

# **Středoškolská odborná činnost 2005/2006**

Obor 02 - Fyzika

## **Dvoufázový refrigerátor vysokých teplot**

Autoři:

**Antonín Hoskovec**

Gymnasium U Balvanu,

U Balvanu 16,

466 34 Jablonec nad Nisou,

septima

Konzultant práce:

**Mgr. Radka Procházková**

(Gymnasium U Balvanu,

Jablonec nad Nisou)

Zadavatel práce:

**Jablonec nad Nisou, 2006**

Liberecký kraj

opravená

Prohlašujeme tímto, že jsme soutěžní práci vypracovali samostatně pod vedením Mgr. Radky Procházkové a uvedli v seznamu literatury veškerou použitou literaturu a další informační zdroje včetně internetu.  
V Jablonci nad Nisou dne

---

vlastnoruční podpis autorů

## Obsah

<b>I) Úvod</b>	<b>3-5</b>
Úvod do práce	3
Historie a obecný úvod do kryotechniky	4-5
<b>II) Teorie</b>	<b>6-12</b>
Základní metody ochlazování vysokoteplotních kapalin	6-7
Chlazení s využitím výparného tepla kapalin	6
Chlazení využívající izoentropické expanze plynu konajícího vnější práci	6
Chlazení využívající izoentropické expanze plynu konajícího vnitřní práci	7
Základní metody dosahování velmi nízkých teplot kapalin	8-12
Odsávání horkých par nad hladinou	8
Rozpouštění $^3\text{He}$ v $^4\text{He}$	9
Krystalizace $^3\text{He}$	10
Adiabatická demagnetizace paramagnetických solí	11
Jaderná adiabatická demagnetizace	11
Porovnání	12
<b>III) Metodika</b>	<b>13-20</b>
Návrh konstrukce nádob	13-14
Kompresor a jeho připojení	14-15
Měřicí komponenty (teploty, tlaku a objemu)	15-16
Pracovní látka	16-17
Řízení počítačem	17-20
<b>IV) Abstrakt</b>	<b>21</b>
<b>V) Pokus</b>	<b>22-24</b>
Kalibrace teploměru	22
První spuštění	22-23
Druhé spuštění	23-24
<b>VI) Výsledky a zpracování</b>	<b>25-26</b>
První měření	25
Druhé měření	25-26
<b>VII) Vyhodnocení, diskuze</b>	<b>27-30</b>
Zhodnocení postupů	27-28
Rozebrání výsledků	28-30
<b>VIII) Závěr</b>	<b>31</b>
<b>IX) Použitá literatura</b>	<b>32</b>
<b>X) Seznam zkratk</b>	<b>32</b>
<b>XI) Přílohy</b>	<b>33-38</b>
Příloha A	33-36
Příloha B	36-38
Příloha C	38
Příloha D	38-41

## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval paní profesorce Radce Procházkové, která mě celou dobu ochotně a nezištně podporovala svými radami a zkušenostmi a velkou měrou tak napomohla k úspěšnému dokončení práce.

Další poděkování patří škole za poskytnutý příspěvek na tlakoměr, který mi ulehčil finanční stránku věci a za poskytnuté prostory k výkonu experimentů.

## Úvod

Při studiu fyziky nízkých teplot jsem narazil na metodu ochlazování kapaliny s využitím odsávání horkých par z jejího povrchu. Při podrobnějším zkoumání se ukázalo, že je využívána pouze při ochlazování kapalin na teploty blízké nule, případně jako předposlední stupeň ochlazování. Zároveň jsem zjistil, že její účinnost je skutečně vysoká a napadlo mě, že i když se v oblasti vysokých teplot používají metody založené na podobném principu, její přínos do této oblasti by mohl být při nejmenším užitečný. Rozhodl jsem se tedy prozkoumat přínos jejího případného rozšíření i do teplot kolem 273 K blíže nejprve teoreticky. Po rozsáhlém bádání v knihovnách jsem zjistil, že metoda je skutečně využívána pouze v oblasti nízkých teplot, ale že teoretická účinnost se s výchozí teplotou nemění. Zároveň teoretické úvahy potvrdily jednu výsadní vlastnost odpařovacího refrigerátoru oproti ostatním, totiž že chladicí výkon roste úměrně s velikostí refrigerátoru. Na první pohled nejde o vlastnost nijak zajímavou, uvědomíme-li si ale co by mohla znamenat, metoda se stává atraktivnější, teoreticky by bylo možné tímto způsobem ochladit i obrovská množství kapaliny, čistě ilustrativně, s dostatečně výkonnými kompresory, vývěvami či jiným dekompresním zařízením by bylo možné ochladit celou přehradu vody naráz. Dalším zajímavým důvodem pro pokračování k praktickému prozkoumání je rozsáhlost použití chladících zařízení v moderní společnosti, i kdyby posun metody poskytnul jen částečné výhody oproti stávajícím metodám, jistojistě by našel využití.

Finální rozhodnutí padlo, rozhodl jsem se vypracovat komplexní projekt detailně prozkoumávající použití dvoufázového odpařovacího refrigerátoru v oblasti kolem 273 K jak teoretickým rozebráním a zpracováním pozadí problému, tak konstrukcí zařízení fungujícího na uvedeném principu, ve kterém by se snoubily postupy moderních laboratoří a preciznost s pečlivě propracovanou konstrukcí. A podložit tak výsledky teoretických úvah praxí a zároveň navrhnout základní konstrukci pro budoucí zařízení využívajících stejný princip. Práce na projektu jsem započal v srpnu 2005 a trvaly přes 9 měsíců.

## Historie a obecný úvod do kryotechniky

Od doby prvních objevů supravodivosti, supratekutosti a dalších kvantových jevů se vžil axiom, že pokud se ve vesmíru vyskytne teplota nižší než 2,76 K (záření černého tělesa), musí v tomto prostoru existovat inteligentní život, neboť snižování teploty vůči okolí není samovolný ani jednoduchý proces. Prvotní experimenty se snižováním teploty vedly k objevu a rozvoji kvantové mechaniky, která jediná dokázala vysvětlit zvláštnosti, ke kterým v teplotách blízkým nule dochází a tím i rozvoje fyziky vysokých teplot a moderní vědy obecně.

První vlašťovku do oboru chlazení vyslal Francouz Cullen r. 1775 sestrojením prvního přístroje na tvorbu ledu. Avšak další pokusy i takových vědců jako byl Faraday o zkapalňování „permanentních“ plynů nevedly k úspěchu po více než půl století do objevu kritické teploty 1869 Andrewsem. Roku 1853 dal potom pokusům nový impuls objev J-T jevu a nakonec rok 1877, kdy Cailletet ve Francii a Pictet ve Švýcarsku nezávisle na sobě poprvé v historii lidstva zkapalnili izoentropickou expanzí kyslík (ovšem pouze jako mlhovinu). Po několika letech věda slavila další úspěch, zkapalnění dusíku a kyslíku s viditelnou hladinou na univerzitě v Krakově. Následoval hon za kapalným vodíkem. Tatáž laboratoř o rok později ohlásila vytvoření mlhoviny vodíku, což už byl jen krůček k roku 1898, kdy se proslavil J. Dewar zkapalněním  $H_2$  do celistvé podoby a jeho uchováním v tzv. Dewarově nádobě. Zbýval poslední nepoddajný plyn, helium. Kvantová fyzika si navždy bude pamatovat rok 1908 a H. Kamerlingh-Onnese, který vyhrál závod s Dewarovou laboratoří a připravil jako první kapalně helium. Přitom on sám si nejprve myslel, že neuspěl, neboť při experimentu nebylo jasně vidět hladinu kapaliny, s překvapením ale zjistil, že to způsobil tenký film  $^4He$  po celém povrchu nádoby, zapříčiněný jeho supratekutostí. Následné desítky let znamenaly obrovský rozvoj velkých aparatur pro zkapalňování vzduchu, téměř všechny laboratoře na univerzitách vlastnily svůj refrigerátor. Až do nedávné doby laboratoře závodily v dosahování opravdu nízkých teplot. Nejrozvinutější původní metodou se stalo odsávání horkých par z povrchu kapaliny, tou se dařilo a daří dosahovat pro  $^3He$  0,3 K. Další v řadě byla demagnetizace látek s nenulovým magnetickým momentem, do r. 1972 byla nejnižší takto dosažená teplota 2 mK. Roku 1975 si Ústav jaderné fyziky ČSAV na několik let přivlastnil prvenství v oboru dosažením rekordních 0,5 mK použitím magneticky zředěných látek při demagnetizaci. S tím se ovšem svět nespokojil a rozvoj desítek metod chlazení následoval. Jadernou demagnetizací byl potom dosažen absolutní rekord, spinové teploty 50 nK dosáhl Lounasmaa ve Finsku. Je ale vhodné poznamenat, že se skutečně jedná pouze o teplotu spinovou, praktická teplota krystalové mřížky dosahuje  $10^{-3}$  až  $10^{-5}$  K.

Aplikace kryotechniky nebo chladicí techniky obecně je neskutečně rozsáhlá, zasahuje do nepřehledného množství oborů lidské činnosti.

V biologii, medicíně a lékařství se chlazení využívá pro uchovávání tkání, transplantátů, virových kmenů... více informací lze nalézt např. v \*1. Speciálním využitím jsou potom zařízení pro lokální destrukci tkáně prudkým ochlazením, takzvané kryokautery, které mají velmi rozsáhlé použití v několika oborech medicíny, např. optice, lící chirurgii..., neboť zákroky jsou nebolestivé a nekrvavé, zde odkazují na lit. \*2 a \*3. V medicíně se začíná využívat i supravodivých magnetů pro lokální ozařování nebo navádění katetrů v krevním řečišti... jejichž existence by bez kryotechniky nebyla možná.

I veterináři zná využití kryooblastí, používá se jich například pro uchování spermatu před oplodněním i po dobu několika let.

V potravinářství \*4 lze rychlým ponořením do  $LN_2$  uchovat potraviny i jejich vůni a chuť.

Strojírenství a hutnictví \*4, \*5 spotřebuje každoročně obrovská množství kryokapalin jako  $O_2$ ,  $H_2$ ,  $N_2$ , Ar, Ne a jejich směsí na výrobu, zušlechťování, sváření a řezání oceli.

Obrovské využití nabízí elektrotechnika \*2, \*4, \*5, \*6, \*7. Zde se využívá ochlazení vodičů ke snížení jejich odporů a tím ztrátám a šumům na vedení. Moderní supravodiče

umožňují stavbu magnetů \*8, \*9, \*10, \*11, které jsou schopny vytvořit magnetické pole o indukci až 18 T, hybridní magnety potom dokonce 30 T. Magnety najdou široké využití v medicíně (magnetická rezonance) i v technice, například vlaky pohybující se rychlostí až 500 km.h<sup>-1</sup> na magnetickém polštáři, v jaderné fyzice se jich využívá pro stavbu obřích urychlovačů (např. stavěný urychlovač CERNu pod Alpami).

V energetice se supravodičů využívá k tvorbě super výkonných vedení a pracuje se na výzkumu jaderné fúze založené na principu udržení reakce supravodivými solenoidy. Magnety umožňují využití jako nesmírně kvalitních akumulátorů energie \*8, \*9, dále supravodiče umožňují stavbu jednoduchých točivých strojů jako čerpadel, motorů... V telekomunikaci supravodiče snižují šum a zvyšují čistotu vysílání a přijímání signálu \*9.

V raketové a kosmické technice\*2 se kryokapalin používá jako paliv (LH<sub>2</sub>) i jako dalších podpůrných látek nejen k testování vlivů nízkých teplot na techniku.

#### Seznam vyhledané literatury:

- \*1 Puškar, N. S. - Belous, A. M.: Vvedenje v kriobiologiju, Kijev, 1975
- \*2 Bailey, C. A.: Advanced Cryogenics, London, 1971
- \*3 Von Leden, H. - Cahan, W. G.: Cryogenics in Surgery, New York, 1971
- \*4 Sittig, M.: Cryogenics, Research and Applications, New Jersey, 1963
- \*5 Fastovskij, V. G. - Petrovskij, Ju. V. - Rovinskij, A. E.: Krijogennaja tehnika, Moskva, 1974
- \*6 Mc Clintock, M.: Cryogenics, 1964
- \*7 Haselden, G.G.: Cryogenic Fundamentals, 1971
- \*8 Cesnak, L.: Využitie supravodivosti vo vede a v technike, 1976
- \*9 Newhouse, V.L.: Applied Superconductivity, 1975
- \*10 Buckel, W.: Supraleitung, 1972
- \*11 Brechna, H.: Superconducting Magnet Systems, 1973

# Základní metody ochlazování vysokoteplotních kapalin

## Chlazení s využitím výparného tepla kapalin

Tuto metodu všichni dobře znají z domácích chladniček. Jedná se o velmi jednoduchý princip, látka, která má teplotu varu o něco nižší než je požadovaná teplota a zároveň má velké výparné teplo (u chladniček např. freony, třeba freon 12 -  $\text{CCl}_2\text{F}_2$  s teplotou varu 243K).

Při popisu cirkulace pracovní látky začneme v prvním výměníku, kde je plyn stlačen kompresorem dost, aby přešel do kapalného skupenství. Při kompresi je kompresní teplo odebíráno chlazením (vzduchem, vodou...), takže ochlazený a stlačený plyn se dostane pod svou mezní křivku a v kondenzačním zařízení se přemění na kapalinu. Ta je dále vstřikována do výparníku (zde je požadovaná teplota), ve kterém je kompresorem snížen tlak, takže se opět vypaří a odebere tak teplo okolí, odtud je plyn veden do 1. výměníku, kde... atd. Často se při zkapaňování plynů využívá kaskádního řazení několika stupňů, jelikož teplota dosažitelná s jednou látkou je značně limitována.

**Efektivita metody:** Účinnost zařízení dosahuje 60 až 80% Carnotova cyklu. Při jednostupňovém chlazení nelze touto metodou dosáhnout teplot nižších než 200K. Při kaskádním řazení bez použití dalších metod, jako J-T ventilu, lze dosáhnout maximálně asi 60K. Přičemž v chladničkách je dosahováno asi  $-20^\circ\text{C}$  a v mrazicích boxech asi  $-50^\circ\text{C}$ .

## Chlazení využívající izoentropické expanze plynu konajícího vnější práci

Představme si nádobu, v níž molekuly plynu narážejí na pevné stěny, soustava je izolována od okolí. Nic se neděje. Ale co kdyby byla jedna stěna pohyblivá a molekuly by při nárazu na ni konaly práci jejím posuvem? Soustava by byla stále izolována od okolí (děj by byl izoentropický i adiabatický) a tudíž by plyn nepřijímal teplo. V takovém případě by se molekuly od stěn odrážely s menší rychlostí než do ní narážely, jinak řečeno konáním vnější práce by se plyn ochladil. Výslednou teplotu při takové expanzi lze určit ze vztahu:

$$T_2 = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{(\kappa-1)/\kappa}$$

Kde  $T_2$  je výsledná teplota a  $\kappa$  je známá Poissonova konstanta. Pro ideální plyn expandující z tlaku  $p$  a teploty  $T = 273\text{K}$  do atmosférického lze pro ilustraci uvést tabulku výsledných teplot:

Výchozí tlak $p$ (MPa)	0,2	0,5	1	5	10
Koncová teplota $T$ (K)	240	184	152	96	78

Ve vyšších teplotách je účinnost vyšší než u J-T ventilu, ale v teplotách blízkých se nule se obě účinnosti blíží a ještě blíže nule je dokonce J-T ventil efektivnější. Například při expanzi plynu z 20 Mpa na 0,5 Mpa při počáteční teplotě 200K lze teoreticky dosáhnout 100K, v praxi potom 150K, přičemž J-T ventilem jen asi 167K. Velkým konstrukčním problémem jsou písty, které se jen obtížně konstruují, neboť maziva při nízkých teplotách zamrzají. Jako jedno z řešení uvádím malou šterbinu ( $10^{-3}$  mm), kterou skoro neuniká plyn a zároveň umožňuje hladký skluz za podmínky, že píst je pečlivě vycentrován. První nejjednodušší stroj využívající tohoto principu sestrojil r. 1902 G.Claude pro zkapaňování vzduchu, potom co si všimnul, že kůže si zachovává určitou pružnost i při nízkých teplotách a použil ji v pístu. První He takto zkapaňoval 1934 P. Kapica, jeho stroj se používal ještě přes deset let; v roce 1939 sestrojil expanzní turbínu.

**Efektivita metody:** Efektivita této metody je značná, neboť krom vysoké účinnosti je velkou výhodou její rychlost, díky které nedojde k přílišnému přenosu tepla. A jak jsem již zmínil, v porovnání s J-T ventilem je její účinnost až na teploty u nuly vyšší.



## Chlazení využívající izoentalpické expanze plynu konajícího vnitřní práci

Chování ideálního plynu (částice považujeme za hmotné body bez objemu vzájemně se neovlivňující) popisuje stavová rovnice:

$$pV = nRT$$

Kde R je univerzální plynová konstanta. Pokud ovšem nezanedbáme objem a vzájemné působení částic, platí van der Waalsova rovnice:

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = nRT$$

Kde a a b představují korekce nenulového silového působení a objemu molekul.

Ideální plyn by při průchodu ventilem svou teplotu nezměnil, ale reálné plyny při průchodu přes ventil nebo porézní ucpávku mění svou teplotu konáním vnitřní práce (teplota se buď zvyšuje nebo snižuje). Tento jev nazýváme Jouleovým-Thomsonovým, zkráceně J-T jevem. Podle toho jestli teplota klesá nebo se zvyšuje, je znaménko J-T jevu kladné nebo záporné. Jeden plyn může mít za různých teplot a tlaků různá znaménka. Teplota při níž se znaménko obrací se nazývá inverzní teplota a plyn se při expanzi chová jako ideální. Jelikož většina kryokapalin má za normálních teplot záporné J-T znaménko, je nutné je předchladit pod inverzní teplotu jinou metodou či jiným plynem. Příklad konkrétní konstrukce je zkapařovač z r. 1805 navržený Carlem von Lindem.

**Efektivita metody:** Je podobná jako u izoentropické expanze plynu konajícího vnější práci. Pouze u teplot blízkých nule je její účinnost vyšší a je spíše využívána.

### Některé nové metody ochlazování:

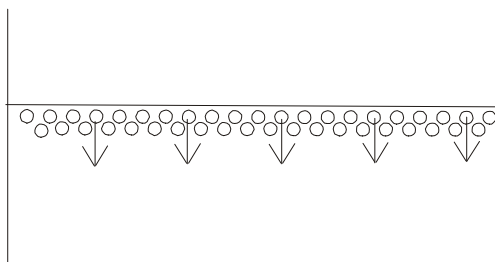
- Vírový He refrigerátor
- Dielektrický refrigerátor
- Magnetický refrigerátor
- Sublimační refrigerátor
- Desorpční refrigerátor
- Termoelektrický a termomagnetický refrigerátor
- Vírová trubice
- Stirlingův refrigerátor
- Giffordův - McMahonův refrigerátor
- Vuilleumierův refrigerátor

## Základní metody dosahování velmi nízkých teplot kapalin

### Odsávání horkých par nad hladinou

Metoda je založena na známém faktu, že teplota varu kapalin klesá se snižujícím se tlakem a zároveň na tom, že pozici u hladiny zaujímají pouze nejteplejší částice kapaliny.

Podíváme-li se zblízka na povrch kapaliny, zjistíme, že do vrstvy těsně u hladiny (přibližně dvoumolekulové) se dostanou pouze ty molekuly, jejichž celková energie je vyšší než průměrná, to vyplývá z následujícího obrázku :



Uvnitř kapaliny se přitažlivé mezimolekulové síly působící v kapalině navzájem vyruší, tato rovnováha je ovšem narušena u hladiny, kde výslednice přitažlivých sil logicky směřuje dovnitř (viz. obrázek). Z toho vyplývá, že molekuly na povrchu mají celkovou energii vyšší než okolní právě o potenciální způsobenou přitažlivými silami. To způsobuje, že při přechodu na hladinu se část kinetické energie molekuly přemění právě na tuto polohovou. Na přechod mají tudíž dostatek energie pouze nejteplejší (nejrychlejší) částice kapaliny.

Dále si musíme uvědomit, že snížením okolního tlaku plynů usnadníme fázový přechod částic u hladiny, neboť s tlakem se sníží hustota okolních plynných částic a molekuly na povrchu budou „vytrhávány“ do volného prostoru. Zároveň však platí, že k fázovému přechodu je potřebná energie určená měrným skupenským teplem varu.

Takže, čeho docílíme odsáváním par z povrchu kapaliny? Nejteplejší částice na hladině, které ale samy o sobě nemají dostatek energie k fázovému přechodu, se budou rychleji odpařovat odebírajíce potřebnou latentní energii zbylým molekulám.

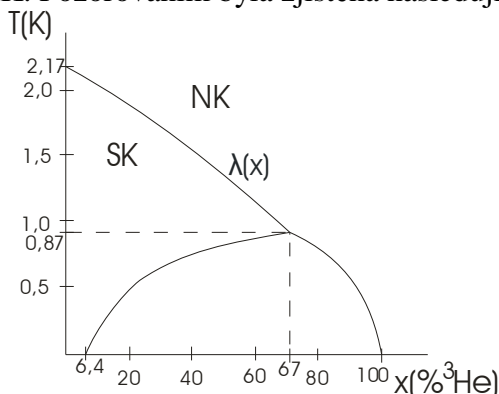
Tím docílíme odčerpání nejteplejších částic z kapaliny a navíc snížení energie zbylých molekul, což má za následek ochlazení zbylé kapaliny.

Tyto refrigerátory se obvykle skládají z nádoby naplněné kapalinou a difúzní či rotační vývěvy pro odsávání par. Speciálním případem je potom refrigerátor He využívající kromě vypařování k ochlazení i rozpouštění  $^3\text{He}$  v  $^4\text{He}$ .

**Efektivita metody:** Je logické, že při odsávání je čím dál méně molekul, které mají dostatečnou energii k průchodu fázovým rozhraním, proto chladící účinnost děje značně klesá se snižováním tlaku na nízkou hodnotu. V praxi se tato metoda využívá hlavně pro  $^4\text{He}$  a  $^3\text{He}$ , pro  $^3\text{He}$  lze dosáhnout až 0,21 K. Komerčně vyráběnými refrigerátory lze dosáhnout přibližně 4,2 K. Graf chladícího výkonu viz. porovnání na konci kapitoly.

## Rozpuštění $^3\text{He}$ v $^4\text{He}$

$^3\text{He}$  narozdíl od  $^4\text{He}$  přechází do supratekutého stavu až pod teplotou 2,6 mK. Chování směsi několika izotopů většinou není rozdílné od chování jediné složky, avšak díky uvedenému rozdílu mezi  $^3\text{He}$  a  $^4\text{He}$  dochází u helia k zajímavému jevu, jehož využitím lze dosáhnout teplot až v řádu mK. Pozorováním byla zjištěna následující závislost:



Na grafu můžeme sledovat jak se mění teplota přechodu směsi do supratekutého stavu, kde tzv.  $\lambda$  čára dělí supratekutou (SK) složku od normální (NK). V závislosti na stoupající molární koncentraci  $^3\text{He}$  klesá teplota dle křivky  $\lambda(x)$  až do hodnoty 0,87 K, od které se směs začne separovat na supratekutou a na ní plovoucí nesupratekutou složku, kde nesupratekutá složka bude obsahovat hlavně  $^3\text{He}$  a supratekutá hlavně  $^4\text{He}$ . Z pozorování vlastností helia v separovaném stavu vyplývá, že existuje směšovací teplo fázového přechodu, které se dá využít k chlazení. Z grafu dále vyplývá, že i při absolutní nule neklesne koncentrace  $^3\text{He}$  v dolní supratekuté fázi pod 6,4%, což hraje velmi důležitou roli při fungování rozpouštěcího refrigerátoru.

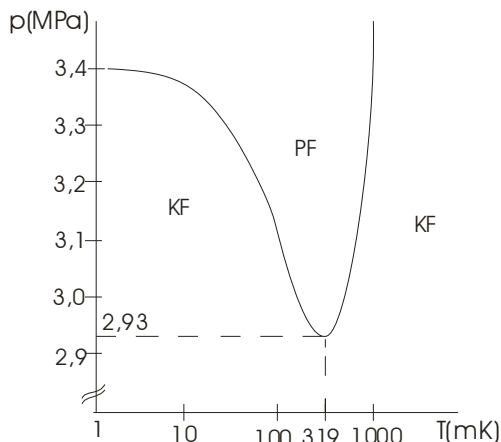
Lze zde použít analogie mezi vypařováním kapaliny a přechodu  $^3\text{He}$  do supratekuté fáze, neboť pro  $^3\text{He}$  je dolní fáze porézním prostředím. Rozpuštěním 1 molu  $^3\text{He}$  je absorbováno teplo  $\Delta Q = T \Delta S = T(S_Z - S_K) = k^*T^2$  kde  $S_Z$  a  $S_K$  jsou entropie zředěné a koncentrované fáze a  $k$  je pro 1 mol  $84 \text{ JK}^{-2}$  (rozměrová konstanta), jelikož  $S = 0$  pro supratekutou složku  $^4\text{He}$ , můžeme  $^4\text{He}$  ve výpočtu vynechat.

Refrigerátory se skládají z rozpouštěcí komory, velmi výkonných výměníků a dalších doplňků. Výměníky jsou využívány k předchlazení  $^3\text{He}$  na velmi nízké teploty (pod 1 K) před jeho rozpouštěním v  $^4\text{He}$ , proto musí být velmi účinné (i kvůli Kapicově jevu). Rozpuštěním  $^3\text{He}$  se látka ochladí, ale k plynulé cirkulaci je potřeba  $^3\text{He}$  ze směsi odčerpát a nechat ho opět ochladit, rozpustit atd., to se zajišťuje speciálně navrženým elektrickým ohříváčem, díky kterému se odpařuje pouze  $^3\text{He}$ , kdyby cirkulovalo i  $^4\text{He}$ , účinnost refrigerátoru by se značně snížila. Při konstrukci vyvstává řada velmi obtížných problémů, jako viskózní ohřev při kapilárním proudění  $^3\text{He}$ , nebo opravdu náročná tepelná izolace od okolí.

**Efektivita metody:** Kontinuálním provozem se podařilo dosáhnout až teploty 4,5 mK, jednorázovým ochlazením dokonce 3 mK. Komerčně vyráběnými zařízeními lze dosáhnout asi 7 mK. Velkou nevýhodou této metody je nutnost předchlazení helia na supernízké teploty, ale dá se jí dosáhnout až takto nízkých teplot.

## Krystalizace $^3\text{He}$

$^3\text{He}$  je velmi zvláštní látkou, to dokazuje další velmi neobvyklá vlastnost tohoto izotopu vyplývající z následujícího grafu:



Na něm je znázorněna křivka tání pevného  $^3\text{He}$ . U většiny látek snižováním teploty snižujeme také entropii, tzv. zvyšujeme uspořádanost, navíc u většiny látek je pevné skupenství stav charakteristický nižší entropií než kapalného. U  $^3\text{He}$ , jak je vidět z grafu, to platí do teploty 319 mK, kdy je tlak pro přivedení helia do pevného skupenství nejnižší, dále však tlak začíná nečekaně vzrůstat až do hodnoty 0,6 mK, kde je lokální maximum křivky tání  $^3\text{He}$ . Tzv. od hodnoty 319 mK do 0,6 mK je entropie kapalného skupenství nižší než pevného, neboli paradoxně je kapalné skupenství uspořádanější než pevné. To znamená, že při přechodu z kapalného do pevného skupenství nebude soustava teplo vyzařovat, ale přijímat, dojde k ochlazení. V oblasti 2 - 10 mK je chladicí výkon o řád vyšší, než u rozpouštění  $^3\text{He}$  v  $^4\text{He}$ .

První metodu využívající tohoto jevu navrhl Pomerančuk v r. 1953, přičemž uskutečněna byla r. 1964 Anufrijevem při dosažení 20 mK, 2 mK potom dosáhl Wheatley 1969.

Jednou z největších obtíží při využití této metody je, jak stlačit  $^3\text{He}$  jen s minimálním zahřátím, možné řešení je potopit tenkostěnnou nádobku  $^3\text{He}$  do lázně supratekutého  $^4\text{He}$ . Při kontaktu s teplotou nižší než 319 mK se v přívodní trubici  $^3\text{He}$  vytvoří zátka a poté už se jen zvýší tlak na 3,4 MPa, což způsobí krystalizaci  $^3\text{He}$  a jeho ochlazení. Musí se přitom dbát na to, aby se nepřeměnilo veškeré  $^3\text{He}$ , neboť třením krystalků o sebe by vznikalo nežádoucí teplo.

**Efektivita metody:** V praxi se touto metodou dosahuje dokonce teplot blížících se 1 mK, což je opravdu supernízká teplota. Velkou nevýhodou je, že helium se nejprve musí ochladit například v rozpouštěcím refrigerátoru a až potom se dá použít jeho paradoxu při krystalizaci a také to, že metoda je jednorázová nelze považovat za výhodu.

## Adiabatická demagnetizace paramagnetických solí

Snížení entropie zároveň se snižující se teplotou je vždy způsobeno poklesem fononového příspěvku úzce propojeného s tepelnými kmity mřížky, u kovů také poklesem S elektronového systému a u látek s nenulovým magnetickým momentem snížením spinové entropie. Potíže s naším nápadem činí právě fononový a elektronový příspěvek, neboť při teplotách pod 1 K je u většiny látek zanedbatelný. Objev Giaquea a Debye (1926), že existují některé paramagnetické soli s dostatečně vysokou entropií i při T pod 1 K a navíc, že jejich doposud neuspořádané elektronové spiny lze orientovat polem s menší indukcí než 1 T náš problém téměř vyřešil.

Při  $T_0 = 1$  K je celková entropie soustavy tvořena téměř pouze elektronovými spiny. Při magnetizaci látky dojde k orientaci spinů a tím k poklesu entropie, tzv. dojde k uspořádání. To má za následek uvolnění tepla, které se prostě odvede pryč. Potom po demagnetizaci nastane opět původní stav, ovšem s poklesem teploty na konečnou  $T_K$ . Nejběžnější látkou používanou pro adiabatickou demagnetizaci je  $\text{Ce}_2\text{Mg}_3(\text{NO}_3)_{12} \cdot 24\text{H}_2\text{O}$ , se kterým se běžně dosahuje až 2 mK. V této oblasti teplot se vykytuje řada interakcí, které často činily potíže při opětovné demagnetizaci, neboť se vytvořilo vnitřní efektivní magnetické pole, které demagnetizaci bránilo, to se v praxi řeší nahrazením některých jontů chemicky podobnými, ovšem s nulovým magnetickým momentem, čímž se dosáhne jakéhosi „zřídění“, které umožňuje dosažení ještě nižších teplot.

**Efektivita metody:** Velkou nevýhodou je jednorázovost metody, kvůli které byla v oblasti nad 10 mK nahrazena kontinuálními metodami, ovšem pro teploty běžně dosahované (až 0,5 mK) je to metoda doposud používaná a efektivní.

## Jaderná adiabatická demagnetizace

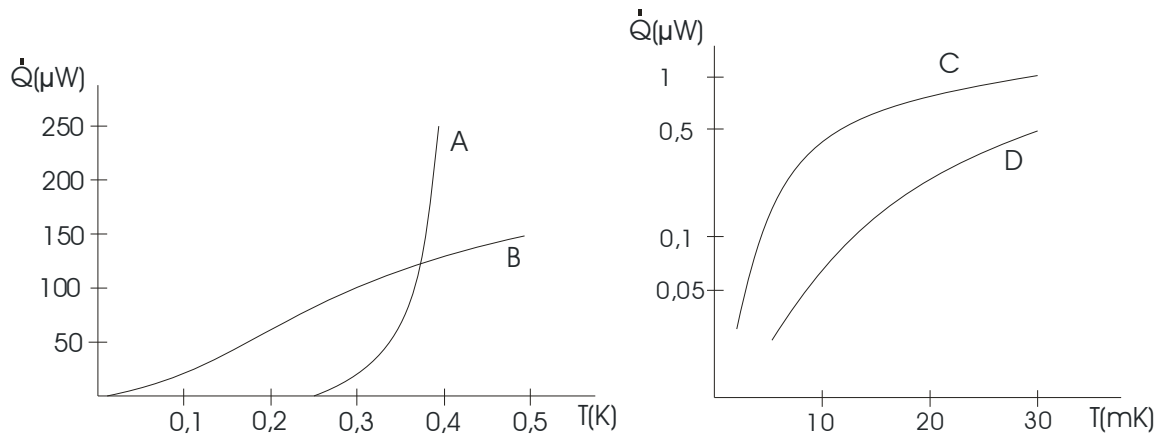
Vývoj této metody započal již v roce 1934, kdy ji navrhli použít (nezávisle na sobě) Gorter a Kurti se Simonsem. Princip spočívá podobně jako u předchozí metody v magnetizaci a demagnetizaci, jenže tentokrát jaderných magnetických momentů. K tomu lze použít pouze takové atomy, jejichž celkový magnetický moment je nenulový, tzv. nukleony v jádře si navzájem nevyrovnávají spiny, např. Cu, In, Co. Velký problém přitom znamená to, že magnetické momenty jader jsou asi 2000x menší, než u paramagnetických solí, a proto se musí začínat na mnohem nižších teplotách (10 - 20 mK) - i minimální energie by mohla pokus narušit - a s mnohem vyšší magnetickou indukcí 4 - 8 T, jenž se vytváří supravodivými magnety. Nyní je velmi důležité, aby celá aparatura byla perfektně izolována od okolí (vibrace budovy, akustické kmity trubic, elektromagnetické vlny rádií a televízí...), neboť i opravdu malá energie by mohla narušit magnetizaci. V praxi se využívají několikastupňové refrigerátory, kde jako předchozí stupeň slouží např. adiabatická demagnetizace paramagnetických solí, či rozpouštěcí refrigerátor.

**Efektivita metody:** Lounasmaa dosáhl spinové teploty 50 nK, spinovou teplotu lze touto metodou snížit až na  $10^{-8}$  K, musíme si ovšem uvědomit, že teplota spinového systému se jen obtížně vyrovnává s teplotou krystalové mřížky, celkem Lounasmaa dosáhl asi 0,3 mK a v plánu je dvoustupňový refrigerátor s konečnou teplotou mřížky až v  $\mu\text{K}$ , pokus 1979 dosáhl  $10^{-5}$  K. Jak jsem již řekl, k použití této metody je zapotřebí mnoho náročných předcházejících chladících stupňů, ovšem s rekordním výsledkem.

## Porovnání

Zde uvádím přibližné závislosti chladících výkonů na teplotě:

- |  |  |
|--|--|
| <p>a) Odsávání horkých par nad hladinou (pro <math>^3\text{He}</math> nebo <math>^4\text{He}</math>)</p> <p>b) Rozpouštění <math>^3\text{He}</math> v <math>^4\text{He}</math></p> <p>c) Krystalizace <math>^3\text{He}</math></p> <p>d) adiabatická demagnetizace</p> | <p><math>\dot{Q} \sim \exp(-\text{konst}/T)</math></p> <p><math>\dot{Q} \sim T^2</math></p> <p><math>\dot{Q} \sim T</math></p> <p><math>\dot{Q} \sim \Delta S T</math></p> |
|--|--|



Co z grafů vyplývá je docela zřejmé, že rozpouštění je oproti odsávání výhodnější v oblasti pod 350 mK a že krystalizace je sice výkonnější oproti demagnetizaci, ovšem nezapomínejme, že krystalizace je jednorázová.

## Metodika

### Úvod do konstrukce

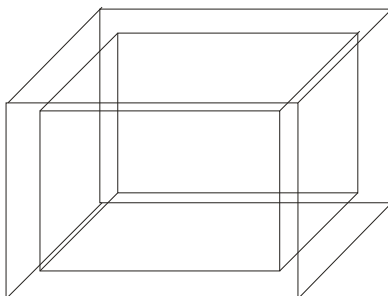
Základní koncepce zařízení spočívá v co nejdokonaleji tepelně izolované nádobě s pracovní látkou, ze které jsou kompresorem odsávány horké páry kapaliny vzniklé snížením tlaku nad hladinou na nejnižší dostupnou mez. Dále je refrigerátor navržen tak, aby bylo možné měřit a zaznamenávat teplotu digitálně s využitím počítače nejen jako stroje pro zpracování dat, ale i jako ovládacího interface kompresoru. Samozřejmě je měření tlaku uvnitř nádoby a optimální sestavení jednotlivých komponent. Fotodokumentaci z konstrukce, přípravy a provozu zařízení viz. příloha D.

### Princip činnosti

Princip zařízení viz. Teorie - Základní metody dosahování velmi nízkých teplot kapalin / Odsávání horkých par nad hladinou

### Návrh konstrukce nádob

V této části se budu zabývat mnou navrženou konstrukcí hlavní části odpařovacího refrigerátoru. Základní schéma je nastíněno na obrázku:

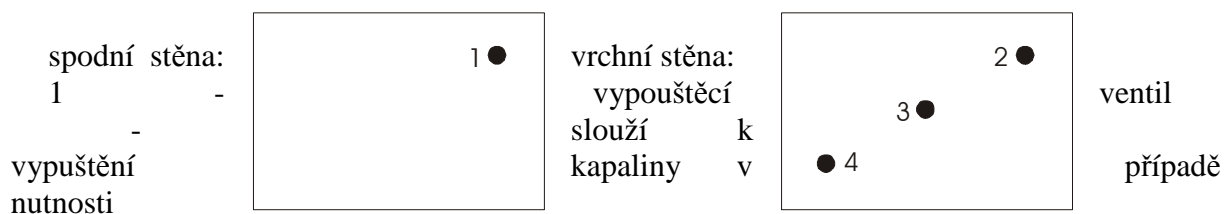


Jak je naznačeno, zařízení se skládá ze dvou hermetických nádob do sebe uzavřených. Ve vnitřní nádobě dochází k odčerpávání plynu a ochlazení kapaliny viz. Teorie, vnější nádoba a prostor mezi nimi potom slouží jako tepelná izolace. Vzájemnou pozici obou prvků umožňují krátké nožičky. Ke zvýšení účinnosti izolace je mezi nádobami odčerpán vzduch, čímž se přenos tepla prouděním plynu omezí a jeho největší část bude uskutečňována tepelnou radiací [2]. Jako další efektivní nástroj pro omezení transportu tepla se jeví použití vhodných materiálů na konstrukci obou nádob. Zvolil jsem plexisklo (5 mm vnitřní a 2 mm vnější - na vnitřní je dokonalejší izolace), jehož tepelná vodivost je minimální a mělo by poskytnout optimální rozhraní mezi vnějším a vnitřním prostředím, navíc je průhledné, což umožní kontrolu procesu pouhým okem.

Rozměry nádob jsem volil jako kompromis mezi velkým aktivním povrchem a potřebným objemem jako zásobou pracovní látky, protože s větším akt. povrchem ( $351,19 \text{ cm}^2$ ) se odpaří více kapaliny za jednotku času (vyšší chladicí výkon) a dostatečný objem ( $V \approx 9,6 \text{ l}$ ) je důležitý pro dlouhodobější práci refrigerátoru. Rozměry vnitřní nádoby na vnitřních stranách stěn jsou: výška: 17,3 cm, šířka: 27,3 cm, hloubka: 20,3 cm; vnější nádoba je potom větší o 2,5 cm na všech stranách. Celkem jsem při konstrukci spotřeboval necelé  $2 \text{ m}^2$  plexiskla.

Ke správné funkci refrigerátoru je zapotřebí zajistit propojení vnitřní nádoby s vnějším tak, aby bylo možné odsávat páry, naplnit ji pracovní látkou a zase vyprázdnit, měřit teplotu i tlak uvnitř nádoby a zároveň tak, aby nedocházelo k přílišným tepelným ztrátám. Toto propojení zajišťují skleněné trubičky o vnějším průměru 6 mm (vnitřní průměr 4 mm), které vedou ven z vnitřní nádoby skrz stěny vnější v místech nastíněných na následujících

obrázcích, je důležité poznamenat, že stejná trubička zajišťuje i odčerpání vzduchu v prostoru mezi nádobami, ta ale pochopitelně nevede skrz vnitřní stěny:



- během provozu je utěsněn gumovou zátkou
- 2 - napouštěcí ventil + odsávací ventil
  - slouží k naplnění vnitřní nádoby kapalinou a potom k odsávání par
  - po naplnění vnitřní nádoby pracovní látkou je připojen ke kompresoru skleněnou trubičkou naohýbanou speciálně pro tento účel, připojení bude rozebráno později
- 3 - vstupní otvor tlakoměru + vstup teplotního čidla
  - je využíván jako vsup pro měřící zařízení
  - připojením jednotlivých měřících komponent se budu zabývat dalších částech textu
- 4 - ventil pro odsátí vzduchu mezi nádobami
  - ventil, který je otevřen a využíván jen při odsávání vzduchu mezi nádobami, během jeho nečinnosti je uzavřen gumovou zátkou

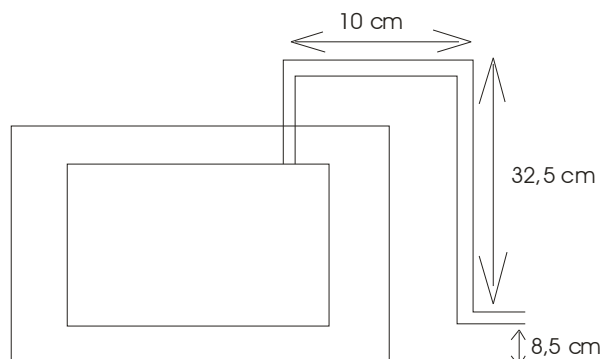
Malý průměr a vlastnosti skla zamezí vzniku většího proudu tepla.

Všechny jednotlivé komponenty - plexisklo, trubičky... jsem slepil pomocí adhesiva Plastic ceys, určeného výrobcem právě k tomuto účelu nebo svařil (plexisklo je s rostoucí teplotou snadno tvárné), navíc jsem pro dokonalé utěsnění svárů použil izolační pásku po celém obvodu všech stěn a získal tak základní prostředí pro průběh procesu.

### Kompresor a jeho připojení

K odsávání par z vnitřku nádoby jsem použil kompresor vyjmutý ze staršího chladícího zařízení. Předpoklad je, že dokáže snížit tlak uvnitř nádoby nejméně o 25 kPa, což by mělo stačit pro dostatečné zvýšení počtu částic s energií potřebnou na fázový přechod.

Vedení plynu z nádoby umožňuje jednak již zmíněný ventil a jednak na něj lepící páskou napojená skleněná trubička, kterou jsem naohýbal nad plamenem kahanu do žádoucího tvaru viz. obrázek:



Největší konstrukční problém u kompresoru představuje jeho silné chvění, které by mohlo mít několik silně nežádoucích účinků na celý refrigerator. Kdyby docházelo k přenosu chvění až na nádobu, nejsilnější defekt takového zařízení by bylo rozlepování jinak hermetických spojů či uvolňování a netěsnost trubiček, při přenosu chvění až na kapalinu by potom docházelo k přímému ohřevu kapaliny, což by omezovalo cílenou funkci zařízení. Řešení



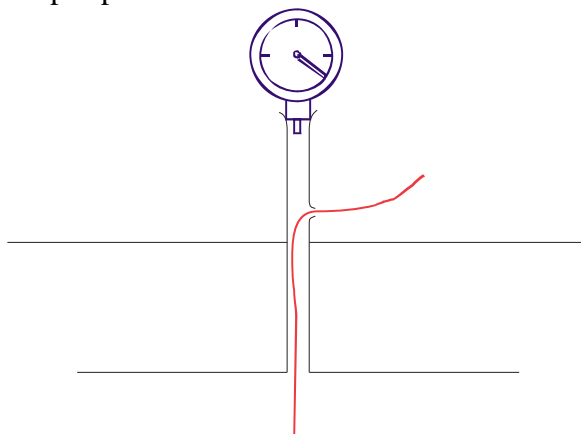
poskytuje krátký kousek gumové hadičky navlečený na konec trubičky a na ventil kompresoru, ten zprostředkuje jednak konečnou fázi vedení látky, ale svou pružností zamezí i většímu přenosu chvění na trubičku. Je důležité, aby hadička nebyla příliš dlouhá, mohlo by dojít k jejímu zploštění podtlakem a ucpání:



### Měřicí komponenty (teploty, tlaku a objemu)

Oba prvky jsou spojeny s nádobou přes vývod 3, konstrukce trubičky odpovídá náskresu:

Trubičku jsem nad plamenem kahanu vytvaroval do potřebného tvaru (rozšíření v horní části) a také vyfouknul otvor pro přívodní vodiče termistoru.

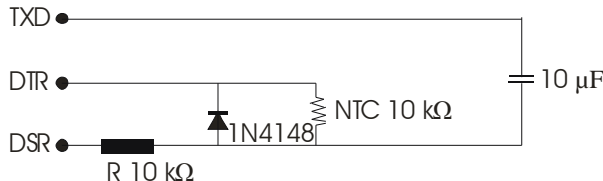


teplotní čidlo      tlakoměr

Hermetické připojení tlakoměru zprostředkovává plastelína v místě dotyku. Jeho měřící rozsah je 0 kPa - 100 kPa a třída přesnosti 2%. Za příspěvku školy jsem pořídil model 03304P od ARMEX TRADING, spol. s r. o., který dostačuje všem konstrukčním požadavkům.

Teploměr jsem sestavil s menšími úpravami (odpor 10 k $\Omega$ ) podle schématu zapojení z [www.electronics-lab.com](http://www.electronics-lab.com), program na jeho ovládání jsem navrhl a napsal sám, tím se budu zabývat v části Řízení počítačem. Menší problém při sestavování představoval fakt, že by bylo vhodné izolovat přívodní vodiče termistoru od pracovní látky, to jsem udělal tak, že jsem je obalil do tenké vrstvy polyethylenu a zatavil.

Zde je upravené schéma:



Celý obvod je připojen, jak již napovídají popisky pinů, k sériovému portu. Před začátkem měření nastavíme piny DTR a TXD na log. 0. Zatím se nic neděje, ovšem v okamžiku kdy DTR nastavíme na log. 1, se kondenzátor začne nabíjet přes termistor 10 k $\Omega$  a my odstartujeme měření doby nabíjení. Čím vyšší je teplota, tím nižší je odpor termistoru a kondenzátor je nabíjen rychleji a naopak. Pin DSR používáme k monitorování napětí na kondenzátoru. V okamžiku kdy už je nabit, prudce vzroste napětí na DSR až na log. 1, což je okamžik, kdy zastavíme stopky (DSR je vstupní pin, takže logický stav na něm lze sledovat softwarově bez a/d převodníku). Po každém měření nastavíme DTR na log. 0 a necháme kondenzátor vybit přes diodu. Je vhodné před použitím provést několik vybití a nabití kondenzátoru, neboť se nabije už při připojení na port a první hodnoty by tak byly zkreslené.

Důležitou připomínkou je, že před použitím čidla v akci je nutné jej kalibrovat na počítači, na kterém má fungovat, totiž závislost teploty na době nabíjení lze vyjádřit rovnicí:

$$T = A \cdot \frac{1}{\log \tau} + B$$

Kde konstanty A a B vyjadřující lineární závislost obou prvků jsou pro každé nové čidlo neznámé (navíc napětí na sériovém portu se liší počítač od počítače). Lze je získat měřením několika teplot ještě jiným teploměrem a následným porovnáním obou křivek (konstanty A i B dopočítáme z několika známých hodnot teplot a jim příslušných dob nabíjení pro křivku, kterou získáme proložením pokusem získaného grafu). Já sám jsem kalibraci prováděl tak, že jsem si ohřál přiměřené množství vody asi na 50°C, tu jsem nalil do kalorimetru a v něm jsem postupně rozpouštěl několik kostek ledu, každá z nich způsobila ochlazení lázně o několik stupňů, a při každém poklesu jsem zaznamenal co nejvíce dob nabíjení (pro zvýšení přesnosti) a teplotu. Takto získané hodnoty pro mé čidlo jsou:

teplota(°C)	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>
45,5	1345	1357	
41,5	1297	1317	1309
35,5	1225	1236	1239
29,0	1150	1157	1151
21,5	1047	1067	1063
15,5	961	988	988

Hodnoty t<sub>1</sub>, t<sub>2</sub> a t<sub>3</sub> ukazují počet cyklů procesoru do nabití, ty však není nutné převádět do základních jednotek času, neboť se pouze změní velikost konstant A a B nikoli však výsledná křivka.

Proložením grafu jsem získal konstanty A = -2121,22340; B = 720,67874

Velkou výhodou zaznamenávání teploty počítačem je, že jsem mohl nechat bez mé přítomnosti zaznamenat stovky hodnot v průběhu procesu a získat tak velmi přesný přehled o průběhu děje. Někdo by mohl namítat, že měření teploty elektrickým čidlem nemusí být vhodné, neboť při průchodu proudu se vytvoří teplo, které by mohlo kapalinu ohřívat, ovšem musíme si uvědomit, že proud protéká termistorem pouze několik milisekund při nabíjení. Ještě by mohl někdo namítnout, že kovové vodiče by mohly dovnitř přivádět tolik nežádoucí teplo, to za mě řeší poměrně slušná izolace obou vodičů po celé jejich délce.

Přesné teoretické i technické pozadí čidla ve zdrojových textech příkládám jako přílohu.

Měření objemu uvnitř jsem zajistil tak, že při napouštění lihu jsem vždy nalil přesně 0,5 l a udělal lihovým fixem rysku na nádobě.

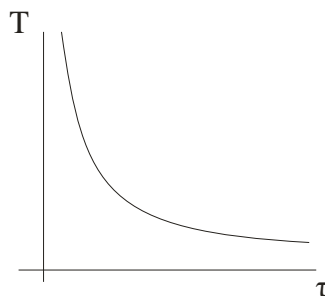
### Pracovní látka

Požadavky na pracovní látku byly zřejmé, musí mít co největší měrné skupenské teplo varu (chladící výkon), nesmí mít příliš vysokou teplotu tání (zamrzala by), pro mé účely musí být snadno dostupná v adekvátním množství, její vnitřní struktura musí umožňovat odpařování (částice uvnitř se nesmí navzájem příliš vázat) a její dostupná čistota musí být co nejvyšší (důležité pro přesný popis děje). Látka, kterou jsem zvolil, odpovídající všem požadavkům, je ethanol. Jeho měrné skupenské teplo varu je 879 kJ.kg<sup>-1</sup>, což zdaleka převyšuje všechny ostatní kapaliny, teplota tání je -117,3 °C, ke které se pravděpodobně ani nepřiblížím, cena čistého technického lihu je poměrně dostupná, navíc je o lihu známo, že se poměrně snadno odpařuje (částice nejsou navzájem příliš vázány) a podařilo se mi získat líh o koncentraci 98%. Celkem jsem při pokusech spotřeboval 5l lihu.

Obecná excitační rovnice popisující počet částic, které získají potřebnou energii k fázovému přechodu se dá napsat v přibližném tvaru[1]:

$$n_v \sim \exp(-U / k_b T)$$

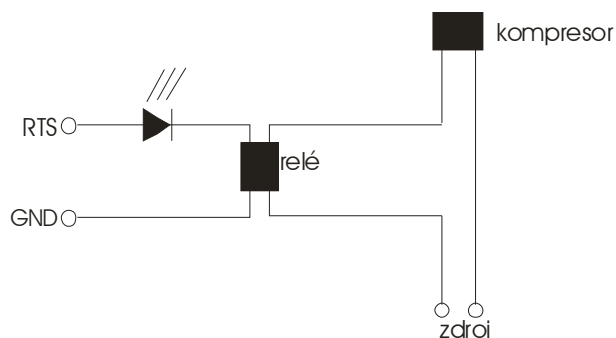
Kde  $U$  je tepelná bariéra, kterou musí částice překonat klasickým přechodem přes bariéru a  $k_b$  je konstanta charakterizující množství částic, které jsou zapotřebí pro nashromáždění dostatečného množství tepelné energie pro fázový skok. Z členu  $1/T$  je poznat, že energii pro přechod bude mít stále méně částic, lze proto očekávat nepřímou úměrnost mezi změnou teploty a změnou času (každá jedna částice při přechodu odebere stejné množství energie, proto s klesajícím počtem částic klesá i množství odebírané energie). Očekávaná křivka bude tedy vypadat:



Je vidět, že vypařování částic způsobené narušením fyzikální rovnováhy (např. změna tlaku) po určité době téměř ustane. Jelikož co největší změna teploty je pro nás žádoucí, ze všech těchto vztahů tedy vyplývá, že se musíme snažit snížit tlak o maximální možnou hodnotu, neboť zrovna tato veličina sehraje jednu z nejdůležitějších rolí.

### Řízení počítačem

Celý svůj projekt jsem se snažil vytvořit co nejflexibilněji, a proto výraznou část práce vykonává počítač. Ke schématu teploměru bych ještě doplnil, že se nesnažím pouze měřit a zaznamenávat teplotu na počítači, pokoušel jsem se také o iniciaci a terminaci procesu ovládním kompresoru. To zajišťuje jednoduchý obvod připojený na stejný sériový port jako teplotní čidlo:



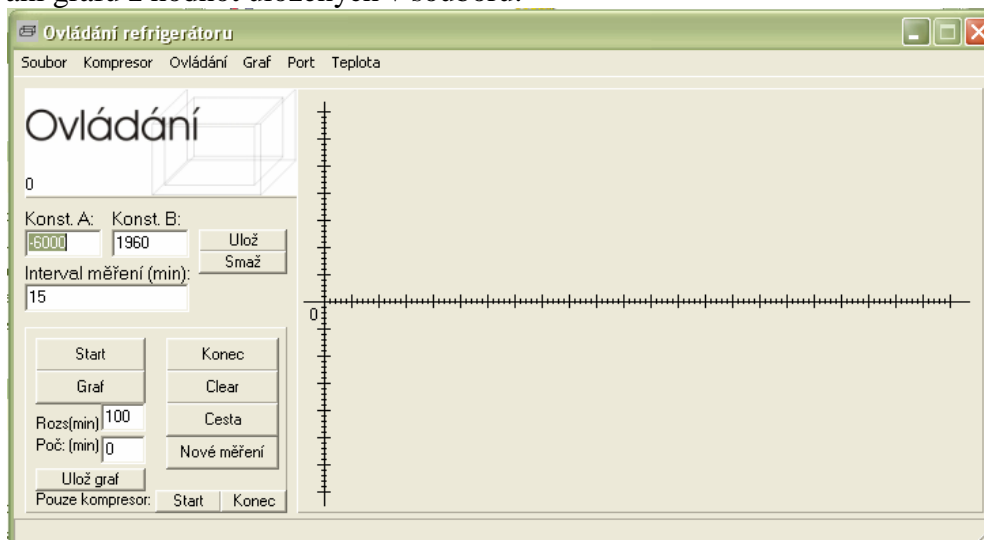
Na začátku je RTS na log.0 (-5 až -15V), tudíž relé není sepnuto, kompresorem neprochází proud a LED dioda nesvítí. Ovšem v okamžiku, kdy na RTS zapíšeme log. 1 (+5 až +15V), relé se sepne, kompresor nastartuje a start procesu indikuje LED dioda. Pro zastavení opět stačí pouze nastavit RTS na log.0.

### Ovládací Program

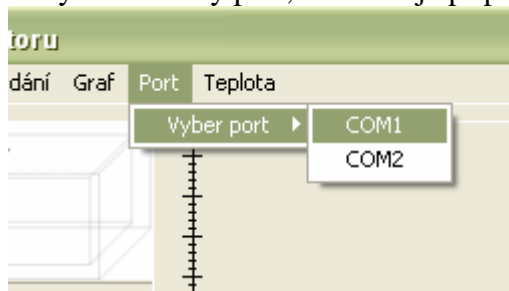
Kompletní zdrojové texty hlavního ovládacího i kalibračního programu příkládám jako přílohu. Pro tvorbu programů mi posloužil jazyk Delphi 7 od Borlandu, který poskytuje optimální propojení mezi tvorbou user interface a velmi rozsáhlými programátorskými možnostmi.

V této části se budu zabývat především ovládním programu, programátorské principy lze vyhledat v přílohách. Celý program se skládá z jednoho hlavního framu, ovládacího menu,

panelu nástrojů a grafu, program umožňuje jednorázově změřit teplotu na čidle, nastartování a stop kompresoru, různé kombinace obojího a hlavně nastartování procesu a automatické zjišťování teploty v zadaném intervalu a její plně automatické vykreslování do grafu se změnou rozsahů na ose x i y a zaznamenávání do souboru, dále program podporuje zobrazování různých částí křivky či ukládání zobrazeného grafu do souboru .bmp nebo vykreslování grafu z hodnot uložených v souboru:

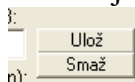


Po startu programu je nutné vybrat sériový port, na němž je připojeno řízení:



Jinak Vás program při měření teploty upozorní, že není vybrán port. Dále je velmi důležité zadat konstanty A a B čidla (viz. Měřící komponenty (teploty a tlaku)) před jakýmkoli měřením, program by vás opět upozornil.

Následuje popis jednotlivých tlačítek a položek menu:



Slouží k uložení zadaných konstant do konstanty.ini či jejich mazání, po uložení jsou konstanty automaticky načteny při spuštění programu.



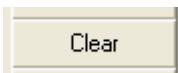
menu: /ovládání/start-konec

Nastartují/zastaví proces. Při startu nastaví čas pravidelného měření a vykreslení podle hodnoty z položky Interval měření (min, lze zadávat pouze celá čísla), je důležité poznamenat, že měření takto nastartované bude přidávat další hodnoty do souboru hodnoty.ini a vykreslovaný graf bude automaticky měnit rozsahy teploty i času tak, aby byly zobrazeny veškeré hodnoty, dále se do loga programu pokaždé vypíše poslední změřená hodnota (horní číslo) a pod něj průměrná hodnota měření.



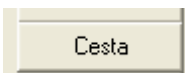
menu: /Graf/Vykresli

Vykreslí graf ze souboru hodnoty.ini s počáteční dobou definovanou v  a koncem definovaným v  jako počátek + rozsah



menu: /Graf/smaž

Vyčistí všechny zobrazené hodnoty - graf, průměrná hodnota i poslední naměřenou hodnou (hodnoty zobrazované na logu v levém horním rohu), ale nesmaže nic ze souborů.



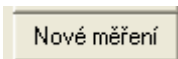
menu: /Graf/Cesta

Slouží pro implicitní nastavení cesty k souboru, kam se má ukládat graf. Po kliknutí se otevře dialog, ve kterém nastavte požadovanou cestu.



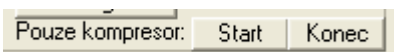
menu: /Graf/Ulož...

Uloží aktuálně vykreslený graf do předem definované cesty. Pozn.: Cesta se neukládá do souboru a tím pádem ani nenačítá po spuštění, je třeba ji pokaždé zadat znovu.



menu: /Soubor/Nové měření

Smaže hodnoty uložené v Hodnoty.ini. Je třeba ho volat pokaždé, když nechceme, aby se v grafu ani jinde zobrazovaly staré hodnoty.



menu: /Kompresor/Start-Konec

Slouží k nastartování/vypnutí pouze kompresoru, v tomto případě se nenastartuje automatické měření teploty.

menu: /Soubor/Konec

Ukončí program.

menu: /Teplota/Změř

Změří teplotu a zobrazí hlášení s výsledkem. Pozn.: Je důležité po každém použití kliknout na /Teplota/Vybij, neboť při tomto měření se kondezátor v obvodu automaticky nevybílí.

menu: /Teplota/Vybij

Slouží k vybití kondezátoru v teplotním čidle, je třeba ho zavolat pokaždé, když změříme teplotu jednorázově.

Pozn. Doporučuji hned po spuštění zkontrolovat konstanty A i B a interval měření, nastavit cestu ke grafu a vybrat port. potom už jen vyčistit Hodnoty.ini (Nové měření) a spustit celý proces.

## Kalibrační program

Zde se jedná pouze o program pro změření počtu cyklů procesoru do nabití kondenzátoru (viz. Měřicí komponenty):



Jelikož se jedná o program vytvořený čistě účelově, je třeba přesně vědět, co které tlačítko dělá, neboť by se mohlo snadno stát, že program zacyklíme.

Po startu je třeba vybrat port stejně jako je tomu u hlavního řídicího programu. Potom kliknout na Vybij (nastavení log. 0 na výstupech), tím eventuálně vybití kondenzátor a potom (i po vyrovnání teplot na čidle) kliknout na Změř, čímž se po změření objeví vyhodnocená hodnota počtu cyklů procesoru v Label nad tlačítky. Celkově program slouží pouze ke kalibraci - pro získání hodnot pro výpočet konstant A a B.

## **Abstrakt**

Celkově jsem se snažil navrhnout a uskutečnit projekt, který by byl komplexní, celistvý a respektoval moderní metody laboratoří. Pokusil jsem se zkonstruovat dvoufázový refrigerátor založený na odpařování ethanolu a ovládaný počítačem, který by byl svou jednoduchou konstrukcí velmi přístupný všem zájemcům a kvalitou se vyrovnal doposud používaným metodám, dokonce je v některých oblastech předčil. Velkou výhodou je právě jednoduchost konstrukce, která narozdíl od ostatních nevyžaduje složité výměníky tepla ani speciálně připravené pracovní látky, i když se samozřejmě vyskytlo několik problémů, na které jsem musel hledat řešení.

## Pokus

### Kalibrace teploměru

Teplota	23°C
Vlhkost	54%
Tlak	102,12 kPa

Kalibraci zde uvádím pouze pro úplnost, neboť jsem ji už jednou zmínil v části věnované metodice. Cílem kalibrace bylo získat několik dob nabíjení kondenzátoru pro několik různých teplot.

*Pomůcky:* Kalorimetr, teploměr, varná konvice, voda, led, kalibrované čidlo spolu s PC

*Postup:* Do kalorimetru jsem uzavřel termistor čidla, teploměr a vodu ohřátou asi na 50 °C. Nechal jsem teploty vzájemně vyrovnat a potom jsem vždy vložil jednu kostku ledu a nechal ji rozpustit, po vyrovnání teplot jsem změřil několik dob nabíjení pro danou teplotu a postup opakoval dokud jsem nezískal dostatek hodnot, z těch jsem potom vypočítal konstanty A a B charakterizující dané čidlo (viz. Metodika).

*Vypracování:* Hodnoty, které jsem získal jsou:

teplota(°C)	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>
45,5	1345	1357	
41,5	1297	1317	1309
35,5	1225	1236	1239
29,0	1150	1157	1151
21,5	1047	1067	1063
15,5	961	988	988

A konstanty A = -2121,22340; B = 720,67874.

### První spuštění

Teplota	24°C
Vlhkost	45%
Tlak	100,54 kPa

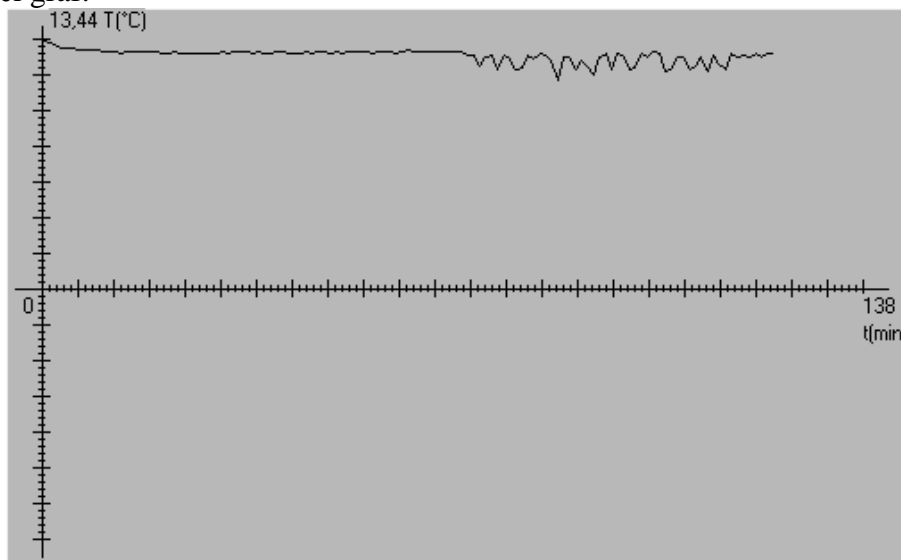
*Pomůcky:* Refrigerátor, PC, teplotní čidlo, tlakoměr, odměrný válec, kompresor, líh

*Vypracování:* Pro první spuštění bylo vše připraveno přesně podle návrhů, pouze ovládání kompresoru jsem musel přepojit na ruční ovládání, neboť použité relé nebylo připraveno na takovou zátěž.

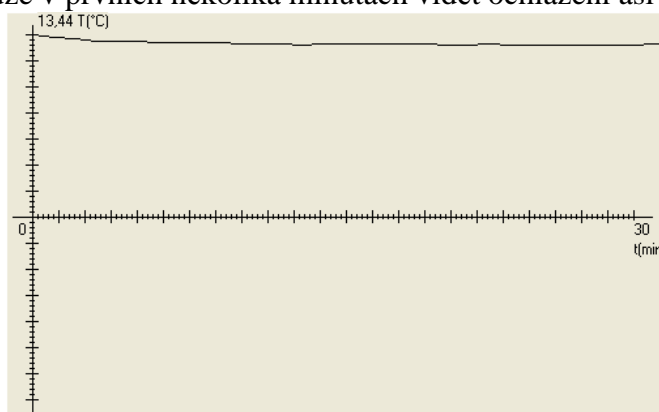
Spuštění bylo v plánu na pondělí 6. března, takže jsem v sobotu čtvrtého nalil do vnitřní nádoby 3,5 l lihu, abych otestoval těsnost a navíc nechal do pondělí vytvořit syté páry nad povrchem pro hladší průběh procesu. V pondělí ráno jsem dorazil do laboratoře a zjistil, že i když na první pohled v sobotu vše těsnilo, odvodní trubička v dolní části zřejmě malou netěsnost měla, neboť se do vnější nádoby přelilo 1,5 l lihu. Ale jelikož jsem se domníval, že se skutečně jedná o malou netěsnost, v 8:00 jsem refrigerátor spustil. Ukázalo se, že trubička skutečně netěsní, neboť kapalina začala zuřivě bublat. Navíc tím, že netěsnil vnitřní spoj na trubičce a všechny ostatní ano, se začal snižovat tlak ve vnější nádobě pod přípustnou mez a nádoba implodovala (povolil hlavně jeden ze spodních spojů). Nemělo smysl za tohoto stavu nechat přístroj běžet, a tak jsem kompresor vypnul. Bohužel po implozi a tím způsobené netěsnosti vnější nádoby 1,5 l lihu ve vnější nádobě drželo pouze díky podtlaku, který se ale s vypnutím kompresoru vyrovnal a následovala katastrofa, asi 1 l lihu doslova spadnul na zem, zbylý líh vytékající z vnější nádoby se mi podařilo zachytit do nádržky. Asi za půl hodiny se



mi podařilo utěsnit a opravit alespoň vedení ke kompresoru, které se polámalo při manipulaci s refrigerátorem při vylévání lihu z vnější nádoby. Doufal jsem, že i když odvodní trubička úplně netěsní, může proces proběhnout alespoň částečně. Takže jsem v 8:30 kompresor znovu zapnul a nechal proces běžet i s jedním bublajícím spojem (teplotu jsem nechal zaznamenávat po minutě). Tlak klesnul pouze na 80 kPa. Ovšem, že jsem nebyl překvapený, když jsem po 2 hodinách viděl graf:



Ve kterém bylo pouze v prvních několika minutách vidět ochlazení asi o půl stupně:



### Druhé spuštění

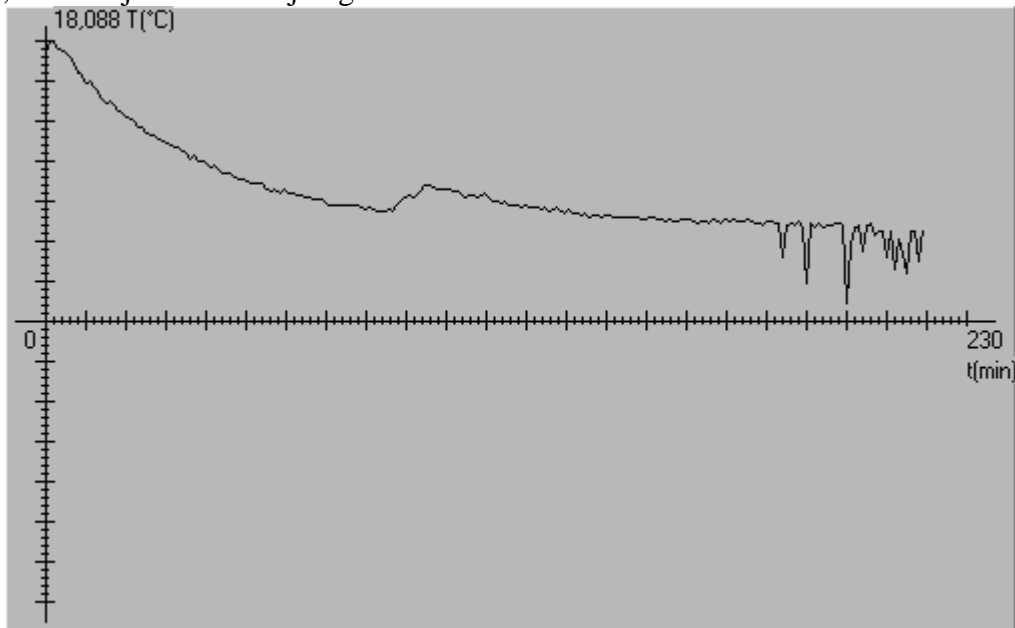
Teplota	22°C
Vlhkost	47%
Tlak	99,76 kPa

*Pomůcky:* Refrigerátor, PC, teplotní čidlo, tlakoměr, odměrný válec, kompresor, líh

*Vypracování:* Po prvním neúspěchu a lihové katastrofě jsem už nedoufal v úspěch. Ovšem nakonec jsem se přece jen pustil do oprav. Rozhodl jsem se vnitřní nádobu vyjmout, neboť vnější už vůbec netěsnila a oprava nepřipadala v úvahu, takže ztratila svůj smysl. Navíc se při prvním pokusu uvolnily nebo zlomily snad všechny trubičky, takže je bylo potřeba vyměnit a utěsnit i na vnitřní nádobě. Při neustálém pohybu s nádobou se ještě k tomu uvolnily i nožičky držící vnitřní nádobu na svém místě. Nakonec se mi podařilo vyrobít všechny trubičky znovu a všechno opět připojit ovšem bez vnější nádoby, k jejímu rozlepení jsem musel použít i hrubé síly, neboť lepidlo nepustilo úplně všude. Jedinou modifikací bylo právě připojení trubiček, jelikož původní se příliš neosvědčilo, utěsnil jsem spoje plastelínou. Bez vnější

nádoby jsem ale přišel o tepelnou izolaci, nezbylo mi než se spolehnout na minimální tepelnou vodivost, kterou plexisklo má. Další start byl v plánu na pátek desátého.

V pátek ráno jsem opět dorazil do laboratoře a nádobu naplnil lihem. Tentokrát jsem ovšem použil jen 1,5 l lihu pro rychlejší ochlazení (menší hmotnost, tím pádem menší tepelná kapacita a větší prostor pro páry nad povrchem). Přesně v 8:00 jsem proces odstartoval ještě jednou (teplotu jsem opět nechal zaznamenávat po minutě). Tentokrát všechno těsnilo jak jsem předpokládal a tlak v nádobě klesnul na 75 kPa, tudíž i kompresor splnil očekávání. Asi po 45 minutách jsem přišel zkontrolovat průběh pokusu a zjistil jsem, že teplota klesá přesně podle teoretických předpokladů. Celkem jsem proces nechal běžet něco přes 3 hodiny (219 minut), pouze asi po 1,5 hodině bylo nutné na chvíli vypnout kompresor, neboť se začínal přehřívat, a získal jsem následující graf:



Jednotlivé části grafu budou rozebrány v Diskuzi.

Celkem jsem při měření získal 219 hodnot teploty, které ukazují na změnu teploty z 18 °C až na 6 °C.

## Výsledky a zpracování

V této části znovu uvádím výsledky obou měření, ovšem tentokrát doplněné o chyby a další detaily jako změny objemu.

### První měření

První měřenou veličinou byl tlak. Výrobce uvádí chybu tlakoměru 2% a jeden dílek představuje hodnotu 5 kPa, to znamená, že tlak uvnitř nádoby (proces byl izobarický) byl:

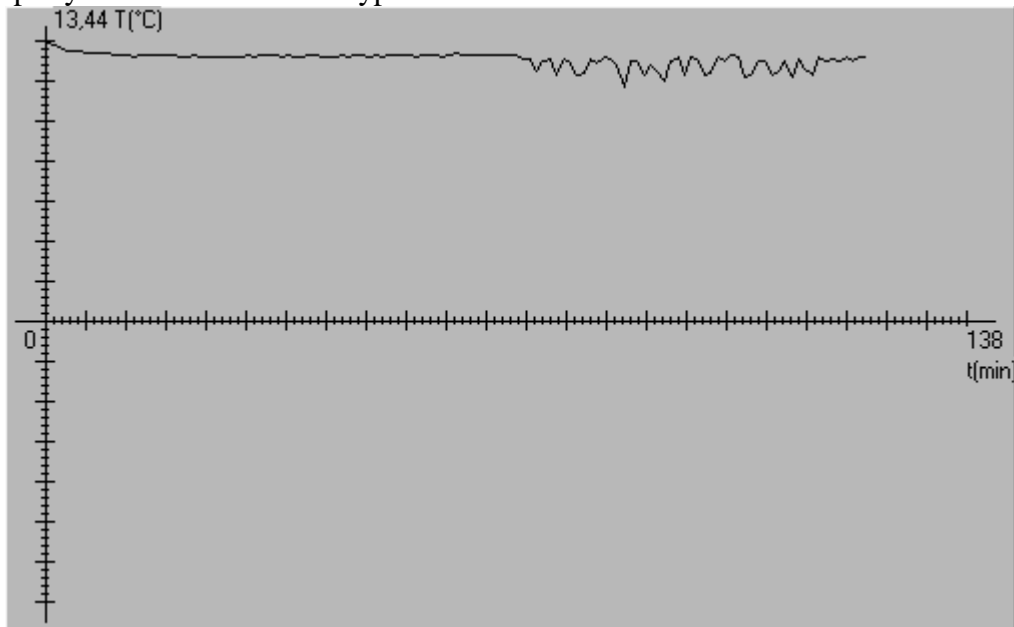
$$p = 80 \pm 3 \text{ kPa (rel. chyba 3,75\%)}$$

Další měřenou veličinou byla teplota, program vytvořený pro obsluhu teplotního čidla zaznamenával teplotu s přesností na tři desetinná místa, to znamená, že absolutní chyba všech měření byla teoreticky:

$$\pm 0,0005 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Ovšem jak je vidět z grafu, teplotní čidlo hodnoty přeci jen zaznamenávalo v určitém rozptýlu asi 0,1 stupně, proto nelze tuto chybu považovat za konečnou.

Graf teploty v závislosti na čase vypadal takto:



Na něm je vidět, že termistor měl ještě jednu nevýhodu, totiž umístění pouze na jednom místě, ke konci procesu se střídavě dostával do teplejšího proudu a zase zpět do studenějšího, to značně zvýšilo nepřesnost měření. Jinak jsem celkem získal 123 hodnot, které mi umožnily přesně popsat proces v každém okamžiku grafem. Textový soubor se zaznamenanými teplotami po minutě přikládám jako přílohu.

Dále se dá z grafu vyčíst, že mi podařilo snížit teplotu pouze asi o půl stupně.

Měření objemu v tomto případě bylo spíše orientační, mnou vytvořená stupnice měla délky po 0,5 l. Výška hladiny se během procesu téměř nezměnila.

### Druhé měření

Měření tlaku v nádobě zahrnovalo stejné chyby jako v prvním případě, proto zjištěný tlak uvnitř nádoby:

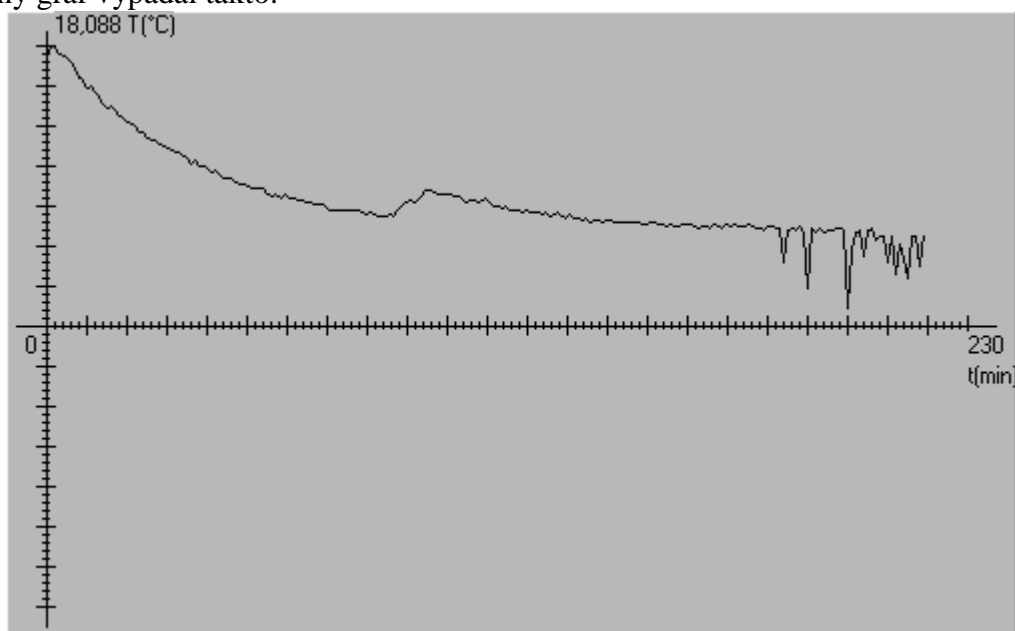
$$p = 75 \pm 3 \text{ kPa (rel. chyba 4\%)}$$

Chyba měření teploty byla tentokrát dána opět čidlem a obslužným programem, proto teoretická absolutní chyba:

$$\pm 0,0005 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Která ale stejně jako v prvním případě není konečná, za konečnou lze považovat rozptyl 0,1 stupně (zjištěno empiricky).

Získaný graf vypadal takto:



V konečné fázi je vidět ona chyba umístění termistoru pouze na jednom místě. Celkem 219 získaných hodnot teploty umožňuje velmi detailní popis procesu v každé jeho části.

Tento pokus předčil má očekávání a podařilo se mi snížit teplotu z 18 °C na 6 °C, tzv. o 12 °C. Průběh teploty je vidět na grafu. Textový soubor se zaznamenanými teplotami po minutě přikládám jako přílohu.

Měření objemu bylo pouze silně orientační, nejmenší dílek mnou vytvořené stupnice představoval 0,5 l, tudíž o přesné změně objemu nemám záznam, vím pouze, že výška hladiny se téměř nezměnila a s výkonnějším kompresorem by mohl proces probíhat dál.

## Vyhodnocení, diskuze

### Zhodnocení postupů

První z experimentů odhalil všechny nedostatky konstrukce, vnější nádoba implodovala a jedna z trubiček způsobila netěsnost vnitřní nádoby, v důsledku čehož se pokus příliš nedařil. Dokonce se po implozi část lihu vylila na zem. Sice jsem neplánoval pouze testovací spuštění, ale i tak se projeví všechny chyby, což mi poskytlo možnost je opravit.

Hlavním nedostatkem bylo, že jsem podcenil rozsah prohnutí vnějších stěn, což pravděpodobně způsobilo uvolnění trubičky, doufal jsem totiž, že trubičky budou fungovat jako jakési vzpěry držící nádobu v původním tvaru. Na druhou stranu lze za úspěch považovat, že proběhla první zatěžkávací zkouška, která nemilosrdně prověřila celou aparaturu, tlakoměr, teploměr, kompresor, skleněné vedení nevyjímaje. A potvrdilo se, že kromě vnější nádoby byly všechny komponenty adekvátně vybrány a spojeny ve funkční celek, zároveň mi první dlouhodobější běh kompresoru naznačil, že při delším spuštění je nutné jej na chvíli vypnout a nechat vychladit.

Výborně si při prvním spuštění vedly měřicí komponenty, na kterých posléze nebylo nutné nic měnit. Připojení tlakoměru perfektně těsnilo a z tlakoměru bylo možné zjistit poměrně přesně (3,75%) aktuální hodnotu tlaku ve vnitřní nádobě. Teploměr si také nevedl špatně, měření s chybou  $\pm 0,1$  °C dokázal počítač provádět po minutě a výsledky přehledně zpracovávat do grafu (viz. Výsledky a zpracování), jediná vážná chyba souvisela s bodovým měřením a jeho ovlivněním proděním kapaliny, to přesnost zvláště ke konci měření snížilo. Pouze měření objemu látky bylo jen orientační a velmi nepřesné, ovšem žádnou chybu pro pochopení procesu to neznamenalo. Obrovský kus práce za mě odvedl počítač nejen tím, že teplotu měřil, ale i ji zaznamenával v reálném čase do grafu a já tak měl dokonalý přehled o situaci.

Zcela opačně však dopadla těsnost vnější nádoby a trubičky v dolní části sloužící pro vypouštění pracovní látky. Jelikož netěsnila odvodní trubička, proces snížil teplotu lihu pouze asi o půl stupně, celou látkou totiž neustále probublával okolní teplý vzduch., který ji permanentně ohříval a sabotoval tak pokus. Stejnou katastrofu znamenalo i rozlepení vnější nádoby, to že nadále netěsnila a rozlepila prakticky všechny trubičky znamenalo její konec, byl jsem nucen z ní pro příští pokus vyjmout vnitřní nádobu.

Celkově první pokus skončil katastrofou, která mi ale vyjevila řadu chyb, ze kterých jsem se mohl poučit pro příště a zároveň prověřila vysokou kvalitu některých komponent.

Při druhém experimentu jsem už znal a opravil všechny konstrukční chyby z prvního spuštění, vkládal jsem proto do něj poslední naději. Po spuštění se sice objevilo několik bublin způsobených jemnou netěsností vnitřní nádoby, která byla způsobena nešetrnou manipulací při transportu do laboratoře, ale ty nijak proces neovlivňovaly.

Tentokrát se žádný nedostatek (krom oné jemné netěsnosti) neprojevil a proces probíhal po dobu 219 minut, během kterých jsem musel přibližně po 1,5 hodině na několik minut vypnout kompresor, neboť se začínal přehřívat, ale potom opět běžel bez potíží až do konce.

Měřicí komponenty zopakovali do puntíku svůj úspěch z prvního pokusu a to i přes to, že připojení trubiček jsem po předchozí zkušenosti modifikoval (utěsnil jsem je plastelínou). Přesnost měření tlaku 4% a měření teploty  $\pm 0,1$  °C lze považovat za přesné měření, které mi poskytlo možnost pochopit důkladněji proces probíhající uvnitř refrigerátoru, 219 zpracovaných hodnot teploty zapsaných do grafu potom zjevilo velmi přesně průběh procesu, zároveň všechna měření tlaku ukázala na izobarický děj. Pouze měření objemu bylo opět nepřesné a jen orientační, ale stejně jako v případě předchozím nezpůsobilo újmu chápání procesu. A stejně jako při prvním použití odvedl nedocenitelnou práci počítač, díky kterému

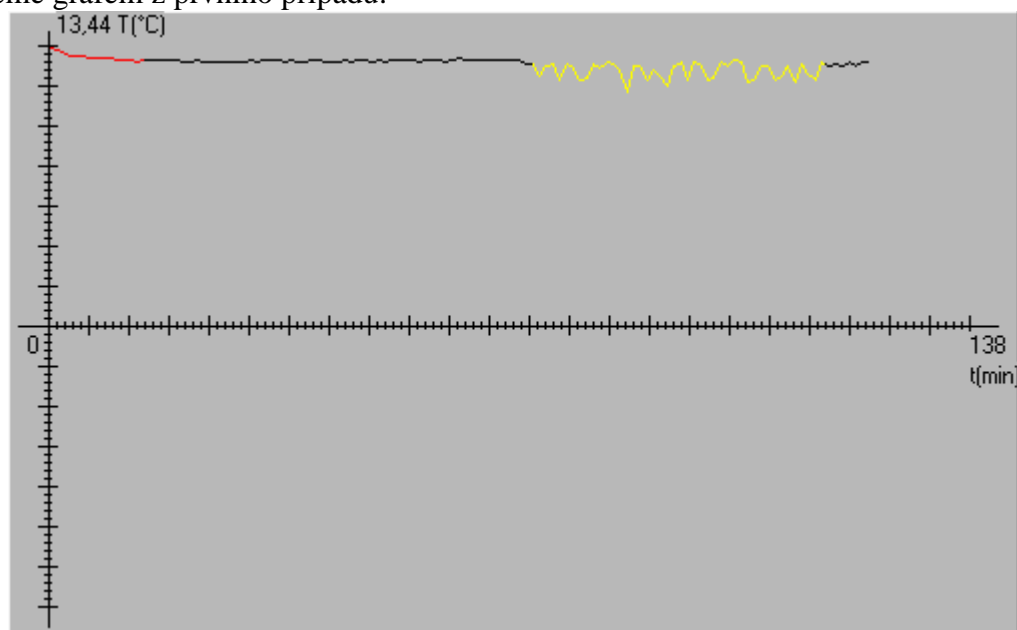
jsem nejen věděl, že proces je úspěšný už v okamžiku průběhu, ale poznal jsem podle křivky i kdy je vhodná doba na vypnutí kompresoru a ukončení procesu.

Jelikož nádoba i trubičky tentokrát těsnily, probíhal uvnitř skutečně děj izobarický a kontinuální. Podmínka konstantního tlaku byla narušena pouze v okamžiku vypnutí kompresoru, k jehož vyrovnání došlo opět po zapnutí kompresoru. Celkově se mi podařilo teplotu snížit přibližně o 12 °C. Kompresor jsem vypnul v okamžiku, kdy se zdálo, že teplota se už nadále snižovat nebude.

Druhý pokus skončil o poznání lépe než první, podařilo se mi ověřit teoretické výpočty a předpoklady v praxi snížením teploty o optimálních 12 °C i přes to, že jsem kvůli prvnímu startu přišel o dokonalejší tepelnou izolaci (ukázalo se, že samotné plexisklo dostačuje).

### Rozebrání výsledků

Začneme grafem z prvního případu:

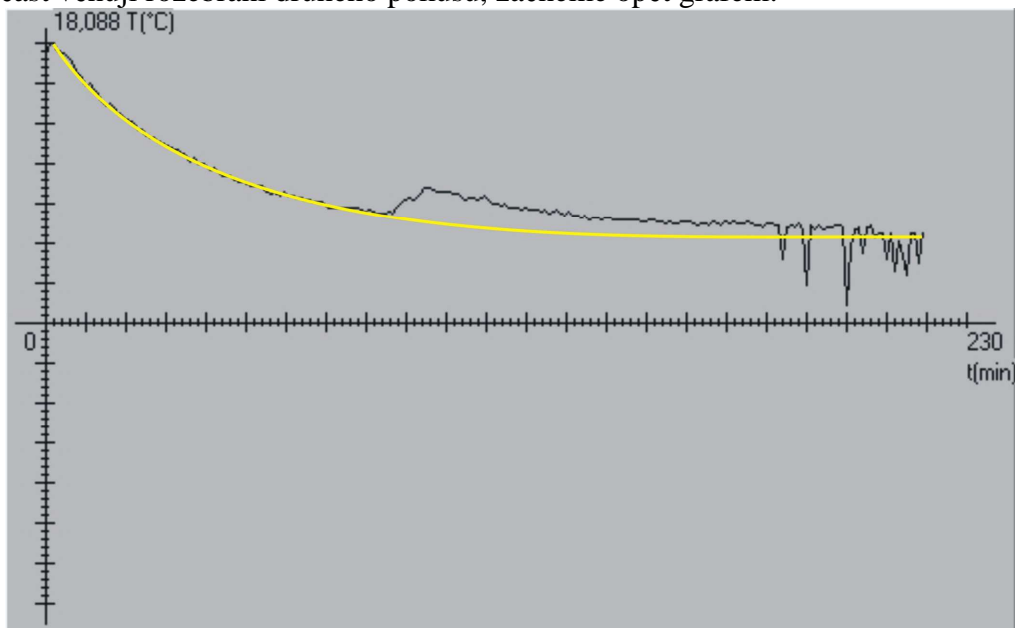


Červená část grafu vyznačuje oblast, kde ještě docházelo ke snížení teploty tím, že tepelný tok odebíraný při odpařování převažoval nad tepelným tokem dovnitř způsobeným vnikáním vzduchu do kapaliny, s trochou představivosti vidíme, že začátek alespoň přibližně kopíruje předpokládanou křivku nepřímé úměry.

Černou částí pokračuje stav kdy se oba tepelné toky vyrovnaly a nadále nedocházelo k poklesu teploty.

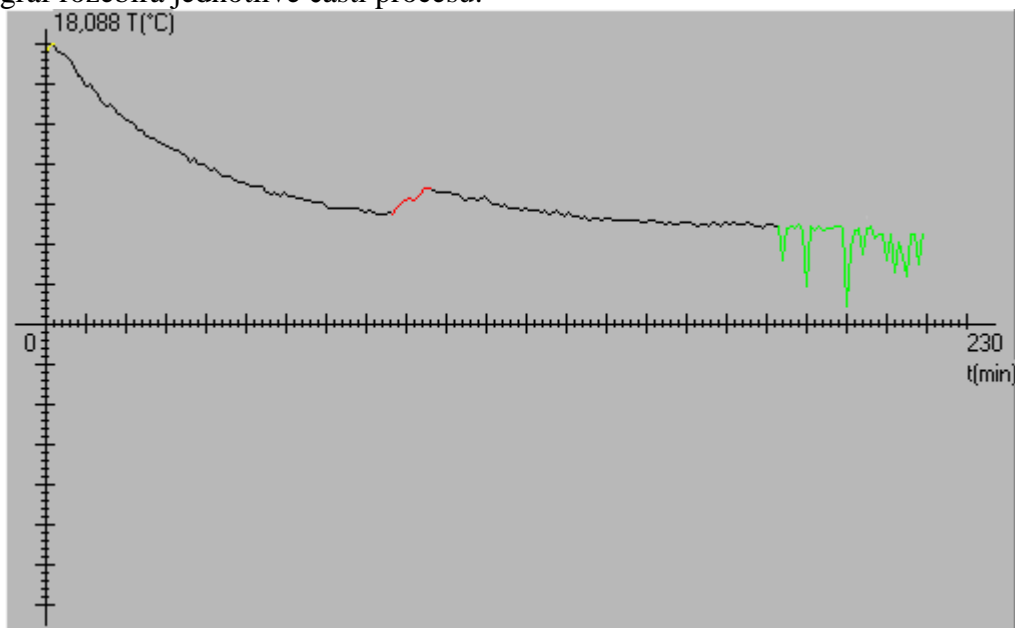
Žlutou barvou jsem potom zvýraznil část procesu, kdy se v nádobě kolem čidla pravděpodobně vytvořily proudy teplejší a studenější kapaliny, které způsobily „rozcházení“ hodnot měřených pouze v jednom místě. Celkem jsem zaznamenal pokles teploty pouze o půl stupně za přibližně 2 hodiny, což není nijak vyjímečný stav.

Další část věnuji rozebrání druhého pokusu, začneme opět grafem:

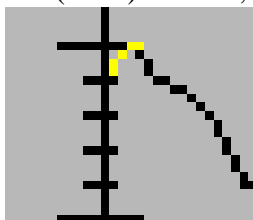


Do grafu jsem tentokrát žlutě zvýraznil teoretickou optimální křivku. Z porovnání získané (černá) a optimální vidíme, že teoretický předpoklad byl naplněn, ovlivnilo jej pouze vypnutí kompresoru po 1,5 hodině. Přibližné proložení černé křivky v průběhu pokusu mi umožnilo určit správný okamžik pro ukončení procesu.

Další graf rozebírá jednotlivé části procesu:



Nejprve se podívejme na počátek grafu (žlutá) zblízka, skrývá totiž zajímavé zjištění:



Žlutá část grafu působí jako kdyby se do kapaliny dostávalo teplo a ohřívala se, poukazují na to i první dvě měření teploty (17, 499 °C; 18,081 °C), ovšem zdání klame, v tomto

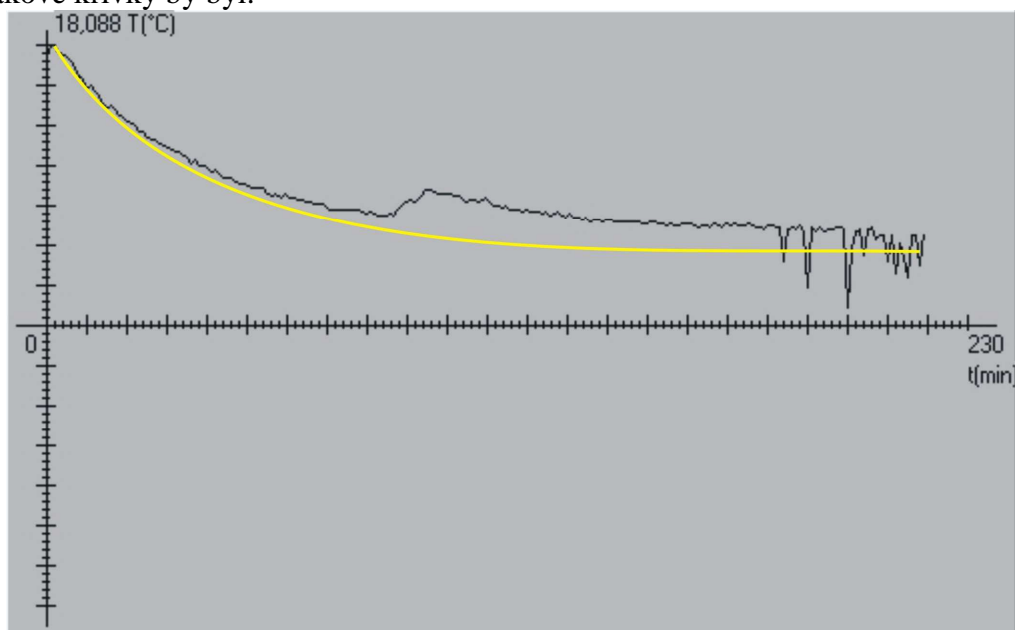
časovém úseku pouze docházelo k vyrovnání teploty v kapalině samotné a mezi kapalinou a čidlem.

K černé části grafu, myslím, není co dodávat, zobrazuje průběh teploty v závislosti na čase v celku podle předpokladů nepřímé úměry. Snad jen vysvětlení, pro počet částic, které získají potřebnou energii k fázovému přechodu platí  $N \sim 1/T$  (viz. Metodika a Teorie), a jelikož každá částice odebere kapalině právě stejné množství energie, musí obdobný vztah platit i pro odebíranou energii. A jelikož teplota klesala s časem právě podle této rovnice, očekávali jsme graf nepřímé úměrnosti.

Červenou barvou jsem zvýraznil dobu, kdy byl vypnutý kompresor, během této doby došlo k vzestupu teploty o téměř stupeň, který jsem potom těžko doháněl. Vzestup teploty lze vysvětlit dvěma důvody, jejichž kombinací byl způsoben. První je tepelný tok z vnějšku nádoby a druhý je pokles tlaku v nádobě a tím způsobené opětovné srážení lihu, které celému objemu dodávalo energii. Tato část grafu by mohla být užitečná při určování tepelného toku skrz plexisklo, ovšem pokud bychom započítali i srážení lihu.

V zelené části se bodové teplotní čidlo opět dostalo do tepelně různorodých proudů, lze říci, že se štěstím až ke konci procesu.

Celkově jsem teplotu 1,5 l lihu snížil za 219 minut o 12 °C, což předčilo má očekávání po prvním neúspěchu, jelikož vypnutí kompresoru odhalilo příchozí tepelný tok, dalo by se očekávat, že při dokonalejší tepelné izolaci by bylo možné snížit teplotu o něco více, neboť konec křivky je zároveň stav, kdy se vyrovnalo množství odebírané energie s příchozím. Odhad takové křivky by byl:



Ovšem jedná se pouze o odhad.



## Závěr

V rámci projektu jsem vypracoval přehled teoretického pozadí práce, totiž stávajících metod používaných k ochlazování kapalin, plynů i pevných látek jak v oblasti teplot nízkých, tak vysokých, pro dobrý teoretický podklad úvahy, zprůhlednění celé práce a vysvětlení některých základních pojmů termodynamiky a kvantové fyziky. Zároveň jsem vypracoval hypotézu o práci mého refrigerátoru založenou na jednom z refrigerátorů nízkých teplot, kterou jsem zpracoval jako konstrukci chladicího zařízení. Dále jsem toto zařízení zohledňující metody moderních laboratoří sestrojil a prověřil experimenty.

Experimenty potvrdily teoretické závěry, k nimž jsem došel, z čehož vyplývá, že konstrukce byla nakonec z větší části správná. Je pravdou, že první experiment neskončil ani zdaleka úspěchem, ba spíše naopak. Poukázal tím na chyby, které jsem v konstrukci udělal. Po necelém týdnu práce se mi je ale všechny podařilo odstranit a úspěšný start na sebe nenechal dlouho čekat. Druhé spuštění již naplnilo očekávání.

Detailní konstrukci celého zařízení včetně podpůrných komponent jsem pečlivě zpracoval tak, aby byla plně reprodukovatelná a dalo se v ní vyhnout chybám, které jsem při ní udělal. Domnívám se, že kromě hlavní části refrigerátoru by mohly zaujmout i další mnou navržené nebo upravené komponenty jako počítačové řízení nebo obvod teploměru.

Původní cíle projektu se z většiny podařilo naplnit, komplexnost, propracovanost a celistvost v sobě zahrnovaly hlavně periferní části aparatury a zpracování teoretického pozadí problému, konstrukci a její úspěšnost jsem již zmínil a nakonec účel celé práce, prozkoumat použití dvoufázového odpařovacího refrigerátoru v oblasti vysokých teplot, naplnění tohoto cíle zprostředkovávala práce jako celek. Musím konstatovat, že z empiricky zjištěných vlastností použití vyplývá, že případné rozšíření působnosti by mohlo znamenat velký přínos pro celou řadu lidských činností, vědu, techniku a průmysl, ale i pro každodenní činnosti a potřeby, hlavně vzhledem k jednoduchosti a lacinému provozu zařízení. Hlavním přínosem takové metody zůstává lineární vzrůst chladicího výkonu s velikostí celého zařízení, jenž by mohl najít uplatnění v ochlazování velkých objemů látky například v potravinářství, biologii či fyzice, jediné zařízení uplatňující podobný princip i v oblasti teplot kolem několika stovek stupňů celsia jsou chladicí věže jaderných elektráren, zde se ale jedná spíše o proces samovolný, nežli cílený a ovládaný, navíc se zde využívá přímo varu kapaliny, ke kterému v našem případě nemá dojít.

Závěrem mé práce bych zmínil, že využití chladících zařízení v lidské společnosti nezná mezí, nelze snad nalézt obor, v němž by se kryotechnika neuplatnila. Proto by průzkum způsobů ochlazování měl vždy znamenat přínos, byť by se jednalo o metodu s pouze omezenou sférou použití. Chlazení je nutnou a nepostradatelnou součástí moderních výzkumných zařízení a nikdo si již nedokáže představit svět bez chladících zařízení kteréhokoliv druhu.

## Použitá literatura

- [1] RNDr. Milan Odehnal, CSc.: Supravodivost a jiné kvantové jevy, ČSAV Praha 1992, 1. vydání
- [2] Ing. Josef Jelínek, CSc., doc. RNDr. Zdeněk Málek, CSc.: Kryogenní technika, SNTL Praha 1982, 1. vydání
- [3] Prof. Dr. Zdeněk Horák, Doc. Ing. Dr. František Krupka, Ing. Dr. Václav Šindelář: Technická fyzika, SNTL Praha 1961, 3. vydání
- [4] Prof. Ing. Jiří Formánek, DrSc.: Úvod do kvantové teorie I., AVČR Praha 2004, 2. upravené a rozšířené vydání
- [5] Ing. David Matoušek: Udělejte se z PC v Delphi - 1. díl, BEN - technická literatura Praha 2003, 1. vydání
- [6] Prof. Ing. Tomáš Boubík, DrSc.: Úvod do statistické termodynamiky, Karolinum Praha 1995, 1. vydání
- [7] internet <http://www.electronics-lab.com/> kompletní stránku uvádím v přílohách (Příloha A)

## Seznam zkratk

[X] Odkaz na knihu X v seznamu použité literatury.

\*X Odkaz na poznámku číslo X na konci kapitoly.

Jinak jsem používal pouze obecně známe zkratky, které je možné vyhledat v Pravidlech českého pravopisu.

## Příloha A

### Simple PC thermometer

source: [Natan Osterman](#)

---

In this article building of a simple thermometer for PC will be described. The unit is extremely simple and cheap to build. You will only need one NTC resistor, one diode and capacitor and serial port connector.

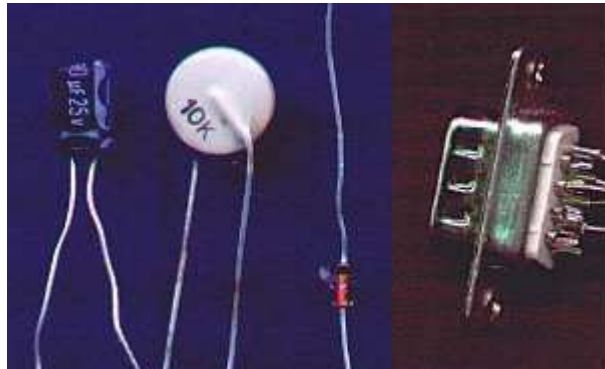
#### Elements:

Capacitor 10 uF or more

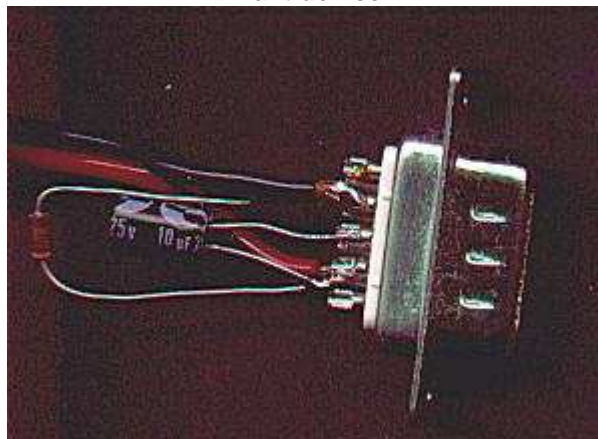
Diode 1N4148 or 1N4001 or similar

Thermistor NTC 10k or similar

9 or 25 pin female connector

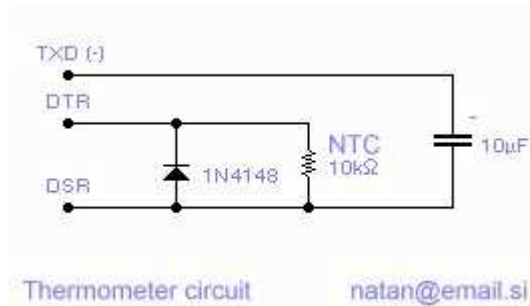


#### Built device



NTC thermistor is connected to other end of black-red wire.

## Schematics



## Description

Let's say DTR and TXD are zero at the beginning. Nothing is going on. Then we set DTR to 1 and start counting time. Capacitor is being charged through NTC resistor. The higher the temperature, the lower the resistance and capacitor is charged more rapidly and vice versa. We use DSR pin to monitor the voltage of capacitor. When it is charged enough, DSR goes to 1, we stop counting time. From elapsed time of charging we can calculate resistance of NTC, from resistance the temperature. After each measurement we set DTR to 0 to empty the capacitor through diode.

## Theoretical background

Charging of capacitor: Capacitor C and resistor R in series, connected to voltage  $U_0$ . Typical time constant  $\tau = R * C$ . Voltage on capacitor versus time t:  $U = U_0 * (1 - \exp(-t/\tau))$  (Equation is solution of simple differential equation)

## NTC thermistor resistance

The resistance of NTC thermistor can be approximated by exponential curve  $R(T) = R_{25} * \exp(B * (1/T - 1/298K))$  (R resistance in ohms,  $R_{25}$  resistance at 25°C, B typical constant dependant on NTC value [unit is kelvin K]). Do not worry about those constants, we will not need them.

## Calibration of device

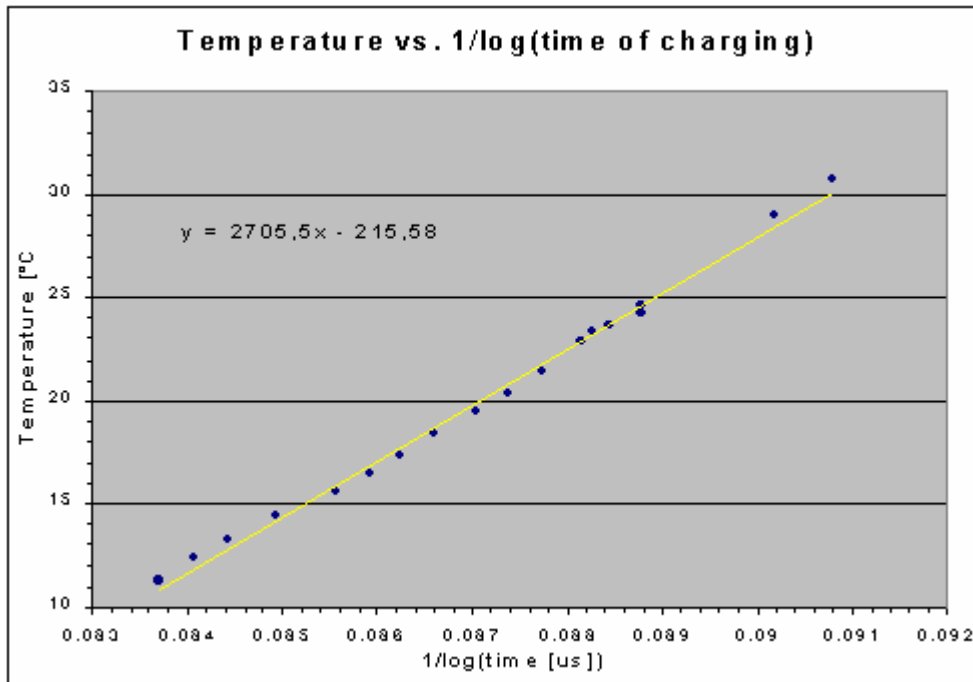
You need another calibrated thermometer for calibration of newly built one. The best is good ole' mercury thermometer with 0-100°C range. Measure temperature and write down capacitor charging time (you can get this data in program). Change temperature and repeat process. Be patient!

Thermometer need some time to reach external temperature.

My way of doing it: I bound thermometer and NTC together and put them in plastic bag (to keep water away from thermometers). I put bag in glass with ice cubes. The ice melted, temperature of water began to rise because my room is hot (28°C). On every couple of degrees change, I wrote down temperature and time.

When you have collected temperature vs. time data, enter them in fitting program. MS-Excel can do it.

Plot temperature vs.  $1/\log(\text{time})$ . Fit with linear function. In my case, equation for temperature in Celsius degrees is  $2722 * 1/\log(\text{time in microseconds}) - 217$ . Therefore constants are  $A = 2722$  and  $B = -217$ .



### Time measurement/program

I wrote small Delphi application. For details, see source. First press "Calibrate" button to calibrate timing procedure. The frequency of your processor will be shown. Then select COM port and press "Open port". At the end you can finally press "Start". Do the calibration process as described above. When you enter correct factors also correct temperature will be displayed.

Download zipped application with Delphi source: [tempmeter.zip](#).

### Pinout of 9 pin serial connector

Data Terminal Ready DTR = Pin 4  
 Data Send Ready DSR = Pin 6  
 Transmit Data TXD = Pin 3

(If you have 25-pin connector for modem, find pinout for your connector on net)

### Usage

Build it, hook it up, calibrate.

- **Through the day temperature logging** - You can throw it through the window and then log temperature vs. time. Write application that records temperature every 5 minutes and writes it to file (send me file with data and your location, I will publish it on web page).
- **Model** - Test if  $A \cdot 1/\log(\text{time}) + B$  is good way of fitting..
  - **Black body radiation** - You can do black-body radiation experiment. Put thermistor on fire for second or two, remove it and measure temperature every 500 ms. Compare data with theoretical black body radiation ( $j = \sigma \cdot T^4$ )
  - **Chilling with wind** - Pour water in bottle, wait for temperature of water to be the same as air temperature. Wind humid cloth around bottle, put thermistor in it. Put whole stuff in shadow windy place (Chicago ;-). Measure temperature every minute. Think what happens and why.

If you want to use anything from this page for commercial purposes you have to get prior written permission from author. Non-commercial usage is free, but do not forget to mention original author. Educational use is also free and desirable.

*Knowledge and information should be free!*

## **Příloha B**

Hondoty.ini (První měření):

[index]

mereni=122

[mereni]

0=13439	31=12694	62=12743	93=12443
1=13291	32=12793	63=12743	94=12644
2=13142	33=12743	64=12743	95=11839
3=12993	34=12743	65=12743	96=12694
4=12943	35=12644	66=12793	97=12443
5=12943	36=12743	67=12743	98=11839
6=12843	37=12694	68=12793	99=11940
7=12843	38=12644	69=12743	100=12694
8=12843	39=12743	70=12743	101=12443
9=12843	40=12743	71=12593	102=12743
10=12793	41=12644	72=12593	103=12644
11=12743	42=12694	73=12041	104=11737
12=12743	43=12694	74=12443	105=11889
13=12694	44=12743	75=12593	106=12493
14=12793	45=12694	76=11788	107=12493
15=12743	46=12793	77=12543	108=11788
16=12743	47=12793	78=12393	109=12041
17=12793	48=12694	79=11788	110=12493
18=12743	49=12743	80=11940	111=11687
19=12743	50=12694	81=12593	112=12543
20=12694	51=12743	82=12393	113=12091
21=12694	52=12743	83=12644	114=11839
22=12743	53=12743	84=12593	115=12644
23=12694	54=12743	85=12242	116=12493
24=12694	55=12694	86=11280	117=12543
25=12644	56=12743	87=12443	118=12493
26=12694	57=12743	88=12493	119=12644
27=12644	58=12793	89=11788	120=12443
28=12644	59=12694	90=12293	121=12694
29=12694	60=12743	91=11940	122=12694
30=12793	61=12843	92=11483	

Hondoty.ini (Druhé měření):

[index]

mereni=218

[mereni]

0=17499	45=9509	90=8096	135=6769
1=18081	46=9509	91=7986	136=6880
2=17985	47=9293	92=8096	137=6880
3=17596	48=9185	93=8424	138=6769
4=17499	49=9185	94=8751	139=6880
5=17304	50=9077	95=8751	140=6880
6=17010	51=8860	96=8642	141=6769
7=16617	52=8968	97=8533	142=6769
8=16024	53=8860	98=8533	143=6769
9=15924	54=8860	99=8533	144=6657
10=15426	55=8533	100=8533	145=6657
11=15526	56=8424	101=8424	146=6657
12=15125	57=8533	102=8424	147=6657
13=14823	58=8315	103=8315	148=6546
14=14318	59=8533	104=7986	149=6546
15=14114	60=8315	105=8096	150=6657
16=14216	61=8205	106=8096	151=6657
17=14013	62=8096	107=7986	152=6546
18=13502	63=8096	108=8096	153=6546
19=13399	64=7986	109=8205	154=6434
20=13194	65=7986	110=7986	155=6546
21=13091	66=7876	111=7766	156=6434
22=12885	67=7876	112=7766	157=6434
23=12470	68=7876	113=7656	158=6546
24=12470	69=7766	114=7766	159=6546
25=12158	70=7545	115=7545	160=6546
26=12054	71=7545	116=7545	161=6434
27=12054	72=7435	117=7545	162=6322
28=11740	73=7545	118=7324	163=6434
29=11635	74=7435	119=7545	164=6434
30=11530	75=7545	120=7324	165=6322
31=11320	76=7435	121=7324	166=6546
32=11214	77=7545	122=7324	167=6434
33=11214	78=7324	123=7213	168=6322
34=11003	79=7213	124=7324	169=6546
35=10791	80=7324	125=7103	170=6434
36=10473	81=7213	126=7213	171=6546
37=10685	82=7103	127=7324	172=6434
38=10366	83=7103	128=7103	173=6434
39=10366	84=7103	129=6991	174=6546
40=10153	85=7213	130=7213	175=6434
41=9939	86=7103	131=6991	176=6322
42=10046	87=7435	132=6991	177=6322
43=9831	88=7766	133=6880	178=6209
44=9509	89=7986	134=6991	179=6434



180=6434  
181=6322  
182=6322  
183=4163  
184=6209  
185=6322  
186=6209  
187=6434  
188=6097  
189=2418

190=6322  
191=6097  
192=6322  
193=6097  
194=6209  
195=6209  
196=6322  
197=6322  
198=6209  
199=1113

200=4851  
201=6097  
202=6209  
203=4508  
204=6209  
205=6322  
206=5533  
207=5872  
208=5872  
209=4163

210=5872  
211=3353  
212=5306  
213=4393  
214=3120  
215=5872  
216=5759  
217=3817  
218=5985

## Příloha C

Zdrojové kódy obou programů lze nalézt na doprovodném CD, zde je neuvádím kvůli jejich rozsáhlosti (několik tisíc řádků).

## Příloha D

Konstrukce nádob:

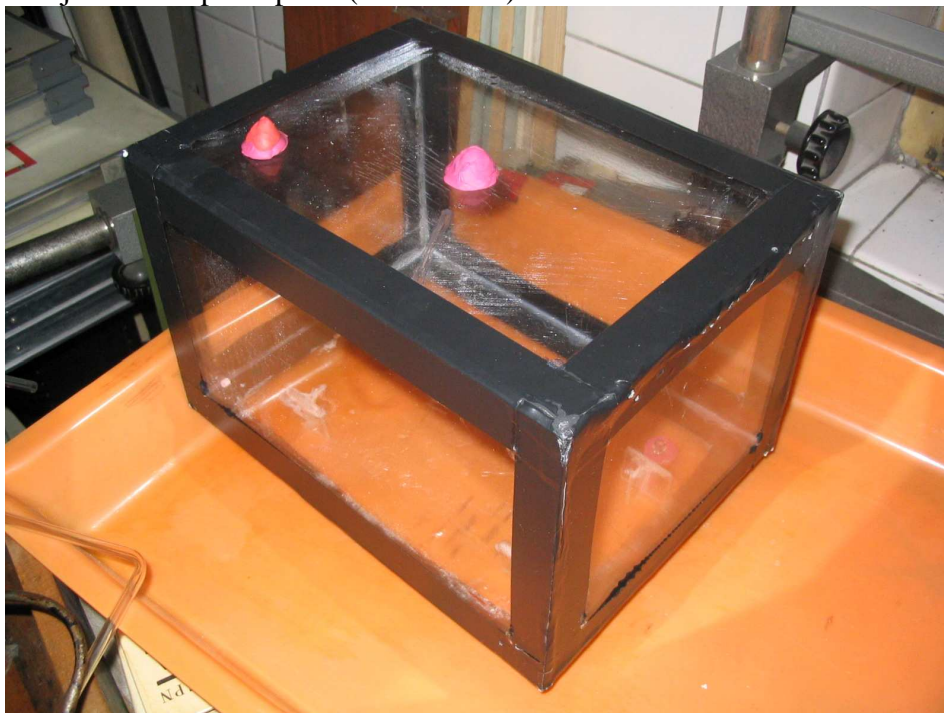




Kompresor (v laboratoři):



Vnitřní a vnější nádoba po implozi (v laboratoři):





Počítač zapůjčený školou, který celý proces zaznamenával (v laboratoři):

