

Příloha 460 článku [35. Energetická bilance oběhu Stirlingova motoru](http://www.transformacni-technologie.cz/35.html),  
<http://www.transformacni-technologie.cz/35.html>.

## Tepelná bilance teplé strany, studené strany a regenerátoru

Obecná rovnice energetické změny elementu objemu pracovního plynu  $dV^{pp}$  o hmotnosti  $dm^{pp}$ :

$$dQ = dU^{pp} + p \cdot dV^{pp}, [43.603] \quad (a)$$

$dQ$  [J] změna tepelného obsahu pracovního plynu,

$dU^{pp}$  [J] změna vnitřní energie pracovního plynu,

$p$  [Pa] tlak pracovního plynu,

$dV^{pp}$  [ $m^3$ ] změna objemu pracovního plynu vlivem změny jeho stavových veličin.

Změna objemu pracovního plynu  $V^{pp}$  se obtížně obecně vyjadřuje\*, proto je vhodnější druhý tvar zápisu I. zákona termodynamiky:

$$dQ = dI^{pp} - V^{pp} \cdot dp, [43.603] \quad (b)$$

$dQ$  [J] změna tepelného obsahu pracovního plynu,

$dI^{pp}$  [J] změna entalpie pracovního plynu (součet vnitřní energie a mechanické energie plynu),

$V^{pp} = V_i$  objem pracovního plynu ve vyšetřovaném objemu je stejný jako vyšetřovaný objem, který úplně vyplňuje.

### \*poznámka

Použitím rovnice (a) povede po úpravách (derivaci stavové rovnice pro získání diferenciálu  $dV^{pp}$  [1, s. 76]) tak či tak na tvar rovnice (b). Tvar rovnice (b) je vhodný pro aplikaci na otevřené soustavy-teplá strana motoru i studená stran motoru jsou otevřeny do

regenerátoru.

Odtud tepelné bilance vyšetřovaných objemů. Teplo se transformuje na vnitřní tepelnou energii plynu nebo práci a naopak.

Tepelná bilance teplé strany motoru za oběh:

$$Q_T = \oint dQ_T = \oint dl_T - \oint V_T \cdot dp,$$

$Q_T$  [J] tepelná bilance teplé strany motoru za oběh,

$dI_T$  [J] změna entalpie pracovního plynu na teplé straně motoru,

$V_T$  [ $m^3$ ] objemu pracovního plynu na teplé straně motoru (protože pracovní plyn zaplňuje celý objem teplé strany motoru je stejný jako objem teplé strany motoru).

$$-\oint V_T \cdot dp = \oint p \cdot dV_T = A_T, [35.463]$$

Tepelná bilance studené strany motoru za oběh:

$$Q_S = \oint dQ_S = \oint dl_S^{pp} - \oint V_S \cdot dp,$$

$Q_S$  [J] tepelná bilance studené strany motoru za oběh,

$dI_S$  [J] změna entalpie pracovního plynu na studené straně motoru,

$V_S$  [ $m^3$ ] objemu pracovního plynu na studené straně motoru (protože pracovní plyn zaplňuje celý objem studené strany motoru je stejný jako objem studené strany motoru).

$$-\oint V_S \cdot dp = \oint p \cdot dV_S = A_S, [35.463]$$

Tepelná bilance regenerátoru za oběh:

$$Q_R = \oint dQ_R = \oint dl_R - \oint V_R \cdot dp = 0,$$

$Q_R$  [J] tepelná bilance studené strany motoru za oběh,

$dI_R$  [J] změna entalpie pracovního plynu v regenerátoru,

$V_R$  [ $m^3$ ] objemu pracovního plynu v regenerátoru (protože pracovní plyn zaplňuje celý mrtvý objem regenerátoru

je stejný jako mrtvý objem regenerátoru).

$$-\oint V_R \cdot dp = -\oint p \cdot dV_R = 0, [35.463]$$

odtud

$$\oint dl_R = 0.$$

Teplo transformované na práci v regenerátoru se ve stejném množství transformuje zpět na teplo a to samé platí i pro vnitřní tepelnou energii plynu.

Vztah mezi tepelnou bilancí studené a teplé strany motoru vyplývá z celkové bilance pracovního plynu uzavřeného v motoru:

$$\oint dQ = \oint dl - \oint V \cdot dp = Q_T + Q_S + Q_R,$$

$dl$  [J] změna entalpie pracovního plynu v motoru,

$V$  [m<sup>3</sup>] objemu motoru.

$$\oint dl = \oint c_p \cdot m \cdot dT = 0,$$

$c_p$  [J·kg<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>] měrná tepelná kapacita pracovního plynu při stálém tlaku (pro ideální plyn  $c_p = \text{konst.}$ ),

$T$  [K] absolutní teplota pracovního plynu v motoru (střední hodnota),

$m$  [kg] hmotnost pracovního plynu v motoru.

$$-\oint V \cdot dp = \oint p \cdot dV = A, [35.463]$$

$A$  [J] vykonaná mechanická práce pracovního plynu v motoru.

$$A = Q_T + Q_S.$$

Vztah mezi teplem transformované na entalpii a naopak na teplé a studené straně motoru lze odvodit následovně z předchozích rovnic:

$$\begin{aligned} A &= Q_T + Q_S = \oint dl_T + A_T + \oint dl_S + A_S = \\ &= \oint dl_T + \oint dl_S + A \end{aligned}$$

odtud rovnost:

$$\oint dl_T = -\oint dl_S = \Delta I,$$

$\Delta I$  [J] teplo spotřebované na změnu entalpie pracovního plynu v motoru za jeden oběh.

Závěrečná úprava jednotlivých vztahů:

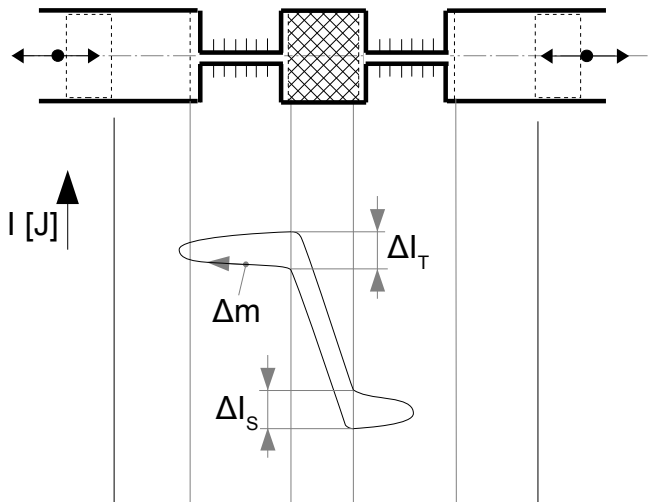
$$Q_T = \Delta I + A_T,$$

$$Q_S = -\Delta I + A_S,$$

$$Q_R = 0.$$

## Rovnost změny entalpie na teplé a studené straně motoru

Zároveň lze rovnost přímo odvodit ze skutečnosti, že pracovní objem motoru je uzavřený a tedy i změna entalpie pracovního plynu v motoru za oběh musí být nulová (entalpie je v tomto případě stavová veličina). Jestliže se na teplé straně entalpie pracovního plynu za oběh zvýší musí se na straně studené o stejnou hodnotu snížit:



*Idealizovaná představa změn entalpie elementárního množství pracovního plynu  $\Delta m$  při „putování pracovním objemem“.*

Na konci oběhu má element  $\Delta m$  stejnou entalpii jako na jeho začátku. Během „putování“ pracovním objemem se jeho entalpie měnila. Na teplé straně došlo ke zvýšení entalpie na studené ke snížení, proto celková změna entalpie za oběh na teplé straně motoru nemusí být nulová a to samé platí i pro stranu studenou.

Elementární objem plynu vystupující z regenerátoru na studenou stranu snižuje dále svou vnitřní tepelnou i tlakovou energii (součet těchto energií dá změnu entalpie). Změna tlakové energie představuje v tomto případě nějakou vykonanou práci (plyn expanduje), takže

zdánlivě by veličina  $\Delta I$  nebyla je teplem zmařeným teplem. Ovšem na druhé straně regenerátoru probíhá opačný proces a tlaková energie elementárních objemů plynu vstupující na teplou stranu motoru se mění s opačným znaménkem a ve svém důsledku je veškerá bilance takových transformací hrazená teplem přivedeným z venku motoru.

## **Odkazy**

1. KALČÍK, Josef, SÝKORA, Karel. *Technická termomechanika*, 1973. 1. vydání, Praha: Academia.