

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

TECHNICKÉ  
V BRNĚ

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

## POUŽÍVANÉ PRINCIPY CHLAZENÍ V PRŮMYSLU

THE USED PRINCIPLES OF INDUSTRIAL COOLING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Jiří Machala

VEDOUcí PRÁCE  
SUPERVISOR

prof. Ing. František Kavička, CSc.

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2009/10

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Machala Jiří

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Stavba strojů a zařízení (2302R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Používané principy chlazení v průmyslu**

v anglickém jazyce:

### **The used principles of industrial cooling**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Student se formou literární rešerše tuzemské i zahraniční literatury (včetně firemní) seznámí nejen s tradičními ale též méně běžnými principy průmyslového chlazení

Cíle bakalářské práce:

Student posoudí výhody a nevýhody jednotlivých principů při konkrétní průmyslové aplikaci

Seznam odborné literatury:

Pavelek M. a kol.: Termomechanika skripta VUT-FSI

Y.A.Cengel, M.A. Boles: Thermodynamics

Dvořák Z.: Základy chladicí techniky, skripta ČVUT



Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. František Kavička, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/10.

V Brně, dne 20.11.2009



prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.  
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty



## ABSTRAKT

V bakalářské práci jsou shrnuty hlavní chladicí metody, které se používají v oblasti průmyslových chladicích zařízení. Dále je pojednáno o pracovních látkách v chladicí technice s přihlédnutím k jejich vlivům na životní prostředí; poškozování ozonové vrstvy a vliv na klimatické změny. Zvláštní pozornost je věnována vlastnostem čpavku. Z řady principů je bakalářská práce zaměřena zvláště na čpavková chladicí zařízení. Dále se práce zabývá principem tepelného čerpadla. Z jiných způsobů chlazení je pojednáno o principu vírové trubice a principu termoelektrického chlazení.

## KLÍČOVÁ SLOVA

chlazení, chladicí směs, chladivo, sytá pára, termodynamické oběhy, škrcení, kompresor, kondenzátor, regulační ventil, výparník, tepelné čerpadlo, vírová trubice

## ABSTRACT

This thesis summarizes the main cooling methods used in industrial cooling systems. It also discusses the fluids used in cooling, their influence on environment; ozone layer and climate change. The thesis closely describes the properties of ammonia and out of the many cooling methods on the market, it mostly concentrates on ammonia cooling systems. The thesis also discusses heat pumps, vortex tubes, and thermoelectric cooling.

## KEYWORDS

colling, cooling agent, refrigerant, saturated vapour, thermodynamic cycles, throttling, compressor unit, condenser, regulating valve, evaporating cooler, heat pumps, vortex tube

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MACHALA, J. *Používané principy chlazení v průmyslu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 30 s.  
Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. František Kavička, CSc.



# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Používané principy chlazení v průmyslu vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je přílohou této práce.

27. května 2010

FAKULTA  
STROJNÍHO  
INŽENÝRSTVÍ

.....  
Jiří Machala

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto prof. Ing. Františku Kavičkovi, CSc. za podnětné vedení během zpracování a cenné rady a připomínky při tvorbě této bakalářské práce.



FAKULTA  
STROJNÍHO  
INŽENÝRSTVÍ



VYSOKÉ  
UCENÍ

TECHNICKÉ  
VYSOKÉ  
UCENÍ

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

## Obsah

|       |                                                      |    |
|-------|------------------------------------------------------|----|
| 1.    | Úvod.....                                            | 8  |
| 2.    | Historie chlazení.....                               | 8  |
| 3.    | Oblasti použití chladicí techniky.....               | 9  |
| 4.    | Základní pojmy.....                                  | 10 |
| 5.    | Přehled chladicích metod.....                        | 12 |
| 6.    | Pracovní látky chladicí techniky.....                | 12 |
| 6.1   | Chladicí směsi.....                                  | 12 |
| 6.2   | Chladiva.....                                        | 14 |
| 6.2.1 | Čpavek.....                                          | 14 |
| 6.3   | Skupenská přeměna látek.....                         | 15 |
| 6.4   | Vztah mezi tlakem a teplotou sytých par.....         | 16 |
| 6.5   | Vztah mezi měrným objemem a teplotou sytých par..... | 17 |
| 7.    | Levotočivé termodynamické oběhy.....                 | 18 |
| 7.1   | Carnotův oběh.....                                   | 18 |
| 7.2   | Rankin – Clausiův oběh.....                          | 19 |
| 7.3   | Škrčení.....                                         | 19 |
| 8.    | Druhy a principy chlazení.....                       | 20 |
| 8.1   | Chlazení bez strojního zařízení.....                 | 20 |
| 8.2   | Způsoby strojního chlazení.....                      | 21 |
| 8.2.1 | Absorpční chladicí zařízení.....                     | 21 |
| 8.2.2 | Kompresní chladicí zařízení.....                     | 22 |
| 8.2.3 | Tepelná čerpadla.....                                | 24 |
| 8.3   | Ostatní způsoby chlazení.....                        | 25 |
| 8.3.1 | Vírová trubice.....                                  | 25 |
| 8.3.2 | Termoelektrické chlazení.....                        | 26 |
| 9.    | Závěr.....                                           | 28 |
| 10.   | Seznam odborné literatury.....                       | 29 |
| 11.   | Seznam symbolů.....                                  | 30 |



## 1. ÚVOD

Popsané používané principy chlazení vycházejí z nutnosti vyrábět chlad. Potřeba chladu zasahuje téměř do všech oborů lidské činnosti, do výroby, skladování potravin i zemědělských produktů, sodovkáren, lihovarů, pivovarů a sladoven. Další uplatnění nalezne výroba chladu v chemickém průmyslu, v průmyslových a kancelářských prostorách, klimatizaci dopravních prostředků a v neposlední řadě pro sportovní aktivity a využití volného času.

Chladicí technika je v současné době natolik rozsáhlou oblastí, že vyžaduje poměrně úzkou specializaci projektantů, montážních a servisních společností (firem) i samotných provozovatelů. A to i přes skutečnost, že díky rychlému vývoji a zavádění nových materiálů pro chladicí okruhy, díky rychlému vývoji elektroniky a výpočetní techniky jsou mnohá zařízení schopna provozu v plně automatickém režimu nebo v režimu s tzv. občasnou obsluhou.

Vzhledem k tomu, že v chladicích zařízeních se používá elektrický proud, rozdíl teplot chladiva může v okruhu dosahovat řádově desítek °C, tlak v okruhu také nelze zanedbat, je nutné zajistit bezpečnost práce při manipulaci s chladivem, bezpečnost práce ve strojovnách, i při manipulaci na jakékoli části zařízení, které je součástí chladicího okruhu.

## 2. HISTORIE CHLAZENÍ

Původní důvod, proč se vyvíjela technika chlazení, byl uchovávání potravin. Poznaitek, že snížením teploty se prodlouží trvanlivost potravin, učinili lidé obývající střední zeměpisná pásma již v dávných dobách. Pomohla jim k tomu příroda - věděli, že v zimním období vydrží potraviny delší dobu než v létě. Vhodný prostředek pro snižování teploty potravin (přírodní led) měli také k dispozici.

Čiňané ve starověku skladovali potraviny v chladu. V Evropě se objevily první místnosti opatřené ledem (lednice) ve starověkém Římě. Římané používali sníh a led z Alp. Většího rozšíření doznaly tyto lednice až ke konci středověku. Spotřeba ledu neustále stoupala. Na přelomu 18. a 19. století vzrostla natolik, že přírodní led ze severních zemí Evropy a Ameriky byl pomocí lodní dopravy dovážen do Indie, Jižní Ameriky, jižní Afriky.

Rozvojem techniky se přibližně v polovině 19. století rozšířila výroba umělého chladu pomocí strojního chladicího zařízení. Zařízení s parním oběhem poprvé popsal v roce 1805 Američan Oliver Evans. Teprve v roce 1834 Angloameričan Jacob Perkins ohlásil svůj patent na skutečně pracující zařízení s etylénem na ruční pohon. V jeho patentu je chráněn princip použití snadno vroucí látky k výrobě chladu, při němž je vypařovaná látka přinucena kondenzovat, aby mohla být znovu odpařena. V roce 1855 nahradil Australan James Harrison ruční pohon parním strojem.

Směřování dalšího rozvoje výroby chladu bylo dáno novými chladivem jako metyléter, oxid uhličitý, čpavek, metylchlorid, patří sem i nová chladiva vzniklá halogenizací uhlovodíků (známá jako freony).

Absorbční chladicí zařízení - jsou datována od roku 1859, jejich průmyslový rozmach však nastává až na začátku 20. století.

Ejektorová zařízení - teoretické práce byly uveřejňovány před rokem 1838, první realizace byla však provedena až roku 1910.

Plynový oběh se vzduchem byl realizován v roce 1910.

Princip termoelektrického chlazení - založený na jevu nazvaném po svém objeviteli Peltierovi byl realizován v roce 1834.

Dosahování teplot v kryogenní oblasti - rovněž patří do druhé poloviny 19. století. Zkapalnění kyslíku - rok 1877, zkapalnění vodíku - rok 1895, zkapalnění hélia - rok 1908. Dosud nejnižší teplota, které se podařilo dosáhnout, jsou 4 nK.

### 3. OBLASTI POUŽITÍ CHLADICÍ TECHNIKY

Jak bylo zmíněno již v předcházejícím textu, původní důvod využití chladu byl především uchovávání potravin. S rozvojem techniky se postupem času použití chladu přenášelo i do jiných odvětví nebo činností:

#### **Potravinářský průmysl**

V této oblasti se používá chlad v celém řetězci od výroby potravin až po jejich skladování u spotřebitele. Je to nejlepší konzervační prostředek pro zachování jejich požadovaných hodnot. Chladicí výkony se pohybují řádově v rozmezí  $10^1$  až  $10^6$  W, teploty přibližně od  $+10$  °C do  $-45$  °C. Znehodnocování potravin účinkem enzymů, oxidace a působením mikroorganismů (plísňe, kvasinky a bakterie) se chlazením potlačuje a omezuje. Například činnost enzymů lze omezit snížením teploty potravin na teplotu kolem  $0$  °C, podstatně omezit ochlazením na  $-20$  °C a zcela potlačit při teplotě přibližně  $-40$  °C.

#### **Chemický průmysl a plynárenství**

V tomto odvětví je použití chladu nepostradatelné např. při chlazení chemických pochodů v průběhu chemických reakcí, při procesu zkapařování vzduchu, případně jiných plynů, při výrobě kyslíku, dusíku,  $\text{CO}_2$ , inertních plynů, uhlovodíků, při zpracování a přepravě zemního plynu atd. Chladicí výkony se pohybují řádově v rozmezí  $10^2$  až  $10^6$  W. V této oblasti bývá dosahováno až  $-190$  °C.

#### **Kryogenika**

Jedná se o specifický obor pro dosahování velmi nízkých teplot, které se blíží absolutní nule ( $-273,15$  °C) např. při zkapařování vodíku a hélia.

#### **Stavebnictví**

Ve stavebnictví se využívá chladu např. pro chlazení betonu při masivních betonážích jako jsou stavby přehrad, kdy v průběhu procesu zrání betonu vznikají chemické reakce a teplo. Dále se chlad využívá při zmrazování půdy, hloubení šachet apod. Chladicí výkony jsou řádově  $10^5$  W, teploty od  $0$  °C až do  $-25$  °C.

#### **Klimatizace a úprava vzduchu**

Tuto oblast lze rozdělit na průmyslovou klimatizaci a klimatizaci komfortní. Používání průmyslové klimatizace je nutné pro dodržení vhodného prostředí v průběhu technologických výrobních procesů, případně pro odvod tepla z výrobních hal pro dobré pracovní klima pracovníků. Jako příklad je možné uvést provozy sléváren, textilní továrny, filmové laboratoře, objekty s výpočetní technikou, sklady, archivy, obchodní domy, administrativní budovy, hotely aj.

#### **Sportovní účely**

Díky snaze prodloužit sezonu zimních sportů je chladicí zařízení využíváno pro výrobu umělého ledu na zimních stadionech a rychlobruslařských drahách, pro výrobu sněhu, úpravu lyžařských sjezdovek, běžeckých tratí, skokanských můstků apod. Dosahované chladicí výkony jsou řádově  $10^2$  až  $10^6$  W, teploty  $-15$  °C až  $-20$  °C.

#### **Lékařství**

V tomto odvětví se nedosahuje takových chladicích výkonů jako ve výše uvedených oblastech. Ovšem rozsah použití chlazení, případně zmrazování je velmi široký. Ochlazování operovaných částí těla, skladování a uchovávání léků. Teplota  $-80$  °C je nutná při zpracování krevní plazmy, uchovávání živých tkání se provádí při teplotách pod  $-100$  °C.

### Kosmonautika

Vývoj kosmonautiky vyžaduje například simulace prostředí za různých extrémních teplot, v aerodynamických tunelech apod.

### Strojírenství

Ve strojírenství existuje celá řada technologických procesů, při kterých se bez chlazení nelze obejít. Například při zušlechťování oceli nebo při ochlazování různých kapalin (emulzí pro obrábění, chladicí kapaliny elektrod bodových svářeček atd.).

### Vytápění

Pro vytápění na určitou ekonomickou hodnotu lze teoreticky využít každé chladicí zařízení se systémem komprese - vypařování. Takové zařízení je v podstatě tepelným čerpadlem a je pouze otázkou, při jaké kondenzační teplotě pracuje. Teplo, získané z ochlazované látky ve výparníku se využije v kondenzátoru, kde má vyšší teplotní hladinu. Klasická tepelná čerpadla využívají odpadní nebo nízkopotencionální zdroje (vzduch, země, termální vody, průmyslové zdroje tepla a j.).

## 4. ZÁKLADNÍ POJMY

### Tlak

Tlak  $p$  je definován jako síla působící na jednotku plochy ve směru normály. Z tohoto pohledu lze tlak v látkách a soustavách definovat jako silové působení molekul na zvolenou jednotkovou plochu:

$$p = \frac{\Delta F}{\Delta S} \quad [Pa] \quad (1)$$

kde  $\Delta F$  je element síly působící na element plochy  $\Delta S$ . Jednotkou tlaku je pascal  $[Pa]$ , definovaný jako kolmé působení síly  $1N$  na plochu  $1m^2$ , proto platí:

$$1Nm^{-2} = 1Pa$$

Se zřetelem na různé technické aplikace, jako jsou např. výpočty namáhání tlakových nádob a s ohledem na skutečnost, že lze snáze měřit tlakové difference, než absolutní tlak, se setkáváme vedle pojmu tlak  $p$  (absolutní tlak) i s pojmy přetlak  $p_{pr}$  a podtlak  $p_{po}$ . Přetlak a podtlak potom uvažujeme jako relativní hodnoty tlaku ve vztahu k vnějšímu tlaku  $p_e$  (často shodnému s atmosférickým tlakem  $p_a$ ).

### Teplota

Teplota je základní fyzikální veličinou a základní termodynamickou stavovou veličinou. Rozlišujeme termodynamickou (absolutní) teplotu  $T$  udávanou v kelvinech  $[K]$  a Celsiovu teplotu  $t$ , která se udává ve stupních Celsia  $[^{\circ}C]$ . Kelvin je definován jako 273,16-tá část termodynamické teploty trojného bodu vody ( $0,01^{\circ}C$ ). Stupeň Celsia je definován jako jedna setina rozdílu teploty bodu varu ( $100^{\circ}C$ ) a teploty tuhnutí vody ( $0^{\circ}C$ ) při tlaku  $0,101325 MPa$ . Svoji velikostí je Celsiův stupeň roven kelvinu. Pro vzájemný vztah termodynamické a Celsiovy teploty platí:

$$t = T - 273,15 \quad [^{\circ}C] \quad (2)$$

Mezi další používané teplotní stupnice patří např. stupnice Fahrenheitova, pro přepočty platí:

$$T_F = \frac{9}{5}t + 32 \quad [^{\circ}F] \quad (3)$$



### Teplo a měrné teplo

Teplo je forma přenosu tepelné energie mezi termodynamickou soustavou a okolím za současné změny stavu soustavy.

Měrné teplo  $c$  je množství tepla udávané v Joulech, které je nutno dodat (nebo odebrat) 1 kg látky, aby se teplota látky zvýšila (nebo snížila) o 1 K.

Rozměr měrného tepla:

$$c \quad [J.kg^{-1}.K^{-1}]$$

Měrné teplo je závislé na skupenství látky.

### Objem

Objem  $V$  je stavová veličina představující velikost prostoru sledované soustavy.

$$V \quad [m^3]$$

### Hustota

Hustota  $\rho$  je stavová veličina definovaná jako podíl hmotnosti homogenní látky a jejího objemu.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad [kg.m^{-3}] \quad (4)$$

### Měrný objem

Měrný objem  $v$  je stavová veličina definovaná jako podíl objemu homogenní látky a její hmotnosti

$$v = \frac{V}{m} \quad [m^3.kg^{-1}] \quad (5)$$

Porovnáním rovnic [4] a [5] dostaneme vztah:

$$v = \frac{1}{\rho} \quad [m^3.kg^{-1}] \quad (6)$$

Z uvedené rovnice vyplývá, že měření měrného objemu lze provádět obdobně, jako měření hustoty.

### Chladicí faktor

Pro obecný chladicí oběh lze definovat obecnou účinnost chladicího cyklu:

$$\varepsilon = \frac{q_1}{a_0} \quad (7)$$

jako poměr získaného chladicího tepla a přivedené kompresní objemové práce. Vzhledem ke skutečnosti, že její hodnota je vyšší než 1, nazýváme tuto účinnost chladicího oběhu chladícím faktorem.

Carnotův chladicí faktor vyjádřený pomocí absolutních teplot má tvar:

$$\varepsilon_C = \frac{q_1}{q_2 - q_1} = \frac{T_1(s_2 - s_1)}{T_2(s_2 - s_1) - T_1(s_2 - s_1)} = \frac{T_1}{T_2 - T_1} \quad (8)$$

Rankin – Clausiův chladicí faktor vyjádřený pomocí rozdílu entalpií:

$$\varepsilon_R = \frac{q_1}{a} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (9)$$

### Topný faktor

Analogicky jako v případě chladicího oběhu, je u tepelného čerpadla zaveden topný faktor. Je to poměr získaného tepla k potřebné kompresní práci.

$$\varepsilon_t = \frac{Q_V}{A_K} \quad (10)$$

## 5. PŘEHLED CHLADICÍCH METOD

Z neznámějších metod lze uvést:

### Chlazení přirozenými prostředky

- využití chladné vody, chladného vzduchu, sněhu a ledu.

### Chlazení chemickými roztoky

- snižování teploty se děje v důsledku spotřebovaného tepla při rozpouštění

### Chlazení vypařováním chladiva

- systémy strojního chlazení, nepoužívanější jsou kompresní nebo sorpční

### Chlazení plynem po expanzi

- teplota plynu při adiabatické expanzi prudce klesá (použití v klimatizaci)

### Joule-Thompsonův efekt

- při škrcení reálného plynu může nastat za určitých podmínek jeho značné ochlazení (použití v technice hlubokých teplot)

### Termoelektrické chlazení

- využívá Peltierův elektronový jev, který je opakem jevu v termočláncu pro měření teplot

### Efekt Ranqueho vířivé trubice

- rotující proud plynu v trubce se rozdělí na dva proudy rozdílných teplot: obvodový a osový

## 6. PRACOVNÍ LÁTKY CHLADICÍ TECHNIKY

### 6.1 CHLADICÍ SMĚSI

Chladicí směsi se používají jako teponosné látky v systémech s nepřímým chlazením pro přenos chladu, případně k jeho akumulaci. Teponosnou látku lze definovat jako látku, jejíž oběh je vložen mezi oběh chlazené látky a chladiva a která nemění své skupenství.



**Požadavky na teplotnosné látky:**

- nesmí měnit své chemické složení v průběhu pracovního cyklu
- nesmí dojít ke skupenské přeměně v průběhu pracovního cyklu
- vysoká měrná tepelná kapacita (z důvodu minimalizace obíhajícího množství v systému)
- nízká hustota a viskozita (z důvodu snížení průtočných odporů)
- nesmí mít korozivní účinky na materiál v systému

**Základní rozdělení:**

- směsi s ledem a některými solemi
- směsi solných roztoků
- vodní roztoky organických látek

**Druhy:**

- Voda. Pro chlazení na nadnulové teploty lze použít jako teplotnosné látky vodu.
- Solanky. Solanky jsou vodní roztoky různých solí. U solanek je nutné zamezit jejich vzájemnému mísení z důvodu zabránění jejich znehodnocení. V tab. 1 je přehled solanek včetně způsobu použití.

| Druh | Název - základní látka | Chemická značka | Hlavní příměsi            | Použití                                                                                       |
|------|------------------------|-----------------|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| A    | uhličitan draselný     | $K_2CO_3$       | $K_2O$<br>min 19 %        | Do $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$<br>pro CrNi oceli,<br>ne pro Zn, Pb,<br>Al a jeho slitiny    |
| R    | chlorid vápenatý       | $CaCl_2$        | $CaO + MgO$<br>min 13,5 % | Do $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$<br>pro konstr. oceli,<br>pro speciální oceli<br>nutno ověřit |
| O    | chlorid sodný          | $NaCl$          |                           | Do $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$<br>pro konstr. oceli,<br>nevhodné pro<br>nerezavějící oceli  |

Tab. 1. Druhy solanek

[11]

- Vodní roztoky organických látek. Jsou to zejména: metylalkohol, etylalkohol, etylenglykol, propylenglykol, glycerin. V tab. 2 jsou uvedeny druhy těchto roztoků.

| Obchodní název | Základní látka     | Použití                                             |
|----------------|--------------------|-----------------------------------------------------|
| Termofrost P   | monopropylenglykol | Do $-32\text{ }^{\circ}\text{C}$ – chladič systémy  |
| Termofrost E   | monoethylenglykol  | Do $-32\text{ }^{\circ}\text{C}$<br>chladič systémy |
| Termofrost L   | ethylalkohol       | Do $-32\text{ }^{\circ}\text{C}$<br>chladič systémy |

Tab. 2. Druhy vodních roztoků organických látek

[12]

## 6.2 Chladiva

Chladiva jsou specifikována jako látky, které v chladicím okruhu přijímají teplo při nízkém tlaku a nízké teplotě a odevzdávají je při vyšším tlaku a vyšší teplotě. Přijímání a odevzdávání tepla je současně spojeno se změnou skupenství chladiva (vypařováním při přijímání tepla a kondenzací při jeho odvádění). Výjimku tvoří pouze voda.

### Požadavky na chladiva

- termomechanické – vhodný tlak a teplota vypařování, dobré výparné teplo
- fyzikální vlastnosti – elektrické vlastnosti, rozpustnost s vodou a oleji
- chemické vlastnosti – hořlavost, výbušnost, stabilita, korozní účinky
- fyziologické působení na lidský organismus
- cena

V tab. 3 je uveden přehled některých druhů chladiv včetně koeficientů odpovídajícím vlivu na životní prostředí.

| Chladivo      | Označení | Chem. vzorec                     | Směs [%]  | Teplota varu [°C při 10 <sup>5</sup> Pa] | ODP  | GWP  | Poznámka          |
|---------------|----------|----------------------------------|-----------|------------------------------------------|------|------|-------------------|
| Voda          |          | H <sub>2</sub> O                 |           | 99,6                                     |      |      |                   |
| Čpavek        | R 717    | NH <sub>3</sub>                  |           | -33,7                                    | 0    | 0    | výbušný, jedovatý |
| Oxid uhličitý | R 744    | CO <sub>2</sub>                  |           | -78,5                                    | 0    | 1    |                   |
| Etan          | R 170    | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>    |           | -88,6                                    | 0    | 3    | hořlavý, výbušný  |
| Propan        | R 290    | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>    |           | -42                                      | 0    | 3    | hořlavý, výbušný  |
| Etylen        | R 1150   | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>    |           | -103,5                                   | 0    |      | hořlavý           |
| Metanová řada | R 12     | CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>  |           | -29,8                                    | 1    | 8500 | zakázané          |
|               | R 22     | CHClF <sub>2</sub>               |           | -40,8                                    | 0,06 | 1700 | pouze pro servis  |
|               | R 32     | CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub>   |           | -51,7                                    | 0    | 650  |                   |
| Etanová řada  | R 125    | CHF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub> |           | -48,1                                    | 0    | 2800 |                   |
|               | R 134a   | CH <sub>2</sub> FCF <sub>3</sub> |           | -26,2                                    | 0    | 1300 |                   |
|               | R 143a   | CH <sub>3</sub> CF <sub>3</sub>  |           | -47                                      | 0    | 3800 |                   |
| Směsi         | R 404A   | R-125/143a/134a                  | 44/52/4   | -46,5 až -45,7                           | 0    | 3260 |                   |
|               | R 407C   | R-32/125/134a                    | 25/15/60  | -39,4 až -32,7                           | 0    | 1420 |                   |
|               | R 410A   | R-32/125                         | 50/50     | -51,6 až -51,5                           | 0    | 1720 |                   |
|               | R 502    | R-22/115                         | 48,8/51,2 | -45,4                                    | 0,33 | 4400 |                   |
|               | R 507A   | R-125/143a                       | 50/50     | -46,7                                    | 0    | 3300 |                   |

ODP – potenciál poškozovat ozonovou vrstvu (Ozone Depleting Potential)

GWP – potenciál způsobovat klimatické změny (Global Warming Potential)

100 let, CO<sub>2</sub> = 1

Tab. 3. Druhy chladiv

[10]

### 6.2.1 Čpavek

Čpavek je přírodní organická látka. Pro průmyslové použití se vyrábí synteticky. Patří mezi nejstarší a v současné době nejrozšířenější chladivo v systémech s parním i sorpčním oběhem v průmyslových chladicích zařízeních. Charakteristické vlastnosti: mimořádně velká hmotnostní a dobrá objemová chladivost, vysoké součinitele přestupu tepla při změně skupenství, netečnost vůči většině kovů, plastů a materiálů používaných pro těsnění, neomezená rozpustnost s vodou; téměř úplná nerozpustnost s minerálními oleji. Tlaky odpovídající rozmezí teplot -40 °C až +50 °C jsou přiměřené. Výrobní cena čpavku je nízká, vyrábí se ve

velkých množstvích a odpovídající jakosti především pro výrobu chemikálií. Je hořlavý, výbušný, prudce jedovatý a žíravý při styku s pokožkou, zvláště očima a sliznicí, avšak pronikavý zápach snižuje nebezpečí tím, že vytváří nesnesitelné ovzduší již při mnohem nižších koncentracích, než jsou životu nebezpečné. Je lehčí než vzduch.

Technické údaje z hlediska bezpečnosti:

|                       |                                     |
|-----------------------|-------------------------------------|
| Teplota vznícení      | 630 °C                              |
| Spodní mez výbušnosti | 15 % obj.                           |
| Horní mez výbušnosti  | 28 % obj.                           |
| Kritická koncentrace  | 7,5 % obj. tj. 53 g.m <sup>-3</sup> |

Při manipulaci se všemi chladivými i teplotonosnými látkami je nutné používat osobní ochranné pracovní prostředky. Výrobci, dopravci, montážní i servisní firmy a provozovatelé musí evidovat každému chladivému i teplotonosné látce Bezpečnostní list, který musí obsahovat údaje o dané látce mimo jiné nebezpečnou koncentraci, hořlavost, výbušnost, vliv látky na lidský organismus atd.

### 6.3 Skupenská přeměna látek

Z přehledu pracovních látek pro chladicí techniku je patrné, že jsou důležité jejich termofyzikální vlastnosti, jako je tlak, teplota skupenské přeměny mezi tuhou a kapalnou a mezi kapalnou a plynnou (parní) fází, skupenská tepla těchto přeměn, měrné tepelné kapacity všech tří skupenství atd. Chladivem může být, jak bylo uvedeno, i voda. Přeměnu skupenství vody lze sledovat na grafické závislosti teplota vody – entalpie vody, obr. č.1.

Ohříváním nebo ochlazováním se skupenství látek mění. Ohříváme-li tuhou látku při konstantním tlaku (např. led), zvyšuje se její teplota, až dosáhne určité hodnoty (u vody při normálním barometrickém tlaku 0,101325 MPa je to 0 °C), kdy se tuhá látka začne přeměňovat na kapalinu (led taje). Bylo dosaženo bodu tání a látka mění své skupenství z tuhého na kapalné. I když se teplo do soustavy dále přivádí, teplota látky se nemění, dokud se poslední tuhá částice nepromění na kapalinu.

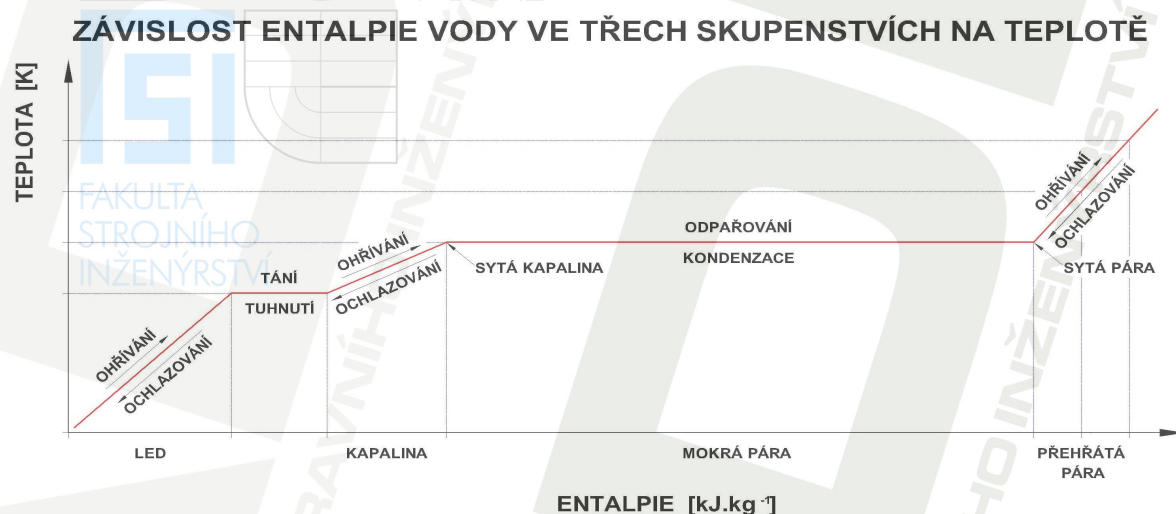
Množství tepla potřebné k přeměně 1 kg látky ze skupenství tuhého na kapalné se nazývá skupenské teplo tání (tavení). Stejně množství tepla je nutné kapalině odebrat, aby ze skupenství kapalného přešla do skupenství tuhého. Nemění-li se vnější podmínky, probíhá tuhnutí při stejné teplotě jako tání (u vody 0 °C). Teplota při tom zůstává na stejné hodnotě, dokud se poslední kapalná částice nepřemění na tuhou. Hovoříme o bodu tuhnutí. Skupenské teplo tání ledu při tlaku 0,101325 MPa je přibližně 335 kJ.kg<sup>-1</sup>. Pro srovnání skupenské teplo tání tuhého čpavku při stejném tlaku je přibližně 452 kJ.kg<sup>-1</sup>; teplota tání je -78 °C.

Po úplné přeměně tuhé látky na kapalinu s dalším ohříváním teplota kapaliny stoupá, až dosáhne určité hodnoty (u vody při normálním barometrickém tlaku 100 °C), kdy se začne přeměňovat na páru. Kapalina zahřátá na bod varu je tzv. sytá kapalina. Kapalina, přesněji mokrá pára (směs syté kapaliny a syté páry), mění své skupenství, ale její teplota, i když přijímá další teplo, nevzrůstá, a to tak dlouho, dokud se poslední kapalná částice nepromění na páru. Bylo dosaženo bodu varu. Pára při teplotě varu je tzv. sytá pára. Dalším ohříváním syté páry dostaneme páru přehřátou. Množství tepla potřebné k přeměně 1 kg syté kapaliny na sytou páru se nazývá skupenským teplem výparným. Stejně množství tepla je nutné páře odebrat, aby zpět zkondenzovala. Nemění-li se vnější podmínky, děje se zkapalňování při stejné teplotě jako vypařování (u vody při 100 °C.); tato teplota se nemění, dokud poslední plynná částice nezkapalní. Hovoříme o bodu zkapalnění (kondenzace). Výparné teplo vody při tlaku 0,101325 MPa je přibližně 2261 kJ.kg<sup>-1</sup>. Pro srovnání výparné teplo čpavku při stejném tlaku je 1369 kJ.kg<sup>-1</sup>; teplota varu je -33 °C.

Průběh ohřívání a ochlazování vody vyjadřuje graf na obrázku č. 1, ve kterém jsou zaznamenány změny teplot a skupenství vody v závislosti na množství přivedeného, resp. odvedeného tepla. Pro zjednodušení uvažujeme v oblastech led, kapalina a přehřátá pára lineární průběh, přestože ve skutečnosti přivedené, resp. odvedené teplo odpovídá určité teplotě, a tato závislost lineární není. Dále stojí za povšimnutí výrazný rozdíl hodnot entalpií mezi



oblasti *tání* – *tuhnutí* a oblasti *var* – *kondenzace*. Např. při ohřevu je potřebné množství tepla, které je nutné dodat do soustavy pro odpaření vody několikanásobně větší, než množství tepla potřebné na roztátí stejného množství ledu. Podobně je tomu i u jiných chladiv, např. čpavku.



Obr. 1. Změna skupenství vody

[8]

Známa a důležitá je ještě jedna skupenská přeměna, tzv. sublimace, kdy zahříváním tuhé látky vzniká přímo látka plynná. Např. tuhý kysličník uhličitý se zahříváním při normálním barometrickém tlaku mění přímo v plynný kysličník uhličitý. Teplota sublimace je  $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$ , sublimační teplo je přibližně  $586\text{ kJ.kg}^{-1}$ .

Ve strojním chlazení má největší význam změna kapaliny na páru a páry na kapalinu, tedy vypařování a zkapalňování (srážení, kondenzace).

#### 6.4. Vztah mezi tlakem a teplotou sytých par

Je znám následující fyzikální úkaz: voda na kterou působí nižší tlak než atmosférický, vře při teplotě nižší než  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Například poklesne-li tlak na  $0,07011\text{ MPa}$ , vře voda již při  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Naopak vzroste-li tlak, bude teplota varu vyšší než  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Vzroste-li tlak na  $0,19854\text{ MPa}$ , vře voda při teplotě  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Obdobně je tomu při zkapalňování. Kondenzační teplota, tj. teplota, při níž se sytá pára mění na kapalinu, závisí na tlaku sytých par. Například má-li sytá vodní pára tlak  $0,07011\text{ MPa}$ , kondenzuje při teplotě  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; naopak je-li tlak syté vodní páry  $0,19854\text{ MPa}$ , dochází ke kondenzaci při teplotě  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

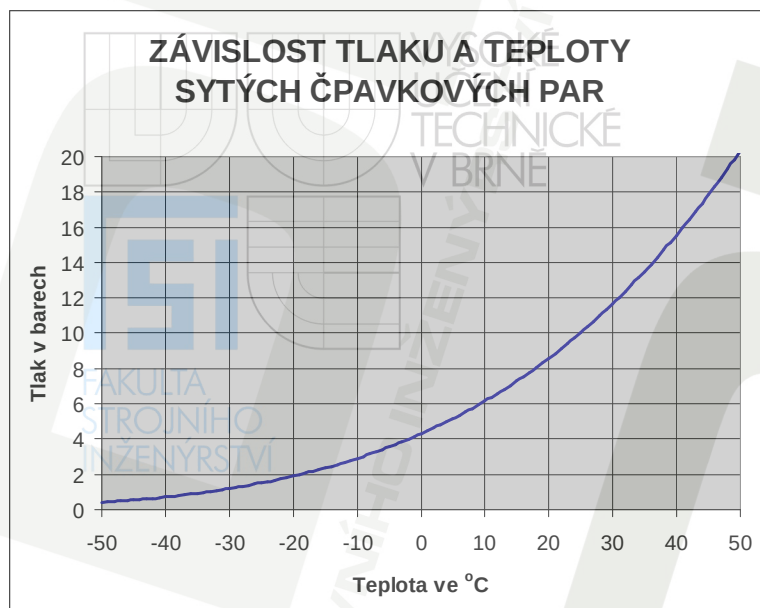
Změnou tlaku se mění teplota skupenské přeměny, ale také skupenské teplo přeměny. Nejvýrazněji se projevuje vliv tlaku na teplotu při změně kapaliny na páru a páry na kapalinu, tedy při varu a kondenzaci. Je to dáno hodnotou výparného (kondenzačního) tepla. Snižováním tlaku se snižuje teplota varu nebo teplota kondenzace, zvyšováním tlaku se teplota varu nebo kondenzace zvyšuje. Skupenské teplo s narůstajícím tlakem naopak klesá.

Syté páry vznikající při vypařování anebo syté páry právě kondenzující mají stejnou teplotu jako je teplota varu nebo kondenzace (při stejných vnějších podmínkách). Proto lze konstatovat, že teplota sytých par je závislá na tlaku. Pro každou látku je tento vztah neměnný.

Pro různé látky budou tyto závislosti různé, jak už bylo možné porovnat u vody a čpavku - při tlaku  $0,101325\text{ MPa}$  se voda vypařuje při  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , zatímco čpavek při  $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ale zákonitost je stejná.

Pracovní látky chladicích zařízení – chladiva – se řídí stejnou zákonitostí. Teplota sytých par chladiv závisí na tlaku; čím větší je tlak, tím vyšší je teplota sytých par a naopak. Závislost mezi tlakem a teplotou sytých par (skupenské přeměny) čpavku je znázorněna na obr. 2.





Obr. 2. Závislost mezi tlakem a teplotou sytých čpavkových par

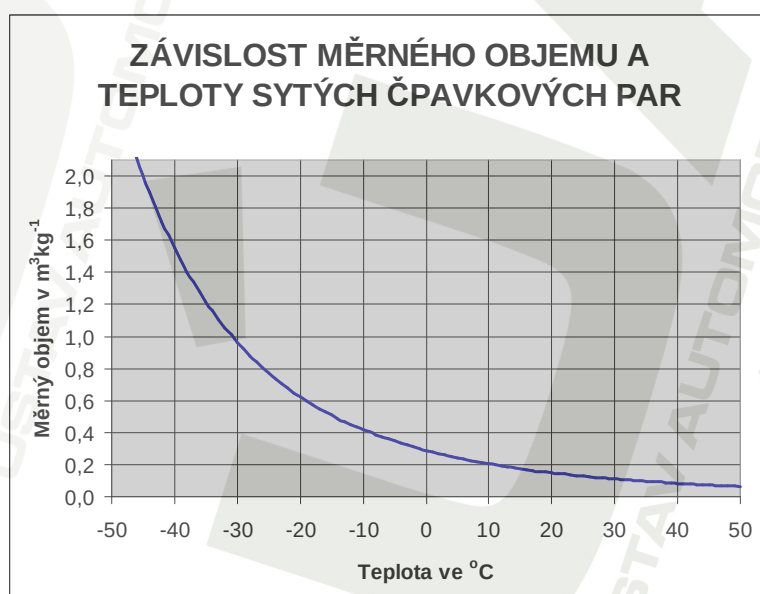
[6]

### 6.5 Vztah mezi měrným objemem a teplotou sytých par

Předpokládejme, že ve válci s pístem je uzavřena kapalina, např. voda. Na píst působí stále stejná síla (píst je zatížen závažím) a válec je zespodu zahříván. Zahříváním teplota vody stoupá, až dosáhne bodu varu. Objem vody se zvýší pouze nepatrně. Jakmile se začne voda vypařovat, objem směsi kapaliny a páry (mokrý páry) se zvětšuje mnohem rychleji. V okamžiku, kdy se poslední částice kapaliny odpaří, vznikne sytá pára, jejíž objem je větší než objem mokré páry. Dalším zahříváním po úplném odpaření teplota páry vzroste a vznikne pára přehřátá, jejíž objem se zvětšuje s narůstající teplotou. Závaží pístu zajistí konstantní tlak v průběhu celého procesu.

Jestliže objem sytých par závisí na tlaku a přitom velikost tlaku určuje teplotu sytých par, potom tyto dvě závislosti lze shrnout v jednu: Objem sytých par závisí na jejich teplotě. Čím vyšší bude teplota sytých par, tím menší bude jejich měrný objem a naopak. Pro různé látky je tato závislost různá, ale zákonitost zůstává stejná; platí proto také i pro jiná chladiva.

Závislost mezi měrným objemem a teplotou sytých par čpavku je znázorněna na obrázku 3.



Obr. 3. Závislost mezi měrným objemem a teplotou sytých čpavkových par

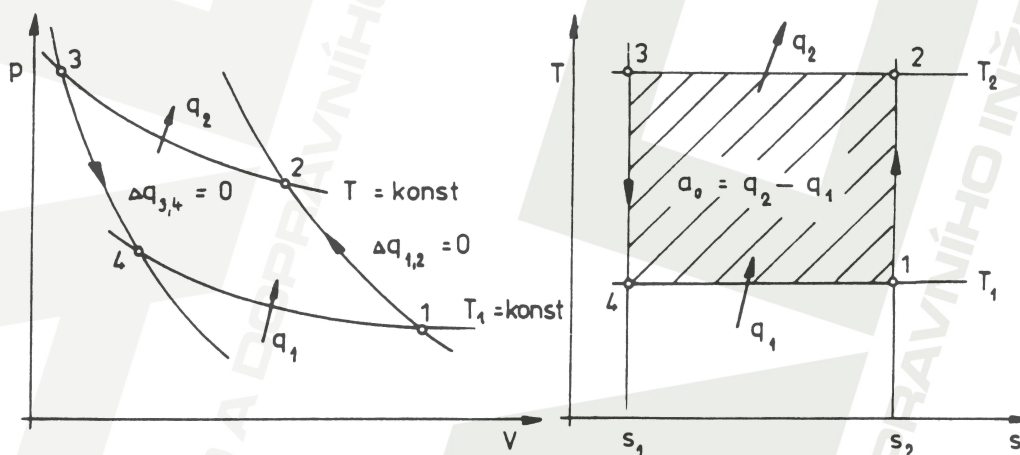
[6]

## 7. LEVOTOČIVÉ TERMODYNAMICKÉ OBĚHY

Teoretický základ čerpá chladicí technika z poznatků technické termomechaniky. Chladicí oběhy jsou levotočivé termodynamické cykly. Obecně je tento cyklus definován jako uzavřený děj, při kterém pracovní látka prochází řadou termodynamických dějů. Probíhají proti směru hodinových ručiček a pro jejich činnost je nutno práci přivádět.

### 7.1 Carnotův oběh

Pro možnost porovnání hospodárnosti provozu tepelných pracovních strojů, jako jsou chladicí zařízení a tepelná čerpadla, slouží obrácený (levotočivý) Carnotův cyklus. Na obr. 4 je znázorněn v diagramu p-V a T-s.



Obr. 4. Levotočivý Carnotův cyklus

[4]

Pro chladicí techniku je jako referenční cyklus sestaven ze čtyř termodynamických vratných změn:

- 1 – 2 adiabatická komprese
- 2 – 3 izotermická komprese
- 3 – 4 adiabatická expanze
- 4 – 1 izotermická expanze

Při nízké teplotě  $T_1$  pracovní látka přijímá teplo  $q_1$  a po stlačení je při vyšší teplotě  $T_2$  teplo odváděno pracovní látce z cyklu. Tepelné toky  $q_1$  a  $q_2$  lze v souladu s grafem T-s vyjádřit pomocí absolutních teplot:

$$q_1 = T_1(s_2 - s_1) \quad (11)$$

$$\text{a} \quad q_2 = T_2(s_2 - s_1) \quad (12)$$

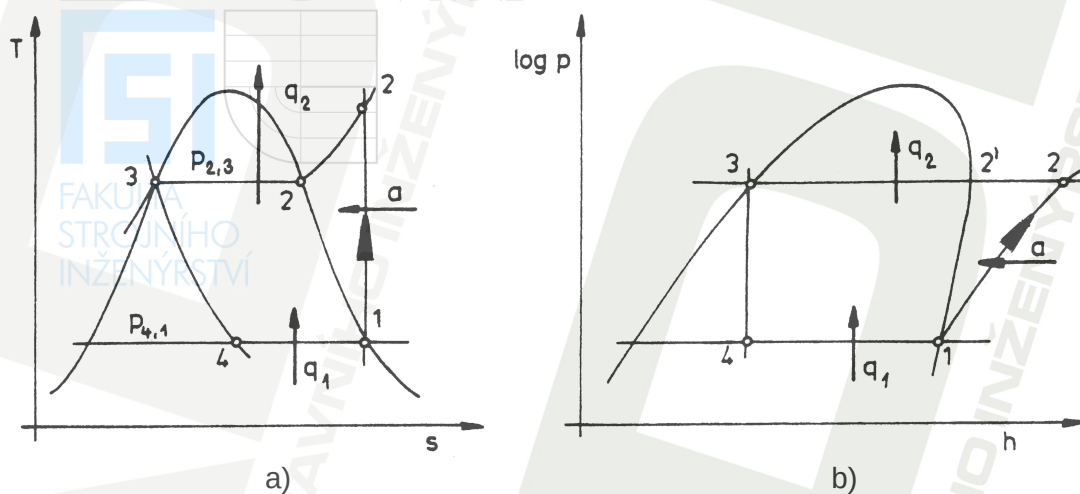
Chladicí faktor je potom dán vztahem:

$$\varepsilon_c = \frac{q_1}{q_2 - q_1} = \frac{T_1(s_2 - s_1)}{T_2(s_2 - s_1) - T_1(s_2 - s_1)} = \frac{T_1}{T_2 - T_1} \quad (13)$$

Pozn.: Je použito obvyklé konvence: teplo  $q_1$  pracovní látce přivedené je kladné a teplo  $q_2$  pracovní látce odvedené je záporné. Také práce  $a_0$  pracovní látce dodaná je záporná.

### 7.2 Rankin – Clausiův oběh

Levotočivý Rankin – Clausiův oběh je teoretickým základem pro chladicí systémy s vypařováním chladiva a kompresorem. Jeho princip je zřejmý z obr. 5.



Obr. 5. Levotočivý Rankin – Clausiův oběh

[4]

Rankin – Clausiův oběh je složen ze čtyř termodynamických změn:

- 1 – 2 adiabatická komprese
- 2 – 3 ochlazování a kondenzace
- 3 – 4 izoentaltické škrcení
- 4 – 1 vypařování

Na obr. 5b) je překreslen diagram do souřadnicového systému  $\log p - h$ , který je typický pro použití v chladicí technice. V tomto případě lze chladicí faktor vyjádřit pomocí rozdílu entalpií:

$$\varepsilon_R = \frac{q_1}{a} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (14)$$

kde  $a$  je práce adiabatické komprese dodaná pracovní látce

### 7.3 Škrcení

Pro ucelený obraz o pochodech v chladicím zařízení, je nutné objasnit ještě jeden fyzikální úkaz, se kterým se setkáváme ve strojním chlazení. Stlačujeme-li páry nebo plyn, stoupá teplota stlačované látky, její objem se zmenšuje a tlak roste. Uvažujme opačný případ. Stlačené páry nebo plyn necháme náhle rozepnout na větší objem tím, že je vpustíme do většího prostoru. Při rozpínání (neboli expanzi) se zvětší objem, klesne tlak a sníží se teplota.

Obdobně je tomu u kapalin, ovšem poněkud v odlišné formě, protože kapalina je prakticky nestlačitelná. Zvětšování objemu kapaliny při rozpínání je omezené, avšak nastává přitom jiný úkaz. Při expanzi se část kapaliny odpařuje, takže větší prostor, do něhož kapalina proudí, se zaplní směsí kapaliny a páry neboli mokrou párou. Náhlý přechod vysoce stlačené kapaliny s vysokou teplotou do zvětšeného prostoru se projeví zmíněným odpařením určitého procenta kapaliny za současného poklesu tlaku a snížení teploty.

V chladicím zařízení přechází kapalina z velkého tlaku a vysoké teploty na malý tlak a nízkou teplotu tak, že se kapalně chladivo přivádí zúženým otvorem ventilu do většího prostoru. Průchod zúženým otvorem a náhlé rozepnutí se označuje jako škrcení kapaliny. Škrcení

probíhá ve škrtícím ventilu (expanzním ventilu, regulačním ventilu). Nastavením škrtícího ventilu se reguluje průběh škrcení.

Čím větší je rozdíl tlaků a teplot před škrcením a po něm, tím více kapaliny se odpaří. Na množství odpařené kapaliny má mnohem větší vliv teplota než tlak. Zregulujeme-li například dvě čpavkové kapaliny, jejichž počáteční tlak je stejně vysoký, jedna z nich má však vyšší teplotu na stejně nízký tlak a teplotu, nastane větší odpaření při škrcení u kapaliny s vyšší počáteční teplotou. Z tohoto důvodu je nutné snížit teplotu kapalného chladiva před škrtícím ventilem, aby se snížilo procento odpařené kapaliny ve škrtícím ventilu, a tím i ztráty.

## 8. DRUHY A PRINCIPY CHLAZENÍ

### 8.1 Chlazení bez strojního zařízení

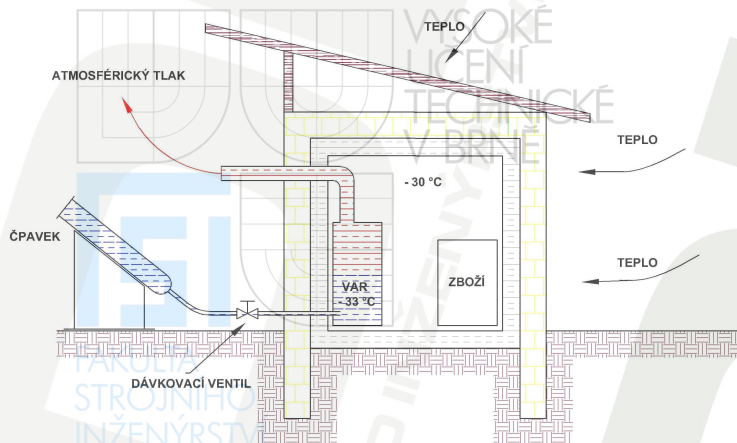
Bez strojního zařízení lze chladit zboží přírodním nebo umělým ledem. Je to nejstarší způsob využití chladu k uchovávání potravin. Tající led odebírá teplo svému okolí a tím ochlazuje vzduch a uložené zboží. Nevýhodou tohoto způsobu chlazení je značná vlhkost vzduchu a relativně vysoká teplota (vyšší než 0 °C), kterou nelze regulovat. V současné době se používá chlazení ledem pouze v drobných distribučních ledničkách a při přepravě potravin v chlazených vozech.

Nižší teploty lze dosáhnout použitím chladicích směsí. Například směs vody a kuchyňské soli v určitém poměru taje při teplotě až -20 °C. Nevýhodou je značná vlhkost, nečistota a korozivní účinky kuchyňské soli. Chladicích směsí existuje celá řada. Prakticky se používají pouze v laboratořích pro získání nižších teplot, případně jako teponosných látek v chladicích systémech s nepřímým chlazením.

V distribuci a při přepravě v chlazených vozech se používá pro zchlazování zboží na nízké teploty suchý led. Je to je tuhý kysličník uhličitý, který sublimuje při teplotě - 78 °C. Vyrábí se ovšem opět strojně a jeho výroba je poměrně drahá. Výhodou je nízká teplota, vysoká čistota a malá vlhkost vzduchu vychlazeného prostoru. Chlazení suchým ledem se používá tam, kde jsou požadovány nízké teploty pouze krátkodobě a kde by byla stavba strojního zařízení z ekonomického hlediska nevýhodná. Tedy převážně v distribuci, případně dálkové přepravě zboží.

Další možnost chlazení bez strojního zařízení je zobrazena na obr. 6. V uzavřeném, izolovaném prostoru je umístěna nádoba s kapalným čpavkem. Nádoba je spojena potrubím s venkovní atmosférou. Čpavek, který přijímá teplo ze vzduchu v místnosti a z uloženého zboží, se začne odpařovat při teplotě - 33 °C (na hladinu čpavku působí atmosférický tlak). Po dostatečně dlouhé době se postupným odnímáním tepla vychladí vzduch i zboží na teplotu blízkou se - 33 °C. Protože však do místnosti soustavně proniká stěnami, stropem i podlahou další teplo, které znovu otepluje vzduch i uložené zboží, je nutné nádobu neustále doplňovat novým kapalným čpavkem (odpařováním a únikem čpavku do atmosféry se totiž zásoba čpavku v nádobě postupně zmenšuje). Tento způsob chlazení nelze použít. Je popsán pouze jako další princip chlazení. Kromě toho, že by čpavkové páry značně obtěžovaly okolní prostor, byl by tento způsob chlazení neekonomický.





Obr. 6. Bezkompresní chlazení

[8]

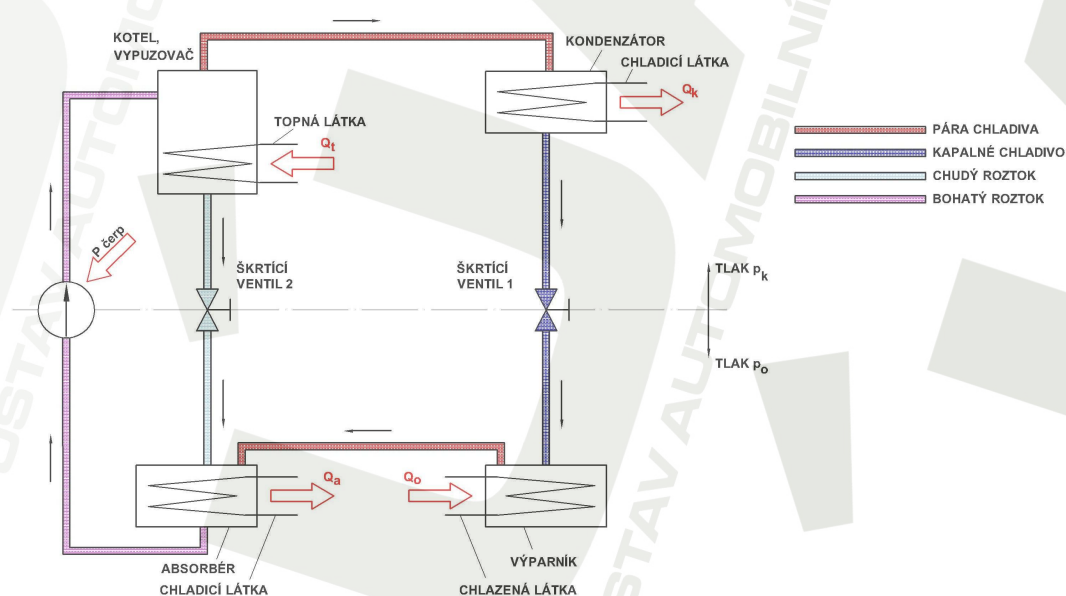
## 8.2 Způsoby strojního chlazení

Aby bylo možné odpařené chladivo, např. čpavek zmíněný v předchozím případě, znovu použít, je nutné zkonstruovat strojní zařízení, které umožní přeměnit čpavkové páry zpět na kapalinu, tedy zařízení s uzavřeným okruhem. Pomocí takového zařízení lze navíc regulovat teplotu podle potřeby i upravovat vlhkost vzduchu. Přes vysoké počáteční investice za strojní vybavení, měřicí a regulační přístroje a další instalaci je strojní výroba chladu ekonomická a relativně levná.

Chladicí systémy mohou být různého druhu. Nejrozšířenější jsou však dva: absorpční a kompresní.

### 8.2.1 Absorpční chladicí zařízení

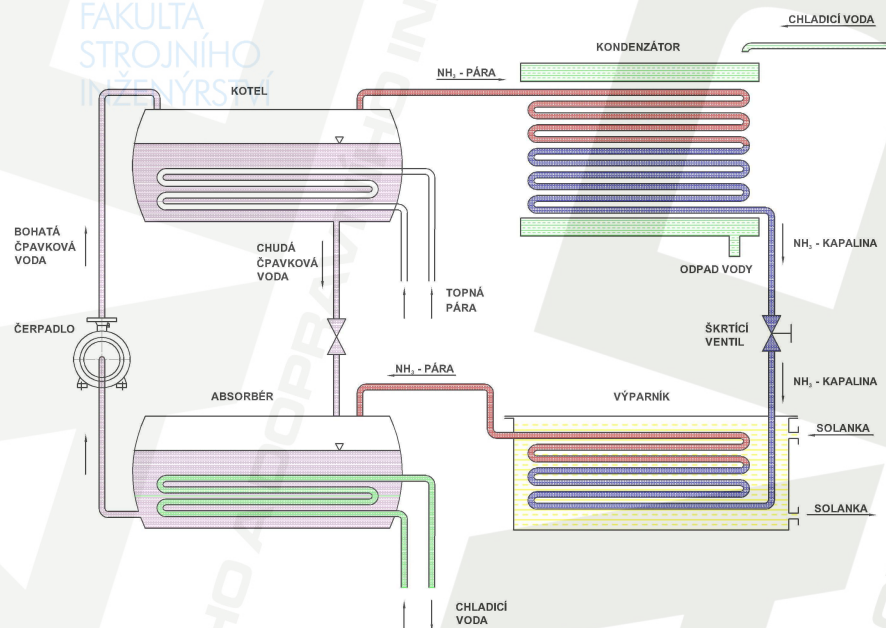
Absorpční chladicí zařízení se skládá z výparníku, absorbéru, čerpadla, kotle, srážníku (kondenzátoru) a regulačního ventilu (viz obr. 7). Při absorpčním chlazení obíhají v zařízení dvě látky: chladivo a absorpční látka. Obvykle se používá čpavek (chladivo) a voda (absorpční látka), případně bromit lithný a voda.



Obr. 7. Schema absorpčního oběhu

[3]

Příklad reálného provedení je na obr. 8. Čpavkové páry vyvíjené ve výparníku (čpavek přijímá teplo ze solanky) při nízkém tlaku a nízké teplotě vstupují do absorbéru, kde jsou pohlcovány vodou. Aby se pohltivost zvětšila, ochlazuje se absorbér chladicím systémem, kterým protéká studená voda. Voda nasycená čpavkem se z absorbéru přečerpává čerpadlem do kotle. V kotli se čpavek z vody vypudí zahříváním topnou párou. Vypuzené čpavkové páry o vyšším tlaku a vyšší teplotě vstupují do kondenzátoru, kde ochlazením zkapalní. V regulačním ventilu se změní vysoký tlak a vysoká teplota kapalného čpavku na malý tlak a nízkou teplotu, které jsou ve výparníku, kam zregulovaná kapalina vtéká. Čpavková voda z kotle, chudá na čpavek, se přepouští zvláštním potrubím zpět do absorbéru.



Obr. 8. Absorpční chladicí zařízení

[8]

### 8.2.2 Kompresní chladicí zařízení

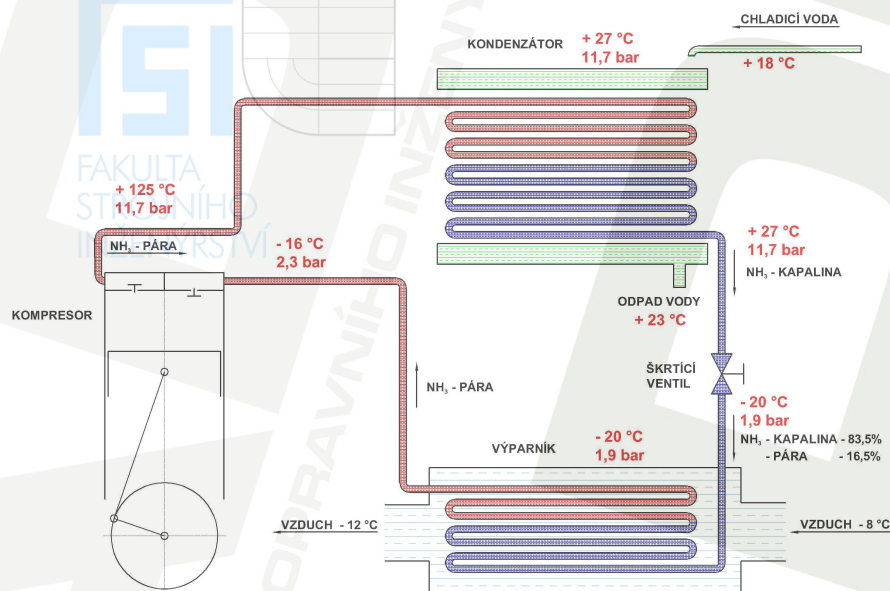
Strojní chlazení je založeno na odpařování a kondenzaci kapalného chladiva. K této skupenské přeměně je zapotřebí velkého množství tepla. Kromě toho mají používaná chladiva při tlacích blízkých tlaku atmosférickému teplotu varu hluboko pod 0 °C. Chladivo nepřetržitě obíhá v zařízení.

Kompresní chladicí zařízení se skládá z výparníku, kompresoru, kondenzátoru a regulačního ventilu (viz obr. 9). V tomto zařízení probíhá Rankin-Clausiusův chladicí cyklus zmíněný v odst.6.

Ve výparníku, který je uzavřenou nádobou, se při nízkém tlaku a nízké teplotě vytvářejí čpavkové páry (čpavek přijímá teplo ze solanky, od zboží, od proudícího vzduchu). Páry jsou kompresorem při nízkém tlaku nasávány a následně stlačeny na tlak několikanásobně vyšší a stejným zdvihem kompresoru jsou stlačené páry přepuštěny do kondenzátoru (srážníku). Kondenzátor je trvale ochlazován vodní sprchou, případně vzduchem nebo kombinací voda – vzduch. Voda odnímá stlačeným parám teplo přijaté ve výparníku i teplo vzniklé kompresí par. Ochlazení je natolik intenzivní, že se dosáhne kondenzační teploty a čpavkové páry zkapalní. Vzhledem k tomu, že se kompresí značně zvýší tlak, stačí ke zchlazení na mez sytosti a ke zkapalnění teplota mnohem vyšší, než která je ve výparníku.

Kapalný čpavek (tlak i teplota jsou vysoké) je přiveden do regulačního ventilu, kde se seškrtí na tlak a teplotu, které jsou ve výparníku a vznikne mokrá pára čpavku. Sytá kapalina jako

její složka se při konstantní teplotě odpařuje. Až se čpavek zcela promění na sytou páru, která může být případně ještě přehřátá, je znovu nasáván kompresorem a okruh je uzavřen. Příklad reálného zařízení se čpavkem jako chladivem včetně uvedení informativních teplot a tlaků v jednotlivých uzlech je znázorněn na obr. 9.



Obr. 9. Kompresní chladicí zařízení

[8]

Údaje uvedené na obrázku odpovídají pouze danému příkladu. Za jiných provozních poměrů se změny všechny hodnoty teplot i tlaků v celém chladicím okruhu. Ke znázornění výparníku a kondenzátoru je zde použito hadovitých systémů trubek, aby teplosměnná plocha byla co největší a v mezích technických možností co nejúčinnější.

V chladicím zařízení zobrazeném na obr. 9 se čpavek odpařuje ve výparníku při teplotě přibližně  $-20\text{ °C}$ , které odpovídá tlak  $1,9\text{ bar}$ . Vzduch na vstupu do výparníku o teplotě  $-8\text{ °C}$  proudí přes soustavu trubek výparníku, ve kterých se odpařují páry čpavku a tím se vzduch ochladí přibližně na teplotu  $-12\text{ °C}$ . Mokrý pára čpavku o tlaku  $1,9\text{ bar}$  a teplotě  $-20\text{ °C}$  se ve výparníku přemění na sytou a posléze přehřátou páru (tlak  $2,3\text{ bar}$ , teplota  $-16\text{ °C}$ ), kterou nasává kompresor. V kompresoru se čpavkové páry stlačí na  $11,7\text{ bar}$ , teplota vzroste na  $+125\text{ °C}$ . Kompresor vytlačuje páry značně přehřáté (tlaku  $11,7\text{ bar}$  neodpovídá teplota sytých par  $+125\text{ °C}$ , ale  $+27\text{ °C}$ ). Za tohoto stavu přicházejí páry do kondenzátoru, který je chlazen vodou o teplotě  $+18\text{ °C}$ . Voda odejme parám nejprve teplo přehřívací a ochladí je na mez sytosti, tj. na teplotu kondenzační, která je v tomto případě  $+27\text{ °C}$ . Dalším odnímáním tepla se teplota nemění, protože páry kondenzují. Teplota chladicí vody při tomto procesu vzroste na teplotu přibližně  $+23\text{ °C}$  a je odváděna z kondenzátoru. Kapalný čpavek se shromažďuje ve spodní části kondenzátoru, odkud je odváděn do regulačního ventilu. V něm se škrcením změny tlak a teplota kapalného čpavku ze stavu kondenzátorového na stav výparníkový. Přitom se přibližně  $16,5\%$  kapaliny odpaří přímo v regulačním ventilu a páry projdou výparníkem bez užitku. Zbývajících  $83,5\%$  kapaliny se odpaří ve výparníku přijímáním tepla z okolního prostředí.

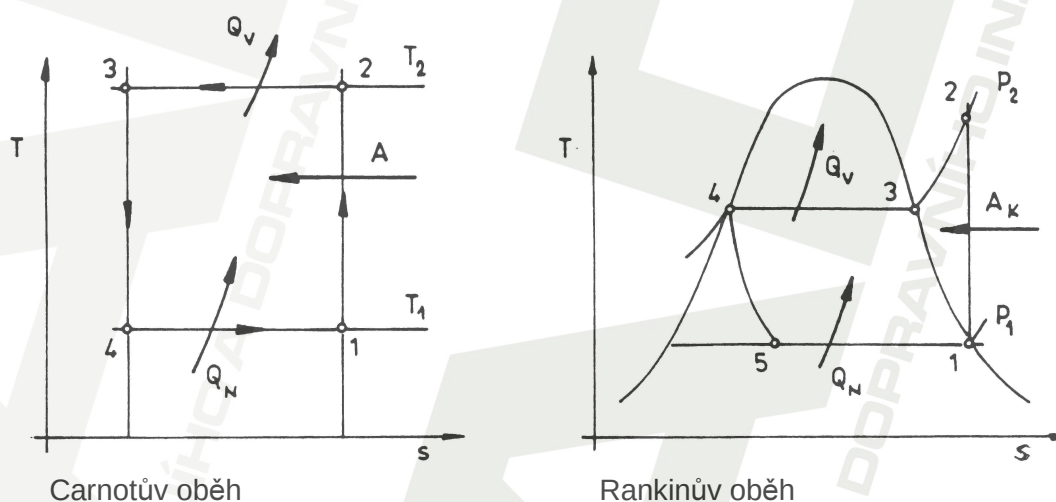
Systém chladicího zařízení, jehož hlavními uzly jsou výparník, kompresor, kondenzátor a škrtící ventil je nutné doplnit ještě dalšími přístroji, které zvyšují ekonomičnost, zajišťují bezpečnost a usnadňují chod a obsluhu celého zařízení. Tyto přístroje a pomocná zařízení jsou důležitým a nutným doplňkem moderních chladírensko-mrazírenských objektů.



### 8.2.3 Tepelná čerpadla

Na možnost využití chladicího cyklu pro vytápění upozornil již v roce 1852 skotský matematik a fyzik William Thomson (povýšen do šlechtického stavu pod jménem lord Kelvin). První realizace byla provedena až po 75 letech, první pokusy s tepelnými čerpadly u nás se objevily až v letech po druhé světové válce. V současné době se tepelná čerpadla řadí mezi alternativní zdroje energie.

Fyzikální princip tepelného čerpadla je shodný s principem chladicích oběhů. Cílem je převádět teplo z nízké teplotní hladiny na vyšší teplotní hladinu, což je možné pouze přiváděním další energie. Tepelná čerpadla jsou tedy zařízení pracující s některým z chladicích oběhů, u nichž je za užitečné považováno teplo ze zařízení odváděné, které je rovno součtu tepla do zařízení přiváděného a nutně přiváděné energie. Nejjednodušší je ilustrace činnosti tepelného čerpadla na jednostupňovém chladicím oběhu s kompresorem a vypařováním chladiva. Termodynamicky lze oběh znázornit Carnotovým nebo Rankinovým oběhem viz obr. 10.

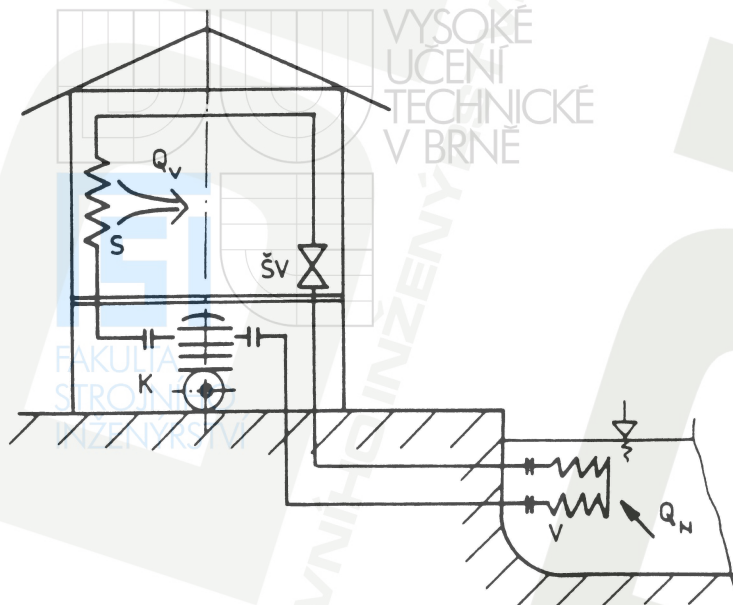


Obr. 10. Tepelné diagramy tepelného čerpadla

[4]

Carnotův oběh předpokládá sdílení tepla z vnějšího nízkoteplotního zdroje  $Q_N$  do pracovní látky. Po kompresi, kdy se látce předá kompresní teplo, je možné získat z cyklu teplo  $Q_V$  při značně vyšší teplotě. V případě jednostupňového chladicího oběhu, který pracuje v souladu s oběhem podle Rankina je situace analogická. Chladivo se při nízkém tlaku a nízké teplotě vypařuje, k čemuž je potřeba teplo  $Q_N$ . Po kompresi nízkého tlaku  $p_1$  na tlak  $p_2$  může nastat využití kondenzačního tepla. Na obr. 11 je vyznačeno možné vytápění domku teplem, které se získá z jezerní vody.





Obr. 11. Aplikace tepelného čerpadla

[4]

Základními prvky tepelného čerpadla jsou, stejně jako u chladicího oběhu kompresor K, kondenzátor S, škrťací ventil ŠV a výparník V. Nízkoteplotní teplo z vody  $Q_N$  se sdílí do vypařujícího se chladiva. Po kompresi nastává kondenzace a teplo  $Q_v$  se uvolňuje a ohřívá okolní vzduch. Prostup tepla lze zvýšit použitím ventilátoru.

Analogicky jako v případě chladicího oběhu, kdy byl definován chladicí faktor, je u tepelného čerpadla zaveden tzv. topný faktor. Je to poměr získaného tepla k potřebné kompresní práci.

$$\varepsilon_t = \frac{Q_v}{A_k} \quad (15)$$

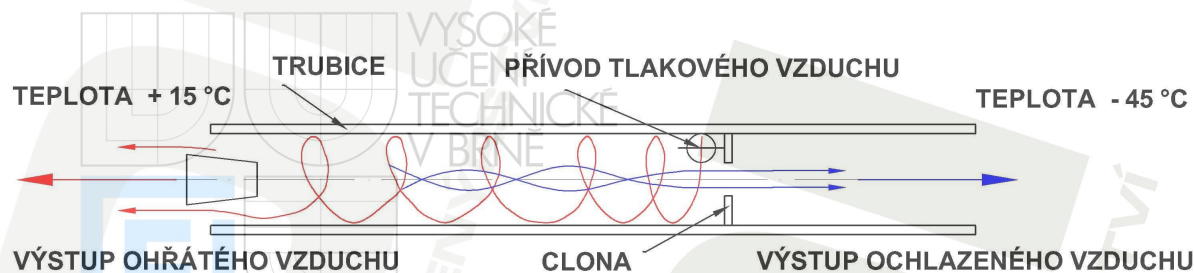
Průmyslové využití principu tepelného čerpadla závisí na celkovém ekonomickém posouzení konkrétního případu. Energetické bilance jsou výhodné v případech využívání odpadního tepla nebo využívání geotermální, případně solární energie.

### 8.3 OSTATNÍ ZPŮSOBY CHLAZENÍ

V této části jsou uvedeny způsoby chlazení, které nejsou založeny na tepelných obězích, ale na jevech v tekutinách nebo tuhých látkách v elektrickém poli. Jejich použití je dáno účelem, výkonem, případně teplotní oblastí.

#### 8.3.1 Vírová trubice

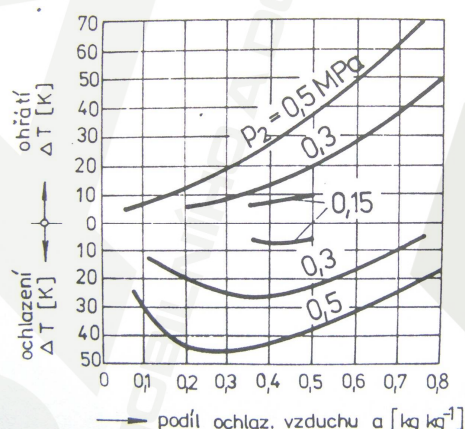
G.J. Ranque zjistil při proměřování cyklonových odlučovačů prachu rozdíly teplot v různých částech odlučovače. Na základě těchto měření sestrojil vírovou trubici. Princip je následující: zavede-li se do válcové trubice (viz obr. 12) tangenciálně proud stlačeného vzduchu, rozvrství se vzduch při průtoku do dvou proudů: obvodového, který se ohřívá a vytéká na „teplém“ konci (na obr. červeně) a osového, který se ochlazuje a vytéká na „studeném“ konci po průchodu clonou (na obr. modře).



Obr. 12. Vírová trubice

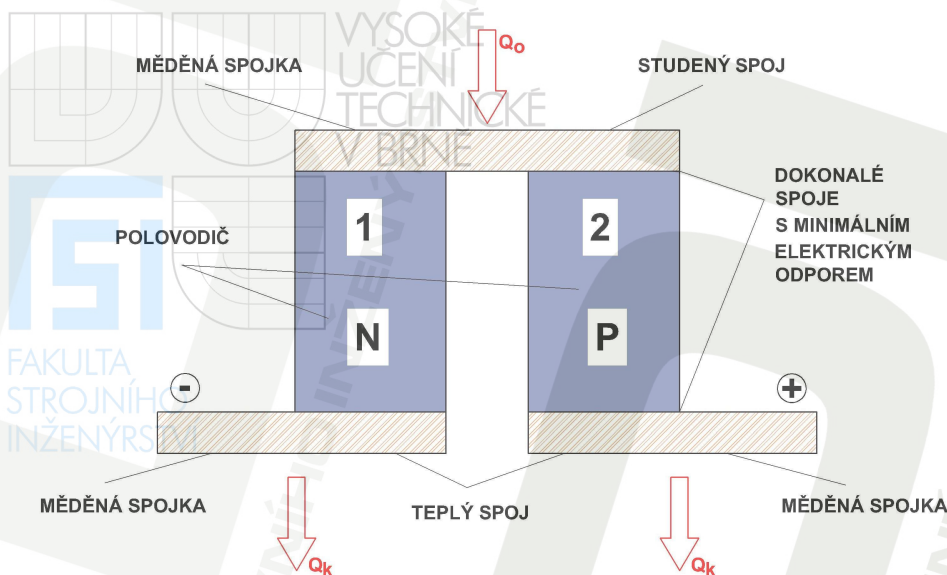
[3]

Teorie vlastního pochodu je velice složitá. Jedno z možných vysvětlení vychází z teorie zbrzdování vnitřních a urychlování vnějších obvodových úhlových rychlostí a s tím spojeného odstředivého toku energie. Pokusy se vzduchem v trubici o vnitřním průměru  $d = 16 \text{ mm}$  přinesly v závislosti na tlaku přiváděného vzduchu  $p_2$  výsledky, které jsou zaneseny do grafu na obr 13, kde „a“ je podíl vzduchu vycházejícího ze studeného konce a  $\Delta T$  je rozdíl teploty vystupujícího vzduchu proti teplotě vstupujícího vzduchu. Chladicí faktor je následkem nevratnosti pochodu velmi nízký. Z těchto důvodů má vírová trubice uplatnění pouze v případech, kdy její jednoduchost a mobilita převáží nevýhody energetické nehospodárnosti.


Obr. 13. Graf závislosti vstupního tlaku, podílu ochlazovaného vzduchu a  $\Delta T$  [3]

### 8.3.2 Termoelektrické chlazení

Princip termoelektrického chlazení spočívá ve využití jevu, který objevil v roce 1834 Jean Charles Athanase Peltier. Po něm je tento jev i nazván. Protéká-li elektrický proud nehomogenním vodivým obvodem, vzniká na jednom ze spojů ohřev a na druhém ochlazení. Na využití Peltierova jevu pro chlazení poukázal v roce 1911 Edmund Altenkirch, který vypracoval základní teorii. Teprve objevem polovodičů byly položeny základy pro praktické využití. Fyzikální podstatou Peltierova jevu je působení elektrického pole na pohyb elektronů při jejich přechodu z vyšší energetické hladiny na nižší se přebytek energie vybavuje na příslušném rozhraní (spoji) ve formě tepla, na druhém nedostatek energie ve formě ochlazení. Na obr. 14 je zobrazeno jednoduché schéma zapojení.



Obr. 14. Schema zapojení Peltierova článku

[3]

Polovodičové články (P a N) jsou navzájem spojeny měděnými destičkami připojenými ke sloupkům s minimálním elektrickým odporem. Průtokem stejnosměrného proudu 10 až 25 A o nízkém napětí vzniká na studeném spoji ochlazení. Pro ilustraci je na obr. 15 fotografie Peltierova článku.



Obr. 15. Peltierův článek

[13]

Důležitým kritériem pro posouzení účinnosti Peltierova článku je chladicí faktor definovaný poměrem chladicího výkonu na chladné straně  $Q_0$  a vynaložené energie  $W$ :

$$\varepsilon = \frac{Q_0}{W} \quad (16)$$

Chladicí faktor je závislý na vlastnostech polovodičů, je však obecně velmi nízký. Na druhou stranu je třeba zmínit i přednosti tohoto zařízení. Je levnější, kompaktnější, bez pohyblivých částí, nevyžadují údržbu.

## 9. ZÁVĚR

Bakalářská práce se nejprve zabývá historií chlazení, oblastmi jeho použití a přehledem hlavních chladicích metod. Podrobněji pojednává o pracovních látkách v chladicí technice, o jejich vlastnostech s ohledem na jejich dnes tolik diskutovaný dopad na životní prostředí; poškozování ozonové vrstvy a vliv na klimatické změny. Nejvíce si všímá vlastností čpavku. V odst. 7 je předkládán stručný termodynamický výklad srovnávacího chladicího cyklu Carnotova a cyklu Rankin - Clausiova včetně definice jejich chladicích faktorů.

Z řady principů chladicích zařízení se autor v další části práce zaměřuje zvláště na čpavkové chladicí zařízení, a to ze dvou důvodů:

1. Převážná část průmyslových chladicích zařízení (masozávody, mrazírny, mlékárny, masozávody, pivovary, sladovny, zimní stadiony atd.) je provozována právě se čpavkem jako chladivem.

2. Společnost, u které autor pracuje, se zabývá přesně touto oblastí průmyslového chlazení, a to dodávkami kompresorů, odpařovacích kondenzátorů, výparníků, uzavíracích, regulačních a řídicích ventilů, měřicích a regulačních přístrojů a ostatních komponentů, které zajišťují bezpečnost a spolehlivost chladicích okruhů a v neposlední řadě i snižování energetické náročnosti.

Bakalářská práce by tedy měla být návodem pro korektní a zasvěcené jednání s každým potenciálním zákazníkem společnosti včetně zdůvodnění, proč je čpavek použit jako pracovní látka. O vlastnostech čpavku bylo pojednáno v odst.6. Je vhodné zopakovat jeho dvě hlavní nevýhody - výbušnost a jedovatost. Ovšem výbušnost je „pouze „ v mezích 15 až 28 % objemových jednotek. Co se týká jedovatosti, patří čpavek mezi nejedovatější chladiva. Vyznačuje se nesnesitelným zápachem a to již v koncentracích výrazně nižších, než jsou zdraví nebo dokonce životu nebezpečné. To je významné varování snižující nebezpečí.

Čpavek (díky svým vlastnostem a nízkým výrobním nákladům) doznal od prvního použití v 80. letech 19. století prudký rozmach v oblasti průmyslového chlazení. Vlastnosti, nízké výrobní náklady, spolu se skutečností, že čpavek je ekologické chladivo (nepoškozuje ozonovou vrstvu a nemá vliv na klimatické změny) jsou výhody, které výrazně převažují nad zmíněnými nevýhodami. Pokud je zařízení se čpavkem vyrobeno, namontováno a dále provozováno v souladu s požadovanými předpisy a kvalifikovanou obsluhou, je toto zařízení bezpečné.

Práce dále popisuje princip tepelného čerpadla, ve kterém se vlastně také uplatní chladicí cyklus, i když v tomto případě se klade důraz na jeho tepelný faktor, t.j. na velikost tepla, které je odvedeno chladivu v kondenzátoru.

Z ostatních způsobů chlazení autor ještě pojednal o principu vírové trubice a principu termoelektrického chlazení včetně jeho chladicího faktoru.

Pojednání o dalších chladicích metodách uvedených v odst.5 by již bylo podle stanoviska vedoucího bakalářské práce nad rámec jejího zadání.

Průmyslová chladicí zařízení jsou nedílnou součástí našeho života. S vývojem nových řídicích a kontrolních prvků zařízení se postupně snižuje jejich energetické zatížení a negativní vliv na životní prostředí.



## 10. SEZNAM ODBORNÉ LITERATURY

- [1] BÄCKSTRÖM, Matts. *Technika chlazení*.  
1. vyd. SNTL 1959. 680 s. Číslo publikace 3174. Typové číslo L 12-B3-4-II/2282.
- [2] DVOŘÁK, Zdeněk. *Chladicí technika I*.  
2. vyd. Praha: ČVUT 1975. 344 s. Fakulta strojní.
- [3] DVOŘÁK, Zdeněk. *Základy chladicí techniky*.  
Praha: ČVUT 1982. 218 s. Fakulta strojní. Číslo publikace 4206.
- [4] HOCH, Václav. *Chladicí technika*.  
1. vyd. Brno: VUT 1992. 183 s. Číslo publikace 2131.
- [5] PAVELEK, Milan a kol. *Termomechanika*.  
1. vyd. Brno: CERM 2003. 284 s. ISBN 80-214-2409-5.
- [6] PETRÁK, Jiří; DVOŘÁK, Zdeněk; KLAZAR, Luděk. *Chladivo R 717 (čpavek)*.  
Praha: ČVUT 1994. 70 s. Fakulta strojní.
- [7] RECKNAGEL – SPRENGER *Vykurovanie – vetranie – klimatizácia*.  
2. vyd. Bratislava: ALFA 1971. 1134 s. Číslo publikace 4554.
- [8] URBAN, Milan. *Čpavková chladicí zařízení v potravinářském průmyslu*.  
1. vyd. SNTL 1956. 260 s. Číslo publikace 2012. Typové číslo L18-B2-3-I.
- [9] ČSN EN 378-1. *Chladicí zařízení a tepelná čerpadla – Bezpečnostní a environmentální požadavky – Část 1. Základní požadavky, definice, klasifikace a kritéria volby*.
- [10] ČSN EN 378-1. *Chladicí zařízení a tepelná čerpadla*
- [11] SPOLANA a.s., Neratovice. *Bezpečnostní listy*.  
[www.spolana.cz](http://www.spolana.cz) 18.1.2010
- [12] AGRIMEX, spol. s r.o., Třebíč. *Technické listy*  
[www.agrimex.cz](http://www.agrimex.cz) 18.1.2010
- [13] <http://heatsink-guide.com/peltier.htm> 18.1.2010

# 11. SEZNAM SYMBOLŮ

|                   |                                      |                                                              |
|-------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| a                 | [Jkg <sup>-1</sup> ]                 | měrná kompresní práce                                        |
| A                 | [J]                                  | kompresní práce Carnotova cyklu (absolutní hodnota)          |
| A <sub>K</sub>    | [J]                                  | kompresní práce Rankin – Clausiova cyklu (absolutní hodnota) |
| a <sub>0</sub>    | [Jkg <sup>-1</sup> ]                 | měrná práce oběhu (absolutní hodnota)                        |
| c                 | [Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ] | měrná tepelná kapacita                                       |
| F                 | [N]                                  | síla                                                         |
| h                 | [Jkg <sup>-1</sup> ]                 | měrná entalpie                                               |
| m                 | [kg]                                 | hmotnost                                                     |
| p                 | [Pa]                                 | tlak absolutní                                               |
| p <sub>a</sub>    | [Pa]                                 | tlak atmosférický                                            |
| p <sub>e</sub>    | [Pa]                                 | vnější tlak                                                  |
| p <sub>o</sub>    | [Pa]                                 | tlak vypařovací                                              |
| p <sub>k</sub>    | [Pa]                                 | tlak kondenzátorový                                          |
| p <sub>po</sub>   | [Pa]                                 | podtlak                                                      |
| p <sub>pr</sub>   | [Pa]                                 | přetlak                                                      |
| P <sub>čerp</sub> | [W]                                  | příkon čerpadla                                              |
| q <sub>1</sub>    | [Jkg <sup>-1</sup> ]                 | měrné teplo přivedené chladivu                               |
| q <sub>2</sub>    | [Jkg <sup>-1</sup> ]                 | měrné teplo odvedené chladivu (absolutní hodnota)            |
| Q                 | [W]                                  | tepelný tok                                                  |
| Q <sub>a</sub>    | [W]                                  | tepelný tok směšovací                                        |
| Q <sub>k</sub>    | [W]                                  | tepelný tok odvedený kondenzátoru                            |
| Q <sub>N</sub>    | [W]                                  | tepelný tok nízkoteplotního zdroje tepla                     |
| Q <sub>o</sub>    | [W]                                  | tepelný tok přivedený výparníku                              |
| Q <sub>t</sub>    | [W]                                  | tepelný tok přivedený kotli                                  |
| Q <sub>v</sub>    | [W]                                  | tepelný tok vysokoteplotního zdroje tepla                    |
| s                 | [Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ] | měrná entropie                                               |
| S                 | [m <sup>2</sup> ]                    | plocha                                                       |
| t                 | [°C]                                 | Celsiova teplota                                             |
| T                 | [K]                                  | termodynamická (absolutní) teplota                           |
| T <sub>F</sub>    | [°F]                                 | Fahrenheitova teplota                                        |
| v                 | [m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> ]   | měrný objem                                                  |
| V                 | [m <sup>3</sup> ]                    | objem                                                        |
| ΔT                | [K]                                  | teplotní difference                                          |
| ε                 | [ - ]                                | chladicí faktor                                              |
| ε <sub>C</sub>    | [ - ]                                | Carnotův chladicí faktor                                     |
| ε <sub>R</sub>    | [ - ]                                | Rankin – Clausiův chladicí faktor                            |
| ε <sub>T</sub>    | [ - ]                                | topný faktor                                                 |
| ρ                 | [kgm <sup>-3</sup> ]                 | hustota                                                      |