

# 4. Tepelné obehы

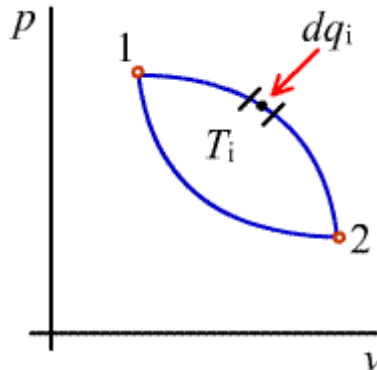
## Učebný cieľ kapitoly

V tejto časti budeme aplikovať termodynamické zákony z predchádzajúcich kapitol na činnosť niektorých, z hľadiska energetiky najdôležitejších zariadení, uskutočňujúcich premenu tepla na mechanickú prácu (tepelné motory) či prečerpávanie tepla z teploty nižšej na vyššiu (chladiace zariadenia a tepelné čerpadlá). Cieľom bude objasniť termodynamickú podstatu ich činnosti, bilancovanie energie, práce a účinnosti a posúdiť vplyv faktorov, ktoré ovplyvňujú ich energetickú efektívnosť. Otázky podrobnejšieho výpočtu a prevádzkových charakteristík sú náplňou nadväzujúcich predmetov špecializácie.

Po naštudovaní tejto kapitoly by mal čitateľ podrobne zvládnuť problematiku energetických tepelných obehov. Mal by vedieť zdefinovať termodynamickú účinnosť obehov priamych, a chladiaci, resp. vykurovací faktor obehov obrátených. Mal by vedieť vysvetliť priamy i obrátený Carnotov obeh a vyjadriť jeho tepelnú bilanciu, ako aj jeho možnosti praktickej realizácie premeny tepla na mechanickú prácu (a naopak).

## 4.1 ZÁKLADNÉ POJMY

*Tepelný obeh* je súhrn termodynamických zmien, po ktorých sa pracovná látka vracia do východiskového stavu. Predpokladom je, samozrejme, stacionárna prevádzka. Z definície vyplýva, že tepelný obeh sa znázorňuje v ľubovoľnom súradnicovom systéme, napr.  $p$ - $v$  uzavretou krivkou 1-2-1 podľa obr.4.1



obr.4.1 Tepelný obeh

Zmena ľubovoľnej stavovej veličiny po uskutočnení obehу 1-2-1 je rovná nule. Platí to aj pre entropiu, ktorá je taktiež *stavovou veličinou*. Teda

$$\oint ds = 0, \text{ kde } ds = \frac{dq}{T} \quad (4-1a)$$

Integrál možno nahradiť súčtom nekonečne malých veličín po uzavretej krivke 1-2-1:

$$\sum_{i=1}^{\infty} \frac{dq_i}{T_i} = 0 \quad (4-1b)$$

$dq_i$  - elementárne dodané teplo na elementárnom úseku zmeny podľa obr.4.1

$T_i$  - teplota (K), pri ktorej sa toto teplo dodáva

Ak súčet nejakých veličín má byť rovný 0 podľa (4-1), musia tieto veličiny nadobúdať kladných aj záporných hodnôt. Pretože  $T_i[K] > 0$ , musia nadobúdať kladných aj záporných

hodnôt veličiny  $q_i$ , čo fyzikálne znamená, že *teplo musíme pre uskutočnenie obehu aj dodávať* (teplo kladné) *aj odoberať* (teplo záporné).

Podľa toho, či z obehu prácu získavame (práca kladná), alebo ju do obehu dodávame (práca záporná), delíme obehy na

1. *obehy priame*, z ktorých prácu získavame (premenou tepla). Sú to obehy tepelných motorov, medzi ktoré možno zaradiť aj tepelný obchod tepelnej elektrárne
2. *obehy obrátené*, do ktorých prácu dodávame a využívame ich na prečerpávanie tepla z nižšej energetickej hladiny (nižšej teploty) na vyššiu. Sú to obehy chladiacich zariadení a tepelných čerpadiel. (podrobnejšie v nasledujúcej kapitole)

Obehy v ktorých sa pracovná látka vymieňa (napr. spaľovací motor), nazývame *obehmi otvorenými*, pre obehy pracujúce stále s tou istou pracovnou látkou (napr. parná elektrárňa) sú *obehy uzavreté*.

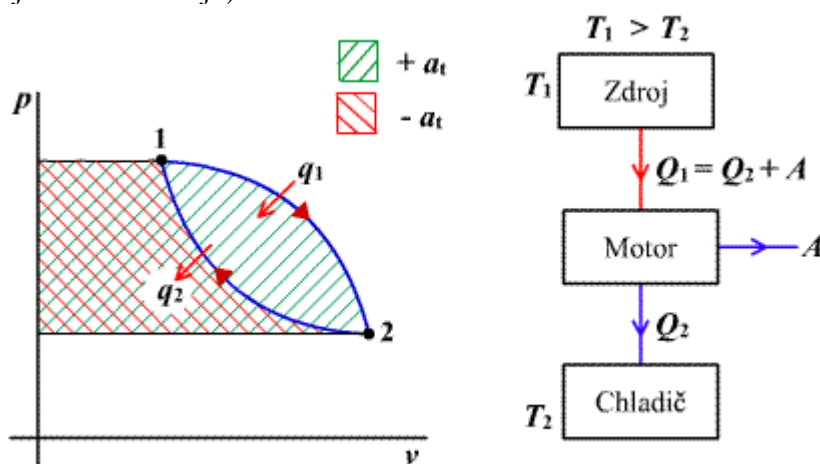
Skutočné obehy bývajú zložité, preto sa ich usilujeme zjednodušiť a rozložiť na časti, ktoré možno približne aproximovať základnými zmenami stavu. Skutočné zmeny sú vždy nevratné. Nahradzujeme ich energeticky ekvivalentnými zmenami, od ktorých vyžadujeme, aby udávali rovnako dodané teplo ako skutočné zmeny, obehy otvorené nahradzujeme obhmi uzavretými. Týmto úpravami získavame zo skutočného obehu *obch porovnávaci*, pre ktorý aplikujeme termodynamické zákony a zhodu so skutočnosťou zabezpečujeme opravnými súčiniteľmi.

## 4.2 OBEHY PRIAME A OBRÁTENÉ

### 1. Obehy priame

uskutočňujú premenu tepla na prácu. Aby výsledná práca bola kladná, musí zrejme byť expanzná časť okruhu (práca získaná pri expanzii je kladná) nad kompresnou časťou obehu (práca dodaná pri kompresii je záporná) podľa obr.4.2. V tomto obrázku sme využili  $p$ - $v$  súradnice, kde práca má geometrický význam plochy pod krivkou termodynamickej zmeny.

Do tepelného obehu musíme teda teplo nielen privádzať, ale časť privedeného tepla aj odvádzať chladením. Označme *privedené teplo*  $q_1$  [ $J \cdot kg^{-1}$ ] a považujeme ho za *kladné*, *odvedené teplo*  $q_2$  [ $J \cdot kg^{-1}$ ] považujeme za *záporné* a toto označenie zachováujeme aj v ďalšom texte. Teplo  $q_1$  privádzame v časti expanznej (objem sa zväčšuje), teplo  $q_2$  odvádzame v časti kompresnej (objem sa zmenšuje).



obr.4.2 Obch priamy,  $p$ - $v$  diagram a bloková schéma

Výsledkom obr.4.2, kde časť expanzná je nad kompresnou je zrejme *získaná, t.j. kladná práca*, čo vyplýva z geometrického významu práce, obr.4.2 uvažovali sme pri tom, že obch sa

realizuje v otvorenej sústave, teda práca technická  $a_t$ . *Vonkajšia práca je daná plochou obehu*, rozdielom kladnej práce, získanej pri expanzii, a zápornej práce, dodanej pri kompresii. Z blokovej schémy na obr.4.2 vyplýva:

$$a_t = q_1 - q_2 \quad (4-2)$$

Rovnaký výsledok dostaneme aj aplikáciou vety o energii upravenou pre tepelné obeh.

$$dq = di + da_t$$

Po integrácii cez krivku, reprezentujúcu obeh, t.j. 1-2-1, je  $di = 0$  (pretože  $i$  je stavová veličina) a znova dostávame:

$$q_1 - q_2 = a_t$$

Rovnakú prácu ako plochu obehu dostaneme, ak bude obeh realizovaný v uzavretej sústave a budeme uvažovať prácu absolútnu  $a$ .

Pre *obehy priame* podľa obr.4.2 definujeme *tepelnú účinnosť* obehu ako pomer získanej práce k dodanému teplu

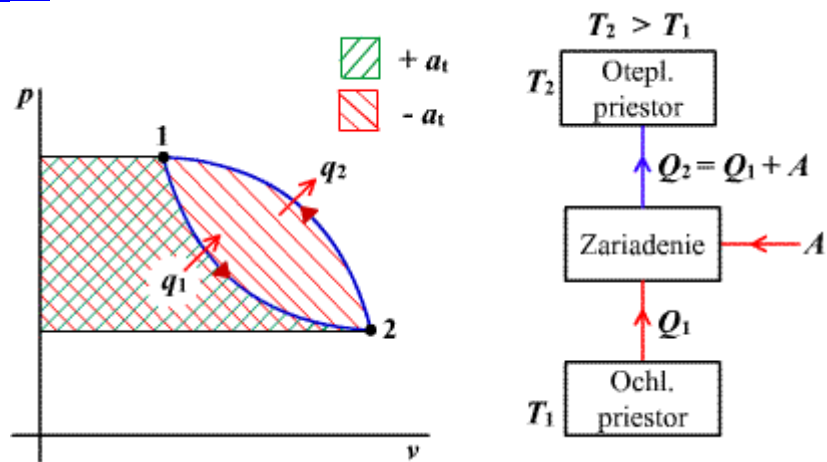
$$r_{\dot{t}} = \frac{a_t}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1} \quad (4-3)$$

Tepelná účinnosť podľa (4-3) nerešpektuje vplyv nevratnosti zmien. Preto sa zavádza účinnosť termodynamická

$$r_{\dot{t}d} = \frac{a_{\dot{t}d}}{a_t} \quad (4-4)$$

ako pomer práce, získanej zo skutočného obehu, k práci získanej z teoretického, porovnávacieho obehu.

## 2. Obehy obrátené



obr.4.3 Obeh obrátený,  $p$ - $v$  diagram a bloková schéma

Expanzná časť je pod kompresnou, z geometrického významu práce vyplýva, že práca daná plochou obehu je záporná, z blokovej schémy na obr.4.3, ako aj z vety o energii zhodne dostávame

$$q_1 - q_2 = -a, \text{ t.j. } |q_2| > |q_1|$$

Dodaná práca sa spotrebuje na prečerpanie tepla z teploty nižšej na vyššiu. Obehy obrátené sú obehmi chladiacich zariadení, tepelných čerpadiel a kompresorov. Chladiace a tepelné čerpadlá pracujú na rovnakom princípe, avšak s rozdielnym využitím tepiel  $q_1$  a  $q_2$ .

Pri *chladiacich zariadeniach* je podstatné teplo  $q_1$ , ktoré treba odvieť z chladiaceho priestoru,  $q_2$  sa najčastejšie odvádza bez využitia do okolia. *Chladiaci faktor* preto definujeme ako

$$\varepsilon_{ck} = \frac{q_1}{\alpha} = \frac{q_1}{q_1 - q_2} \quad (4-5)$$

Pri tepelných čerpadlách je podstatné teplo  $q_2$ , ktoré sa využíva na vykurovanie či prípravu teplej úžitkovej vody, teplo  $q_1$  sa odčerpáva z okolia (rosy, vzduchu, zeme) s prakticky nevyčerpatel'nou zásobou tepla, preto **vykurovací faktor** definujeme ako

$$\varepsilon_k = \frac{q_2}{\alpha} = \frac{q_2}{q_2 - q_1} \quad (4-6)$$

Pre daný obeh je zrejmé v súlade s obr.4.3 a definíciami (4-5) a (4-6).

$$\varepsilon_k > \varepsilon_{ck}$$

Kým tepelná účinnosť je vždy  $\eta_t < 1$ , môžu byť (ale nemusia) hodnoty vykurovacieho a chladiaceho faktora  $\varepsilon_k > 1$ ,  $\varepsilon_{ck} > 1$ .

Podrobnejšie vysvetlenie obrátených obehov je v kapitole Obrátený Carnotov obeh a v kapitole Obrátené obehly v oblasti pár chladiva.

### 4.3 CARNOTOV OBEH V OBLASTIACH IDEÁLNEHO PLYNU

Je to obeh, ktorý pre dané dve teploty ( $T_1$  a  $T_2$ ) dáva **najvyššiu tepelnú účinnosť**  $\eta_t$  pri obehoch priamych, ako aj najvyššiu efektívnosť (chladiaci faktor  $\varepsilon_{ck}$  či vykurovací faktor  $\varepsilon_k$ ) pri oboch obrátených. Z tejto skutočnosti vyplýva naše úsilie realizovať skutočné obehly tak, aby sa čo najviac podobali obehly Carnotovmu. Všeobecné závery, vyvedené z rozboru z Carnotovho obehly, kvalitatívne platia aj pre skutočné obehly. Pre ich dôležitosť budeme sa znova zaoberať Carnotovým obehly aj na tomto mieste hoci bol v zásade charakterizovaný už v rámci základného kurzu fyziky. Carnotov obeh možno teoreticky uskutočniť v oblasti plynu i v oblasti pary, a to ako priamy alebo obrátený.

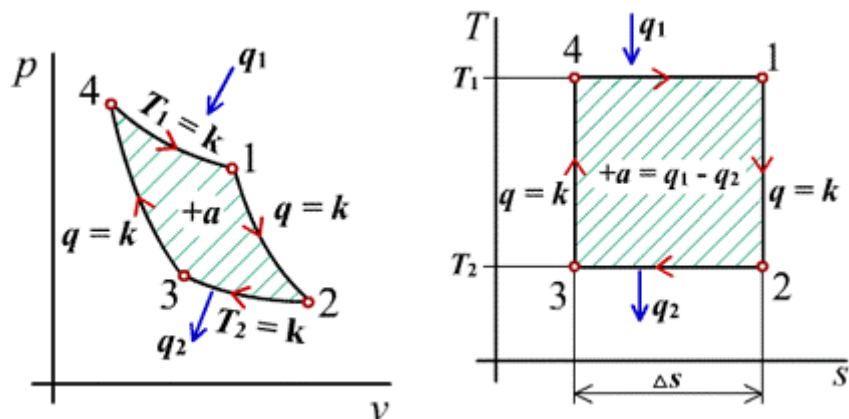
#### **4.3.1 Priamy Carnotov obeh v oblasti ideálneho plynu**

V súradniciach  $p$ - $v$  a  $T$ - $s$  je na obr.4.4a,b. Skladá sa z nasledujúcich základných zmien stavu:  
4-1 izotermická expanzia,  $T_1 = konst.$ ,  $p v = konst.$  Aby teplota v priebehu expanzie neklesala, musíme privádzať teplo  $q_1$

1-2 adiabatická expanzia  $q = konst.$ ,  $p v^\gamma = konst.$

2-3 izotermická kompresia,  $T_2 = konst.$ ,  $p v = konst.$  Aby teplota v priebehu kompresie nerástla, musíme odvádzať teplo  $q_2$

3-4 adiabatická kompresia  $q = konst.$ ,  $p v^\gamma = konst.$



obr.4.4 Carnotov obch priamy,  $p$ - $v$  a  $T$ - $s$  diagram

Práca získaná z obehu je ako vždy daná plochou obehu.

Tepelná účinnosť podľa definície 4-3

$$\eta_{\text{h}} = 1 - \frac{q_2}{q_1}$$

Teplá  $q_1$  a  $q_2$  ľahko vyjadríme z  $T$ - $s$  diagramu ako plochy pod príslušnými izotermami

$$q_1 = T_1 \Delta s$$

$$q_2 = T_2 \Delta s$$

Po dosadení je tepelná príslušnosť

$$\eta_{\text{h}} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (4-7)$$

Zo vzťahu pre účinnosť vyplývajú dôležité závery:

1. Tepelná účinnosť sa bude zvyšovať, ak teplota, pri ktorej teplo privádzame  $T_1$  sa bude zvyšovať a naopak teplota, pri ktorej teplo odvádzame,  $T_2$ , znižovať. *Čím väčší bude rozdiel teplôt medzi ktorými tepelný motor pracuje, ( $T_1 - T_2$ ), tým väčšia bude tepelná účinnosť!*
2. *Tepelná účinnosť nikdy nemôže byť rovná jednej.* Pre splnenie  $\eta_{\text{h}} = 1$  existujú podľa (4-7) dve možnosti, obidve nereálne:
  - a.  $T_1 \rightarrow \infty$ , teplota, pri ktorej sa teplo privádza, blíži sa k nekonečnu, čo nie je možné. Napr. teplota pary v tepelných elektrárňach je maximálne cca  $580^\circ\text{C}$ .
  - b.  $T_2 \rightarrow 0$ , teplota, pri ktorej sa teplo odvádzajú, blíži sa k absolútnej nule. Pretože chladiacimi médiami tepelných motorov je vzduch alebo voda s teplotou okolia, t.j. cca  $300\text{K}$ , nemôže byť táto podmienka ani zďaleka splnená.

Vypočítajte ako príklad účinnosť tepelného motora, pracujúceho podľa Carnotovho obehu s teplotami:

$$t_1 = 580^\circ\text{C}, \text{ t.j. } T_1 = 850\text{K}, \quad t_2 = 25^\circ\text{C}, \text{ t.j. } T_2 = 300\text{K}$$

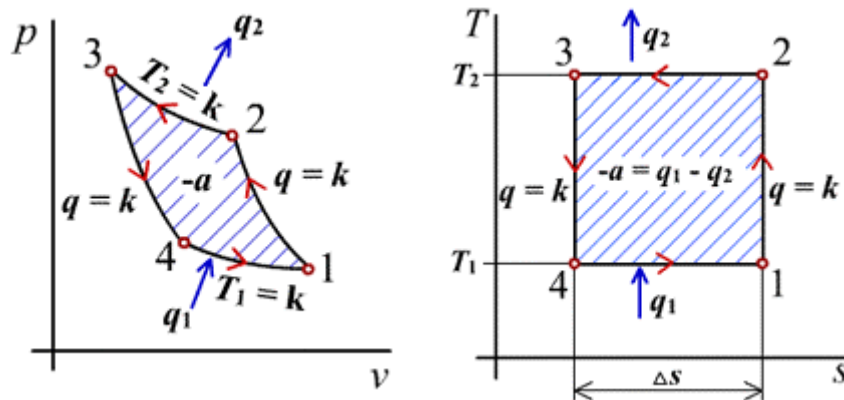
$$\eta_{\text{h}} = 1 - \frac{300}{850} = 0,65$$

Účinnosť skutočných tepelných motorov bývajú asi polovičné.

3.  $\eta_k = 0$  ak  $T_1 = T_2$  čo znamená: ak chceme uskutočniť premenu tepla na prácu, musíme mať k dispozícii 2. zásobníky o nerovnakých teplotách  $T_1 > T_2$

### 4.3.2 Obrátený Carnotov obeh v oblasti ideálneho plynu

V súradniciach  $p-v$  a  $T-s$  je obr.4.5a,b. Jeho skladba je rovnaká ako pri obehu priamom, časť kompresná je však nad expanznou, výsledná práca je záporná. Spotrebuje sa na prečerpávanie tepla z nižšej teploty  $T_1$  na teplotu vyššiu  $T_2$ . Podľa obráteného obehu pracujú chladiace zariadenia a tepelné čerpadlá. (Podrobnejšie v kapitole Obrátené obeh).



obr.4.5 Carnotov obeh obrátený,  $p-v$  a  $T-s$  diagram

Chladiaci faktor podľa definície (4-5)

$$\varepsilon_{ck} = \frac{q_1}{a} = \frac{q_1}{q_1 - q_2}$$

Z  $T-s$  diagramu je  $q_1 = T_1 \Delta s$ ,  $q_2 = T_2 \Delta s$ .

Po dosadení

$$\varepsilon_{ck} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} \quad (4-8)$$

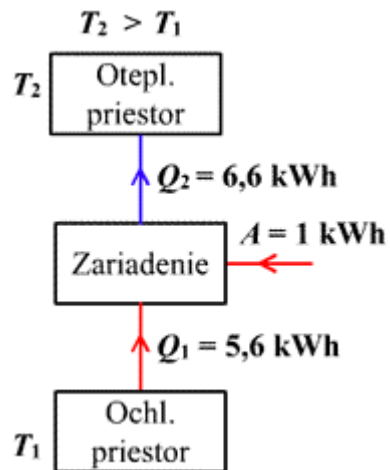
Vykurovací faktor podľa def.(4-6)

$$\varepsilon_k = \frac{q_2}{a} = \frac{q_2}{q_1 - q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \quad (4-9)$$

Podľa rovníc (4-8) a (4-9) bude chladiaci, resp. vykurovací faktor pri danej teplote  $T_1$ , resp  $T_2$  tým väčší, čím menší bude rozdiel teplôt  $T_2 - T_1$ . Pre ilustráciu vypočítajme jednoduchý príklad: aký bude vykurovací faktor tepelného čerpadla, ktoré odoberá teplo zo vzduchu teploty  $7^\circ\text{C}$  ( $T = 280\text{K}$ ) a dodáva teplo do vykurovacieho systému pri teplote  $57^\circ\text{C}$  ( $T = 330\text{K}$ ).

$$\varepsilon_k = \frac{T_2}{T_1 - T_2} = \frac{330}{280 - 330} = 6,6 = \frac{6,6}{1} = \frac{q_2}{a}$$

Výsledok hovorí, že z  $1\text{kWh}$  práce dodanej na pohon tepelného čerpadla, získavame do vykurovacieho systému  $6,6\text{kWh}$  tepla. Na prvý pohľad sa zdá, že toto tvrdenie je v rozpore so zákonom zachovania energie. Treba však pamätať, že rozdiel  $Q_2 - A = 6,6 - 1 = 5,6\text{kWh}$  nezískavame z ničoho, lež prečerpáním tepla  $Q_1$  z prostredia nižšej teploty. Bilančná bloková schéma pre určený príklad je na obr.4.6



obr.4.6 Bilančná bloková schéma obráteného obehu.

Ak teplota vykurovacieho systému bude nižšia ako v predchádzajúcom príklade, napr.  $35^{\circ}\text{C}$  ( $T_2 = 308\text{K}$ ), vyjde vykurovací faktor ešte vyšší. Z toho vyplýva výhodnosť použitia nízko-teplotných vykurovacích systémov v kombinácii s tepelným čerpadlom. Analogické úvahy možno urobiť aj pre chladiace zariadenie. Hodnoty vykurovacieho, resp. chladiaceho faktora skutočných zariadení, ktoré nepracujú podľa Carnotovho obehu, sú samozrejme, nižšie ako v uvedenom príklade.