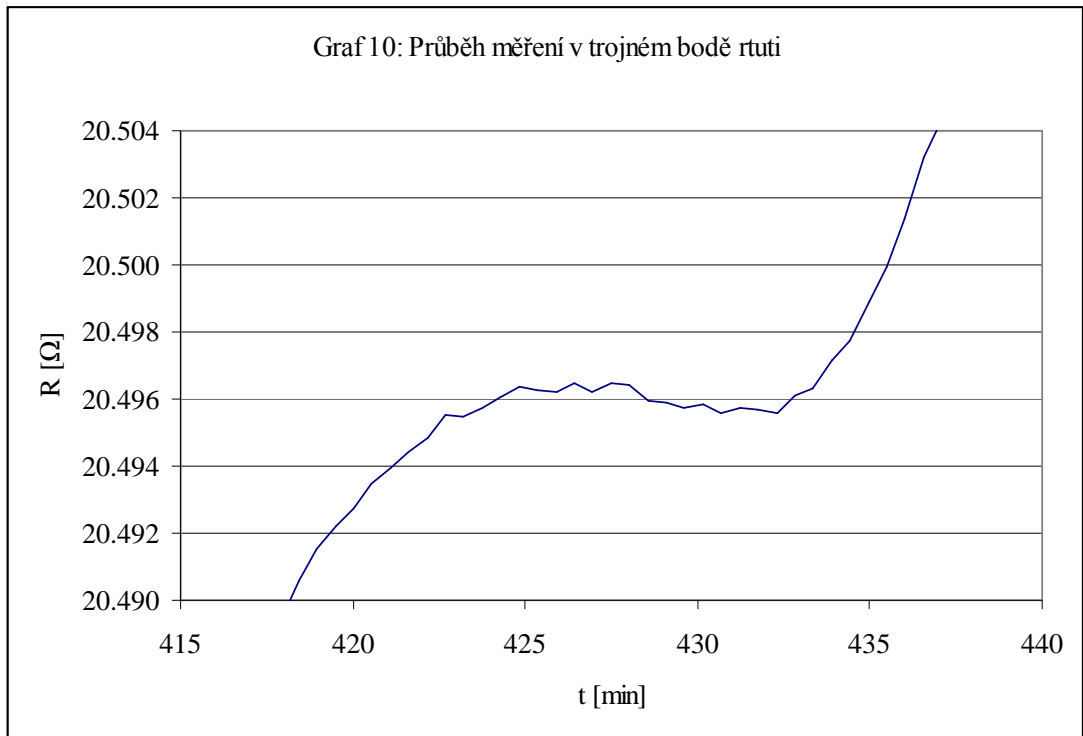
Tepelný kontakt mezi teploměrem a trojným bodem byl opět zajišťován etanolem.

4.2 Výsledky měření trojného bodu rtuti

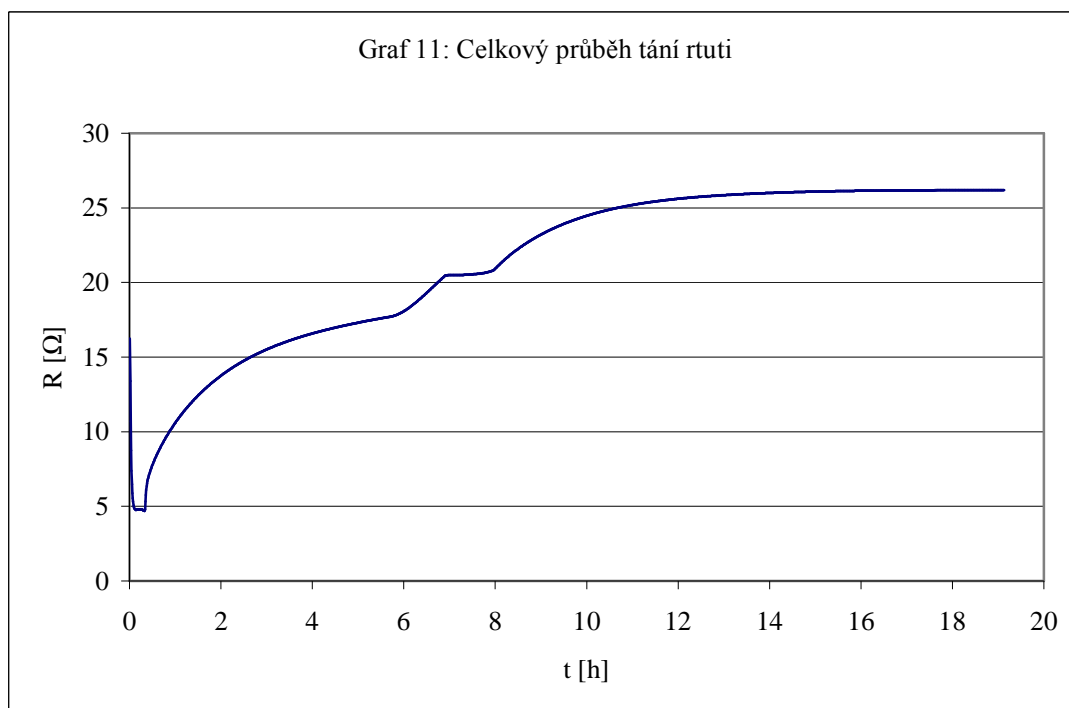
V trojném bodě rtuti bylo provedeno čtrnáct měření, opět při dvou různých polaritách proudu. Zjištěné hodnoty odporu jsou uvedeny v tabulce 5. Nejdelší prodlevy systému při stálé teplotě bylo dosaženo obalením ochlazené buňky polyuretanovým pláštěm a následným umístěním do Dewarovy nádoby, a to cca 10 min. Toto měření je v tabulce 5 označeno * a jeho průběh je zobrazen v grafu 10. Vzhledem k této nestálosti jsou hodnoty v tabulce 5 považovány za orientační.

kladná polarita				
I [mA]	R [Ω]			
1	20.51	20.47	20.52	20.53
	29.496*	20.505	20.485	20.47
záporná polarita				
I [mA]	R [Ω]			
-1	20.49	20.51	20.48	20.47
	20.46	20.47		

Tab. 5: Měření v trojném bodě rtuti



Celkový průběh tání, jehož hlavní část byla předmětem grafu 10, je zobrazen v grafu 11. Změny v tendenci růstu odporu teploměru jsou patrné už cca hodinu před samotným fázovým přechodem, kdy dochází k náhlé akceleraci zahřívání rtuti. Následuje řádově minutová oblast stálé hodnoty, poté odpor cca hodinu mírně konvexně roste (změní se přibližně o $0,3 \Omega$). V závěrečné fázi odpor narůstá opět konkávně jako v počáteční fázi zahřívání. Poloha inflexního bodu naměřených časových závislostí odporu platinového teploměru je obtížně určitelná.



Při této úrovni neurčitosti měření dochází k překrývání hodnot odporu odpovídajících kladné a záporné polaritě, což znemožňuje posouzení vlivu termoelektrického napětí. Výsledná, orientační hodnota odporu platinového teploměru odpovídající teplotě trojného bodu rtuti byla určena jako průměr všech hodnot uvedených v tabulce 5, tedy $R = 20,49 \Omega$.

4.3 Závěry měření trojného bodu rtuti

Byl navržen vhodný způsob tepelné izolace buňky pro realizaci trojného bodu rtuti, a to kombinace polyuretanového obalu a Dewarovy nádoby. Takto zajištěná ochlazená (na cca 77 K) buňka dosáhne teploty trojného bodu rtuti za přibližně 6 hodin.

Hladina tání rtuti je značně deformovaná, což svědčí o přítomnosti nečistot v měřeném vzorku.

Vzhledem k velké neurčitosti měření je charakter všech uváděných hodnot pouze orientační a neumožňuje posouzení vlivu termoelektrického napětí.

Přibližná hodnota odporu platinového odporového teploměru příslušná teplotě trojného bodu rtuti byla určena jako $R = 20,49 \Omega$.

5. Závěr

V podmínkách fyzikálního praktika byly realizovány tři pevné body Mezinárodní teplotní stupnice ITS-90, trojný bod vody, bod tání gallia a trojný bod rtuti. Byla navržena nejvhodnější metoda jejich dosažení a diskutovány okolnosti ovlivňující přesnost měření. Hodnoty odporu platinového odporového teploměru Tinsley při teplotách těchto pevných bodů jsou rekapitulovány v tabulce 6.

pevný bod	T [K]	R [Ω]
trojný bod vody	273.16	23.6720 ± 0.0008
bod tání gallia	302.9146	26.9186 ± 0.0008
trojný bod rtuti	234.3156	20.49

Tab. 6: Odpor teploměru Tinsley při teplotách realizovaných pevných bodů

Podle vztahu (10) byla určena velikost číselného faktoru $W(302,9146) = 1,13715$, což vyhovuje požadavku (8) kladenému na kalibrační teploměr. Splnění tohoto kritéria také zaručuje výrobce [11].

Podmínka (9) kladená na kalibrační teploměr v oboru teplot mezi trojnými body vody a rtuti není splněna, avšak tu už výrobce teploměru nezaručuje. Velikost příslušného číselného faktoru je $W(234,3156) = 0,86558$.

Měření je provázáno přítomností termoelektrického napětí. Jeho velikost při teplotě trojného bodu vody byla určena jako $U_{TE} = 1,2 \cdot 10^{-6}$ V. Při teplotě tání gallia je neznatelné a jeho vyčíslení při teplotě trojného bodu rtuti znemožnila vysoká neurčitost měření.

Lepších výsledků nejen v tomto ohledu by mělo být dosaženo při použití rtuti vyšší čistoty.

Literatura

- [1] Holejšovský L. (2006): Kalibrace odporových termometrů nízkých teplot, diplomová práce
- [2] Chandler D. (1987): Introduction to Modern Statistical Mechanics. Oxford University Press, New York
- [3] Obdržálek J., Vaněk A. (2000): Termodynamika a molekulová fyzika. UJEP, Ústí nad Labem
- [4] Quinn T. J. (1990): Temperature. Academic Press, London
- [5] Sostmann H. J.: Fundamentals of Thermometry, www.its-90.com
- [6] Bureau International des Poids et Mesures: Supplementary Information for the International Temperature Scale of 1990
- [7] Comité International de Thermométrie: The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90). Imprimerie Durand, Luisant
- [8] www.hartscientific.com
- [9] www.its-90.com
- [10] www.npl.co.uk
- [11] www.tinsley.co.uk
- [12] http://physics.ujep.cz/~mvarady/lecture_notes.html