

Experimenty se systémem Vernier

Podchlazená kapalina



Petr Kácovský, KDF MFF UK

Tyto experimenty vznikly v rámci diplomové práce „Využívání dataloggerů ve výuce fyziky“, obhájené v květnu 2012 na MFF UK v Praze.

Materiály je možné volně používat pro výukové účely.

5.5 Podchlazená kapalina

5.5.1 Provedení a zpracování měření

Anotace: Cílem experimentu je ukázat závislost teploty na čase při tuhnutí penta-hydrátu thiosíranu sodného.

Klíčové kompetence ([1]):

Gymnaziální vzdělávání – Kompetence komunikativní:

- efektivně využívá moderní informační technologie

Očekávané výstupy ([1]):

Gymn. vzdělávání – Člověk a příroda – Fyzika – Fyzikální veličiny a jejich měření: Žák měří vybrané fyzikální veličiny vhodnými metodami, zpracuje a vyhodnotí výsledky měření.

Teoretický úvod:

Podchlazená kapalina je kapalina, která existuje v kapalném skupenství i při teplotě nižší než je její teplota tuhnutí (odtud přímo plyne, že tento jev nemohou vykazovat amorfní látky, které přesnou teplotu tuhnutí nemají). Tento stav je metastabilní a při působení rušivých podnětů (otřesy, nečistoty) se zvyšuje pravděpodobnost, že látka spontánně přejde do stabilnějšího stavu, tj. zkrystalizuje do pevného skupenství [26]. Při tomto přechodu se uvolňuje skupenské teplo, které látku ohřeje na její teplotu tuhnutí.

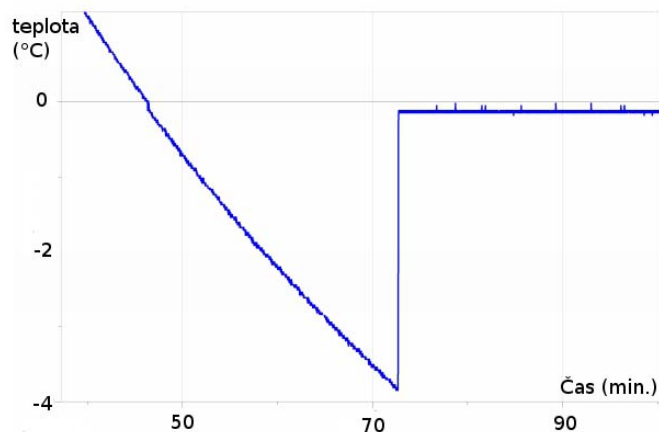
U většiny kapalin, vodu nevyjímaje, je běžně dosahované podchlazení nevýrazné. Přesto právě kapičky vody vyskytující se v mracích existují v kapalném skupenství i při teplotách hluboko (několik desítek stupňů Celsia) pod bodem mrazu [26]. U větších objemů je podchlazení méně hluboké, pouze v jednotkách stupňů. Takové podchlazení ukazuje graf na obr. 5.43 převzatý z práce účastníků Soustředění mladých fyziků a matematiků [27]. Experiment byl proveden s obyčejnou vodou, hlubšího podchlazení by se dalo dosáhnout s vodou destilovanou. Pro účely našeho měření použijeme namísto vody pentahydrát thiosíranu sodného, u něhož je podchlazení podstatně výraznější.

Další rozdíl oproti vodě je kvalitativní - necháme-li rozehřátý thiosíran přirozeně chladnout pod teplotu tuhnutí, nebývá návrat na tuto teplotu tak prudký a rychlý jako v případě vody. Zatímco z obrázku 5.43 je patrné, že voda se ohřála o 4 °C v řádu maximálně jednotek sekund, u thiosíranu může tento proces trvat i několik minut, není-li uměle urychlen například vhozením krystalu pevného thiosíranu.

Potřebné měřicí vybavení: Návod byl zpracován s čidlem teploty Vernier Go!Temp a programem Logger Pro. Alternativně lze užít tyto kombinace:

- místo programu Logger Pro program Logger Lite či rozhraní Vernier LabQuest
- místo čidla Go!Temp teplotní čidlo Vernier TMP-BTA s rozhraním Vernier Go!Link

Namísto rozhraní Go!Link lze vždy použít rozhraní LabQuest nebo LabQuest Mini.



Obrázek 5.43: Podchlazení vody o cca 4 °C.

Další pomůcky: pentahydrát thiosíranu sodného ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, dále často už je „thiosíran“; běžně dostupná chemikálie, orientační cena 100 Kč/kg, např. společnosti FICHEMA, Lach-Ner), laboratorní váhy, laboratorní stojan, tyčinka, lihový nebo plynový kahan, trojnožka, chemická síťka, dvě kádinky různých velikostí (cca 50 ml a 200 ml)

O teplotním čidle Vernier Go!Temp: Odolné čidlo se připojuje pomocí USB portu přímo k počítači a umožňuje měřit v teplotním rozsahu -20 °C až 110 °C . Přesnost měření je nejhůře $\pm 0,5\text{ °C}$. Vzhledem k chemické odolnosti ocelového těla umožňuje čidlo i měření teploty silně koncentrovaných kyselin a zásad.

Provedení měření:

Pomocí teplotního čidla proměříme vývoj teploty při tuhnutí roztaveného pentahydrátu thiosíranu sodného. (Experiment je inspirován podobným měřením v [28].)

1. Pomocí USB rozhraní připojte k počítači teplotní čidlo Vernier Go!Temp a vyčkejte na jeho automatickou detekci.
2. Klávesovou zkratkou CTRL+D vyvolejte okno *Sběr dat*, nastavte délku měření 1800 sekund a ponechte vzorkovací frekvenci 2 Hz. Potvrďte tlačítkem *Hotovo*.
3. Nyní odvažte na laboratorních vahách přibližně 20 g thiosíranu a nasypete jej do menší kádinky. Uspořádejte měření podle obrázku 5.44 - malá kádinka s pentahydrátem je umístěna do kahanem zahříváné vodní lázně a je do ní zavedeno teplotní čidlo Go!Temp.
4. Ve vodní lázni nechte v malé kádince roztavit pevný pentahydrát thiosíranu sodného. Jeho teplota tání je při normálním atmosférickém tlaku $48,3\text{ °C}$ (viz [29]).



Obrázek 5.44: Vážení pentahydrátu thiosíranu sodného, uspořádání při měření

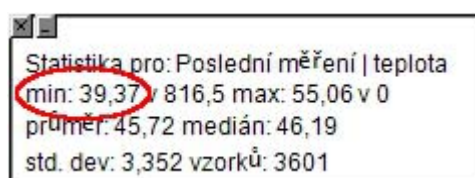
5. Je-li veškerý pevný thiosíran roztavený, ukončete zahřívání. Vodní lázeň bude ještě chvíli kapalný thiosíran zahřívát, proto vyčkejte, až se jeho teplota začne postupně samovolně snižovat. Při poklesu teploty na přibližně 55 °C spusťte tlačítkem *Zahájit sběr dat* měření.

6. Teplota postupně klesne pod teplotu tuhnutí thiosíranu, přestože ten zůstává stále kapalný. Prvním signálem tvorby krystalků pevného skupenství (obr. 5.46) je náhlý vzestup teploty v malé kádince. Tento vzestup je různě strmý (v závislosti na čistotě thiosíranu, čistotě zkumavky apod.), chcete-li jej urychlit, vhodte při prvních příznacích tuhnutí do malé kádinky několik krystalků pevného thiosíranu.

7. Po uplynutí nastaveného času se měření automaticky ukončí. Chcete-li při zobrazení grafu optimálně využít plochy obrazovky, klikněte na hlavním panelu na ikonu *Automatické měřítko*. Vzorová závislost byla naměřena bez vhození krystalků pevného thiosíranu a můžete si ji prohlédnout na obr. 5.47.

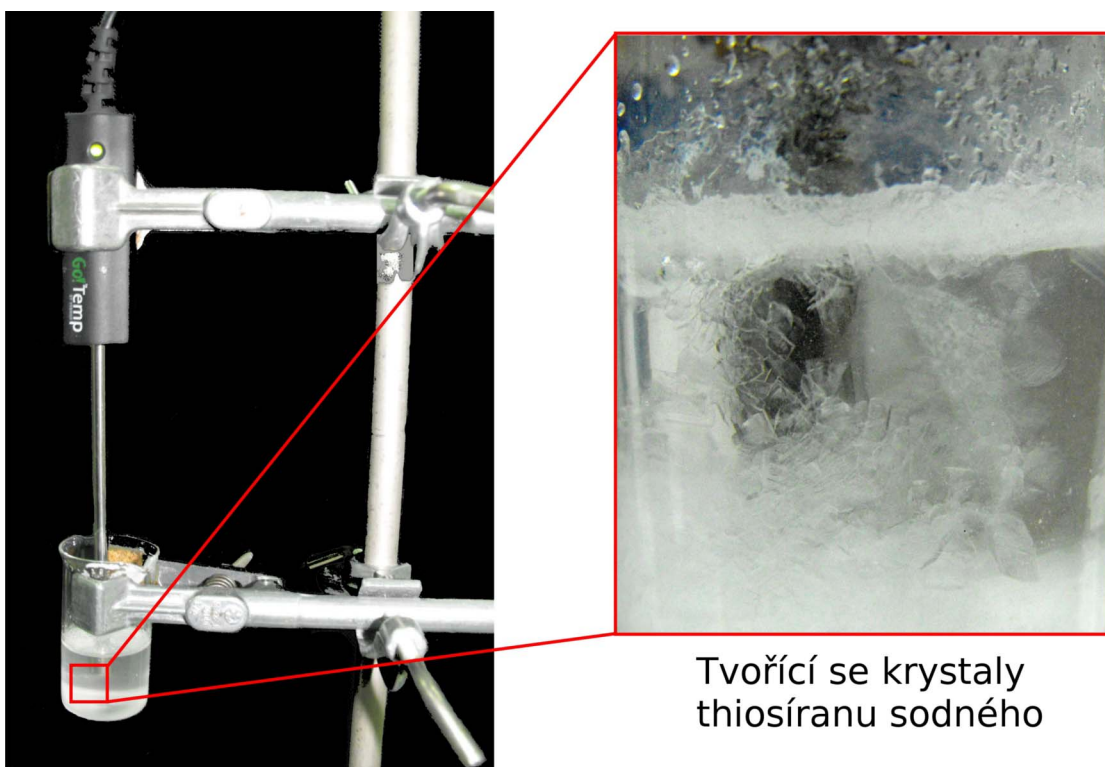
Zpracovaných naměřených dat:

1. Přirozeným výstupem měření je zjistit teplotu, na kterou se podařilo thiosíran podchladiť. K tomu využijeme nástroj *Statistika* na hlavním panelu (obr. 4.3).

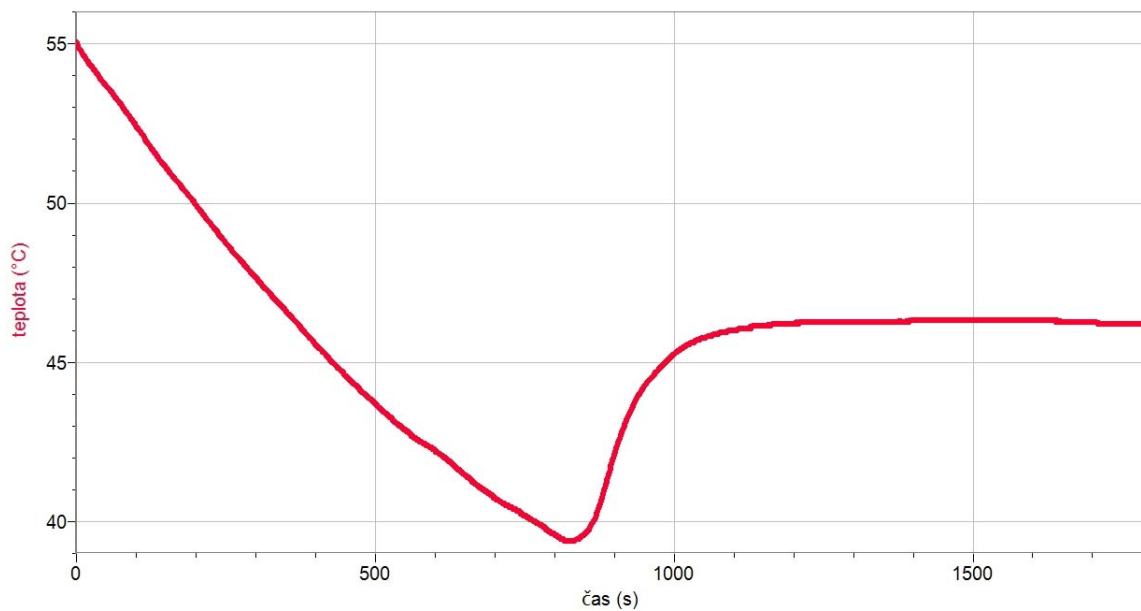


Po kliknutí na jeho ikonu se objeví okénko se základními statistickými údaji z měření (obr. 5.45), zajímá nás minimum. V případě vzorového měření byla minimální dosažená teplota 39,4 °C.

Obrázek 5.45: Min. teplota: 39,4 °C



Obrázek 5.46: Samovolné chladnutí thiosíranu, vznikající krystalky



Obrázek 5.47: Ukázka naměřené závislosti

2. Stejně tak můžeme odečíst teplotu, kterou dosáhla látka po krystalizaci - vyberte na hlavním panelu nástroj *Odečít hodnot* a najedte kurzorem na příslušnou teplotu. V novém okénku vlevo nahoře odečtete hodnotu.

5.5.2 Poznámky, otázky a úkoly

Příprava experimentu

- Je vhodné použít při měření skutečně čisté kádinky.

Během měření

- Dosažená hloubka podchlazení thiosíranu velice závisí na jeho čistotě a také na čistotě kádinky, event. samotného teplotního čidla. Libovolné nečistoty mohou sloužit jako krystalizační jádra a vliv podchlazení tak výrazně snížit. Pravdou ale je, že pro pentyhydrát thiosíranu sodného je tento jev tak silný, že měřitelné podchlazení zaznamenáte i za ne zcela ideálních podmínek.
- Klesá-li teplota pod 30 °C a látka stále nejeví známky tuhnutí, je vhodné přibližně 5 minut před nastaveným koncem měření tuhnutí uměle iniciovat vhozením krystalků pevného thiosíranu. V opačném případě by čas nastavený na vodorovné ose nemusel stačit k tomu, abychom děj, který chceme zkoumat, zaznamenali. (Nechcete-li být nastavenou dobou měření vázání, můžete v okně *Sběr dat* zaškrtnout možnost *Nepřerušovaný sběr dat*, která vám umožní měřit bez pevně nastavené doby měření až do chvíle, kdy měření sami ukončíte. Stále jste ale limitováni délkou vyučovací hodiny.)

Po skončení měření

- Po skončení měření zůstává v malé kádince ztuhlý pevný thiosíran. Vzhledem k jeho poměrně nízké teplotě tuhnutí stačí takovou zkumavku vymýt horkou vodou z kohoutku a vylít do umyvadla. Stejně tak lze kádinku znovu zahřát, nicméně jednou použitý thiosíran se již pro další měření ukázal jako bezcenný - ani při vyšších teplotách z něj po roztavení nevymizela pevná „vlákna“, představující výrazné nehomogenity.

Otázky a úkoly pro studenty

1. Určete minimální teplotu, na kterou se vám podařilo thiosíran podchládit.
⇒ Viz část *Zpracování naměřených dat*.
2. Určete teplotu tuhnutí použitého vzorku thiosíranu.
⇒ Viz část *Zpracování naměřených dat*, získaná hodnota 46,3 °C je o dva stupně nižší než tabulkový údaj. Tento poměrně výrazný rozdíl vedl k opakovanému proměření závislosti a těmto závěrům:

- Při iniciaci krystalizace vhozením krystalku pevného thiosíranu teplota látky za 10 až 15 sekund vystoupila vždy na přibližně 48 °C, tedy na teplotu, jež se v rámci chyby shoduje s udávanou teplotou tuhnutí použitého penta hydrátu.
- Bez iniciace krystalkem pevného thiosíranu (tj. i v případě vzorově naměřené závislosti) docházelo k růstu teploty velmi pozvolna, řádově několik minut; v některých částech zkumavky se již vytvořila pevná fáze, v jiných zůstávala látka dlouho kapalná. Z devíti provedených měření teplota nikdy nevystoupila nad 46,5 °C, pouze dvakrát se dostala nad hranici 46 °C, jedenkrát zůstala dokonce pod hranicí 42 °C. Tyto průběhy tedy neodpovídají ději velmi rychlé krystalizace, jak ji popisují učebnice, látka uvolňuje skupenské teplo tuhnutí pozvolna. Toto teplo je pak okamžitě odebráno okolním vzduchem, proto teplota látky nikdy nevystoupí na očekávaných 48,3 °C. Ve vzorovém měření navíc vidíme, že ani po dosažení zmíněné teploty 46,3 °C nedochází k jejímu poklesu, který bychom očekávali v důsledku tepelné výměny s chladnějším okolím - látka musí tedy i nadále uvolňovat skupenské teplo tuhnutí, které ochlazování brání.

Tato práce si dala za cíl popsat způsob, jak podchlazení kapaliny předvést a didakticky využít, vysvětlení skutečnosti, že látka se chová při „rychlé“ krystalizaci jinak než při krystalizaci „pomalé“, přesahuje její rozsah.

3. Lze na základě naměřené závislosti rozhodnout, zda byl na konci měření (tj. v čase 30 minut) veškerý kapalný thiosíran přeměněn na pevnou látku?

↳ Tuto otázku lze samozřejmě použít pouze tehdy, má-li závěr naměřené závislosti charakter závěru grafu na obr. 5.47. Přihlédneme-li k odpovědi na předcházející otázku, lze v takovém případě velmi spolehlivě tvrdit, že nějaká část thiosíranu ještě zůstala i po třiceti minutách měření kapalná a její tuhnutí doprovázené odevzdáváním skupenského tepla způsobuje udržování teploty na hodnotách kolem 46 °C. Kdyby tomu tak nebylo, začala by látka poměrně rychle chladnout (v duchu poklesu během prvních přibližně 13 minut měření).

4. Znáte nějaké praktické využití podchlazených kapalin?

↳ Hřejivé polštářky, jejichž přikládání na tělo má zklidňující a uvolňující účinky zejména při bolestech hlavy, krku a šíjového svalstva, jsou naplněny octanem sodným, který má teplotu tání 58 °C. Díky výraznému podchlazení je ale tato látka i za pokojové teploty kapalinou. Polštářky obsahují ohebný plíšek, jehož deformace vyvolá rychlou krystalizaci, uvolnění skupenského tepla tuhnutí a zahřátí polštářku na teplotu 58 °C. Polštářky lze opakovaně používat, opětovné zkapalnění octanu lehce zařídíte ponořením polštářku do horké vody.