



XXVII. Tepelné čerpadlo

Helena Valentová, Pavel Brom, KVOF MFF UK

Pracovní úkoly:

- 1) Při zapnutém kompresoru proměřte časovou závislost teplot v obou rezervoárech. Současně zaznamenejte celkový elektrický příkon kompresoru.
- 2) Po vypnutí kompresoru proměřte časovou závislost teploty vody v obou rezervoárech pro dolní odhad tepelných ztrát.
- 3) Vyhodnoťte míru tepelných ztrát a znázorněte ji pomocí vhodné grafické závislosti (např. $\Delta Q/\Delta t = f(T_2)$, $\Delta Q/\Delta t = f(\Delta T)$ apod.).
- 4) Vyhodnoťte topný faktor zdroje tepla a do společného grafu zakreslete naměřenou a teoretickou závislost $\tau = \tau(\Delta T)$.

Pokyny k měření:

- Na začátku ověřte, případně upravte umístění rezervoáru s vodou tak, aby se lopatky míchačky nedotýkaly měděné spirály v rezervoáru ani nemohly zachytit termočlánky určené pro kapaliny.
- Zaznamenejte výchozí stav: Zapněte míchání a proměřte úroveň počátečních teplot v obou tepelných rezervoárech. Odečtěte tlaky v nízkotlaké i vysokotlaké části. Ověřte ustálenost počátečních teplot vody v obou rezervoárech. (Zájemci si mohou zkusit termočlánky mezi rezervoáry vzájemně prohodit.)
- Zvolte a nastavte časový interval pro automatický záznam (logování) teplot v rozsahu 5–60 s (v závislosti na délce měření, plánovaném počtu změřených bodů, zájmu studenta a jeho šikovnosti při zpracování rozsáhlejšího logu). Pro výpočty tepel a tvorbu grafických závislostí je doporučený časový interval $\Delta t = 1$ min.
- Pro naměření časové závislosti teplot spusťte automatický záznam teplot až ze 4 termočlánků současně (s předem nastaveným časovým krokem). Pouze dva z termočlánků jsou zalité v plastovém pouzdře – pouze tyto jsou určeny do kapalin. Je doporučeno pořídit videozáznam displeje měřiče spotřeby pro možnost pozdějšího vyhodnocení (průměrování) příkonu, a to např. pomocí vlastního chytrého telefonu.
- Zapněte kompresor, jakmile se v celém objemu obou rezervoárů v důsledku míchání ustálí proudění vody. Při měření časové závislosti teplot současně zaznamenejte časovou závislost celkového příkonu kompresoru. Pro potřeby diskuse je vhodné současně zaznamenat časovou závislost tlaků v nízkotlaké a vysokotlaké části. Přinejmenším uveďte počáteční, min. a max. dosažený tlak v aparatuře.
- Kompresor vypněte při dosažení teplotního rozdílu $30 \text{ K} < \Delta T < 45 \text{ K}$, případně při dosažení max. tlaku 14 barů. Záznam uložte. Pokračujte v měření časové závislosti teplot při temperování aparatury zpět na teplotu v místnosti, a to při zapnutém míchání vody v obou rezervoárech.
- Poznámka: Pro uložení naměřené časové závislosti teplot musí být okno s grafem aktivní, tzn. před uložení na okno klikněte levým tlačítkem myši.
- V části protokolu „Výsledky měření“ uveďte časové závislosti naměřených veličin – grafy musí být umístěny pod sebou se shodným měřítkem časové osy, měřené veličiny se stejnou jednotkou uvádějte pohromadě ve společném grafu.
- Popište způsob vyhodnocení tepelných ztrát i jejich započítání při vyhodnocení topného faktoru.
- V diskusi či závěru okomentujte, zda se tepelné čerpadlo chová jako ideální carnotovský stroj.



XXVII. Tepelné čerpadlo

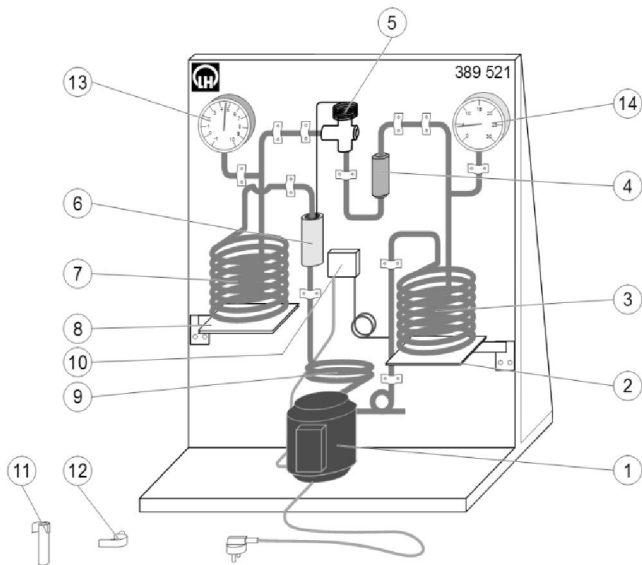
Popis funkce tepelného čerpadla

Tepelné čerpadlo je tepelný stroj, který odebírá teplo z rezervoáru o teplotě T_1 a předává jej do rezervoáru s teplotou T_2 . V důsledku tohoto procesu teplota T_1 klesá a teplota T_2 se zvyšuje, tzn. zvyšuje se rozdíl teplot

$$\Delta T = T_2 - T_1. \quad (1)$$

Pracovní látkou v uzavřeném okruhu tvořeném měděným potrubím je chladivo 1,1,1,2-tetrafluorethan (značka R134a), které je šetrné k ozonové vrstvě a ve srovnání s jinými skleníkovými plyny nepřispívá tolik ke globálnímu oteplování; neobsahuje přidané freony. Tento bezbarvý plyn má za normálních podmínek teplotu tání $-103,3$ °C a teplotu varu $-26,3$ °C.

Tepelná čerpadla zpravidla pracují s tepelnými rezervoáry vzduch-vzduch nebo v našem případě pro snazší a přesnější měření voda-voda. Základními součástmi tepelného čerpadla jsou kompresor a tzv. expanzní ventil, které rozdělují celý uzavřený okruh na vysokotlakou a nízkotlakou část. Tlak v obou částech lze měřit dvěma nezávislými manometry (toto měření je pouze orientační, v úloze nebude vyhodnocováno). Kompresor přečerpává chladivo výhradně v plynné fázi do vysokotlaké části, kde dochází ke kondenzaci (zkapalnění). Chladivo odevzdává energii rezervoáru především ve formě kondenzačního tepla v tzv. zkapalňovači o teplotě T_2 . Činností kompresoru se snižuje tlak par v nízkotlaké části, kde se zkapalněné chladivo odpařuje a tím odebírá teplo rezervoáru v tzv. výparníku o teplotě T_1 . Kompresor může sát a stlačovat výhradně plyn; kapalná fáze se nesmí do kompresoru dostat. Proto se mezi výparníkem a kompresorem nachází teplotní čidlo (součást č. 6 na obr. 1), které termostaticky řídí expanzní ventil (č. 5). Jelikož zkapalněné chladivo ve vysokotlaké části by mohlo obsahovat bubliny plynu, je nezbytné odstranit tyto bubliny (případně i krystalky ledu) v kolektoru kapalně fáze (č. 4), který je nezbytnou součástí uzavřeného okruhu tepelného čerpadla před ventilem. Kolektor funguje jako zásobník pro určité množství zkapalněného chladiva, jenž zajišťuje, že se do ventilu vždy dostane výhradně kapalná fáze. Viz podrobný popis aparatury s vysvětlivkami na obr. 1., příp. v návodu výrobce [1].



* Modrá vnitřní stupnice – rosný bod pro R134a; ostatní stupnice platí pro jiná chladiva (týká se částí 13 a 14).

1. Kompresor
(230 V; 50/60 Hz; cca 130 W při 50 Hz).
2. Sklopný držák červeného rezervoáru tepla.
3. Zkapalňovač
(vnitřní průměr spirály cca 13 cm).
4. Kolektor (odstranění bublin z kapalně fáze).
5. Expanzní ventil (termostaticky řízený).
6. Teplotní čidlo pro expanzní ventil (s izolací).
7. Výparník
(vnitřní průměr spirály cca 13 cm).
8. Sklopný držák modrého rezervoáru tepla.
9. Spirála ve funkci pružné propojky mezi kompresorem a výměníkem tepla.
10. Tlakový spínač.
11. Plastový držák termočládku.
12. Měděná svorka k uchycení termočládku na měděné potrubí.
13. Manometr pro nízkotlakou část
(vnější stupnice: vakuum až 8 bar) *.
14. Manometr pro vysokotlakou část
(vnější stupnice: 0 až 34 bar) *.

Obr. 1: Popis aparatury (převzato z [1])

Rezervoár je tvořen plastovou nádobou naplněnou vodou o známém objemu V (doporučený objem je 4 litry, minimální 3 až max. 5 litrů). Do vody je ponořena spirála z kovu o vysoké vodivosti (měď), která funguje jako výměník tepla. Rovnoměrné rozdělení teploty v celém objemu obou tepelných rezervoárů zvláště zajišťují servomotorky s převodovkou dopomala, které pomalu míchají vodu a jejichž rychlost otáček lze v omezeném rozsahu řídit velikostí napájecího stejnosměrného napětí. Funkcí ostatních menších spirál (viz např. č. 9 na obr. 1) vedle výparníku a zkapařovače je zabránit přenosu vibrací z kompresoru na zbývající části aparatury.

Výkonové koeficienty pro popis účinnosti tepelného čerpadla

Za časový interval $\Delta t = t_2 - t_1$ mezi dvěma okamžiky t_1 a t_2 (kdy např. odečítáme měřené hodnoty) tepelný stroj odebere rezervoáru o teplotě T_1 celkové teplo Q_1 . K tomu spotřebuje celkovou dodanou elektrickou energii

$$W = \int_{t_1}^{t_2} P(t) dt = P \cdot \Delta t, \quad (2)$$

kde $P(t)$ je okamžitý příkon v čase t a P je průměrný příkon v časovém intervalu Δt . Odebrané teplo Q_1 a celkovou dodanou energii W tepelný stroj odevzdá v ideálním případě tepelnému rezervoáru o teplotě T_2 , a to ve formě tepla Q_2 , tedy v idealizovaném případě platí zákon zachování energie ve tvaru

$$Q_1 + W = Q_2, \quad (3)$$

v reálném případě

$$Q_1 + W = Q_2 + Q, \quad (4)$$

kde Q označuje celkové tepelné ztráty za časový interval Δt , tzn. celkové teplo odevzdané okolí, a to rezervoárem o teplotě T_2 , potrubím i kompresorem včetně jeho motoru. Odhad celkových tepelných ztrát je netriviální. Způsob měření teplot Q_1 a Q_2 i spodního odhadu tepelných ztrát Q je popsán dále – viz vztah (9).

Účinnost tepelného čerpadla nebo jiné chladicí či klimatizační jednotky lze popsat pomocí výkonového koeficientu (COP – Coefficient of Performance), který se nazývá *chladicí faktor zdroje chladu* (COPAC, COP_C , ε) neboli výkonový koeficient v režimu chlazení, který je definován jako poměr chladicího výkonu ku celkovému příkonu tepelného čerpadla – viz vztah (5), který odpovídá výkonu, resp. příkonu vynásobenému zvoleným časovým intervalem Δt . Analogicky lze definovat *topný faktor zdroje tepla* značený zpravidla τ – viz vztah (7). Obě tyto účinnosti podobně jako v Carnotově cyklu závisejí na termodynamických teplotách T_1 a T_2 (měřených v kelvinech, zn. K) obou rezervoárů: rezervoár s výparníkem má nižší teplotu T_1 a druhý rezervoár vyšší teplotu T_2 , resp. závisejí na rozdílu teplot $\Delta T = T_2 - T_1$. Vztahy (6) a (8) popisují teoretickou účinnost Carnotova tepelného stroje.

$$\varepsilon(\Delta T) := \frac{Q_1}{W}, \quad (5)$$

$$\varepsilon(\Delta T) = \frac{T_1}{\Delta T} = \frac{T_1}{T_2 - T_1}, \quad (6)$$

$$\tau(\Delta T) := \frac{Q_2}{W}, \quad (7)$$

$$\tau(\Delta T) = \frac{T_2}{\Delta T} = \frac{T_2}{T_2 - T_1}. \quad (8)$$

Účinnost je pro carnotovský stroj typicky větší na začátku, kdy jsou teploty T_2 a T_1 navzájem sobě blízké, a klesá se vzrůstajícím rozdílem teplot $\Delta T = T_2 - T_1$ (na začátku dělíme menším, resp. později větším rozdílem teplot). Hodnota termodynamické teploty v čitateli se přitom změní v menší míře (pod 10 %).

Celkovou spotřebu dodané elektrické energie můžeme odhadnout na základě vztahu (2), kdy příkon lze měřit pomocí zásuvkového měřiče spotřeby typu Solight DT26. Odebrané, resp. odevzdané teplo $Q_{1,2}$ za dobu Δt můžeme určit z naměřeného rozdílu teplot ΔT_1 , resp. ΔT_2 za tento časový interval podle vztahů

$$Q_{1,2} = m_{1,2} \cdot c \cdot \Delta T_{1,2}, \quad (9)$$

kde $m_{1,2} = \rho \cdot V_{1,2}$ značí celkovou hmotnost vody v prvním, resp. ve druhém rezervoáru, $V_{1,2}$ její objem, ρ je hustota vody a c je tabelovaná hodnota měrné tepelné kapacity vody při laboratorních podmínkách. Pomocí analogického vztahu lze též zdola odhadnout tepelné ztráty Q , např. změříme-li pokles teploty ΔT_2 za časový interval Δt , je-li kompresor vypnutý a aparatura se temperuje zpět na teplotu okolí.

Měřidla:

- 4-kanálový teplotní datalogger Volcraft s termočlánky typu K204 (2x do kapaliny, 2x suché měření – např. měření teploty kompresoru a teploty vzduchu v okolí rezervoáru o teplotě T_2); připojen k PC.
- Zásuvkový měřič spotřeby Solight DT26.
- Odměrný válec.

Pomůcky:

- Výuková aparatura „Heat Pump“ od fy Leybold Didactic [1].
- Mechanismus pro stálé pomalé automatické míchání vody, lžice.
- Kanystr se zásobou vody vytemperované na teplotu vzduchu v laboratoři.
- Vhodnou pomůckou je vlastní chytrý telefon pro videozáznam okamžitého příkonu.

Přehled parametrů aparatury [1]:

- Chladivo (refrigerant): 1,1,1,2-tetrafluorethan (R134a), CFC-free.
- Vnitřní průměr spirály výparníku a zkapalňovače: každý cca 13 cm.
- Max. objem vody v tepelném rezervoáru: 5 l (každý); rysky [litry]: 3; 4; 5.
- Manometr v nízkotlaké části:
rozsah tlaků: –1 až +10 bar, rosný bod v intervalu –60 až +50 °C.
- Manometr ve vysokotlaké části:
rozsah tlaků: 0 až +34 bar, rosný bod v intervalu –60 až +95 °C.
- Nastavení tlakové pojistky pro automatické vypnutí kompresoru – levá stupnice: (15 ± 1) bar. (Znovuzapnutí při poklesu tlaku na 6 až 9 bar – pravá stupnice.)
- Rozměry měděných trubic: 2 m × Ø 6 mm.
- Síťové napájecí napětí: 230 VAC, 50 Hz.
- Příkon: cca 130 VA (v průběhu činnosti významně kolísá).
- Rozměry desky: 70 cm × 82 cm × 50 cm.
- Váha: 30 kg.

Literatura:

- [1] Leybold Didactic Heat Pump (P2.6.3.1) – návod výrobce. [Online]
<http://www.ld-didactic.de/documents/en-US/GA/GA/3/389/389521de.pdf> [cit. 30. 4. 2019].