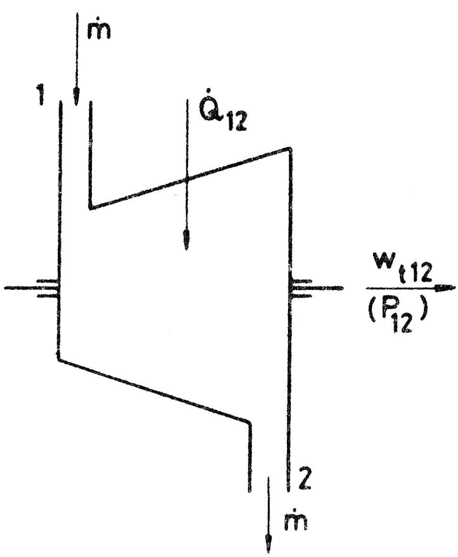
$$w^{*}_{12} = w_{12} + \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) + g\,(z_2 - z_1). \qquad 2.13$$

2.2.3. Az I. főtétel nyitott rendszerekre

A technikai munka

A müszaki gyakorlatban sokszor adódnak termodinamikai problémák gépekkel vagy berendezésekkel kapcsolatban, amelyeken folytonosan anyag áramlik keresztül. Az esetek nagy részében ez a folyamat az időben stacionáriusnak vehető. Egy ilyen nyitott rendszernek tekinthető gép vázlatosan a 10. ábrán látható. A beömlő csonkon keresztül folytonosan érkezik a géphez az 1 állapotu közeg, majd a gépben különböző folyamatokat végezve a kiömlő csonkon át 2 állapotban távozik. Az áramlást stacionáriusnak tekintve a nyitott rendszerre felirható az I. főtételnek olyan alakja, amelyben csak a rendszer határán érvényes állapotjelzők szerepelnek. A nyitott rendszer energiaviszonyairól tehát anélkül kapunk számszerü eredményt, hogy a rendszer (gép) belsejében végbemenő folyamatokat közelebbről ismernénk.



10. ábra

A 10. ábrán bemutatott gép tengelyén folyamatosan rendelkezésre álló munkát a müszaki alkalmazásokban betöltött fontos szerepe miatt a technikai munkának nevezzük, és W_t-val jelöljük. Stacionárius esetben, miközben $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$ idő alatt Δm tömegü közeg halad át a gépen, a gép tengelyéről levehető teljesitmény

$$P_{12} = \frac{W_{t\,12}}{\Delta\tau}$$

Ez a teljesitmény a

$$w_{t12} = \frac{W_{t12}}{\Delta m}$$

fajlagos technikai munkával és az

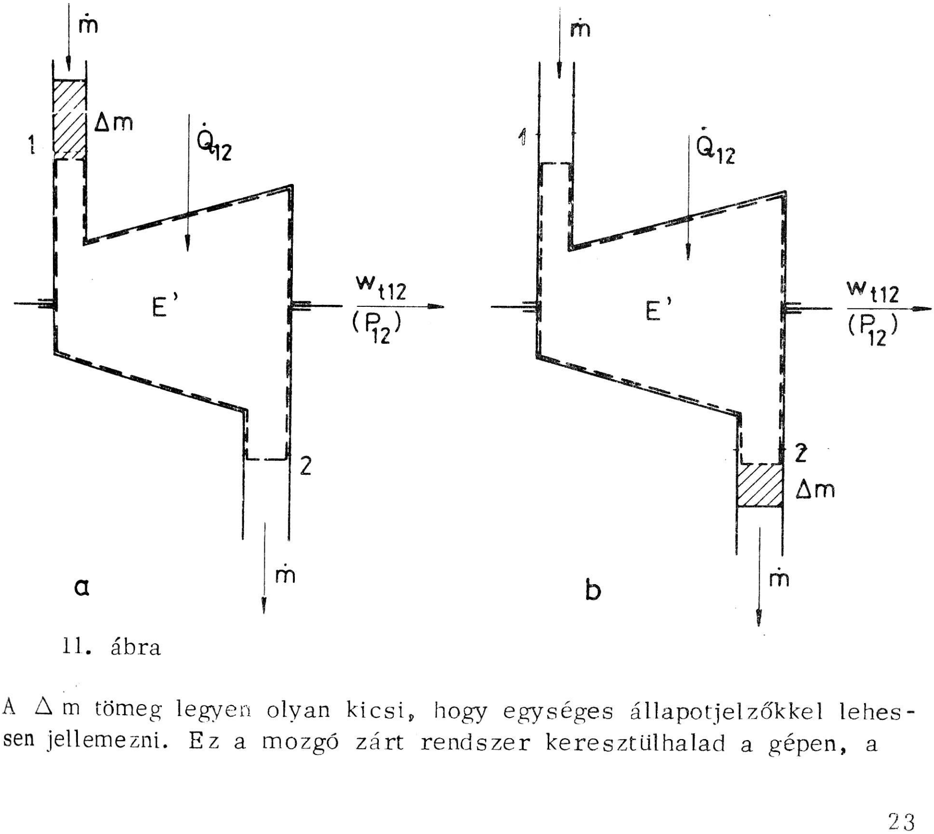
$$\dot{m} = \frac{\Delta m}{\Delta \tau}$$

az időben állandó tömegárammal is felirható az alábbi formában:

$$P_{12} = \dot{m}\, w_{t12}. \qquad 2.14$$

A gép teljesitménye az áthaladó közeg tömegáramával és a fajlagos technikai munkával arányos.

A nyitott rendszer technikai munkájának meghatározásához a 11. ábrának megfelelően gondolatban határoljunk el egy zárt rendszert (szaggatott vonallal jelölve) amely a nyitott rendszeren kivül még Δm tömegü közegmennyiséget is tartalmaz.



11. ábra

A Δm tömeg legyen olyan kicsi, hogy egységes állapotjelzőkkel lehessen jellemezni. Ez a mozgó zárt rendszer keresztülhalad a gépen, a folyamat kezdetén a Δm tömeg a gép belépő keresztmetszete előtt (11. ábra a) kép), a folyamat végén a gép kilépő keresztmetszete után helyezkedik el (11. ábra b) kép). A mozgó zárt rendszerre a 11. ábra jelöléseivel az I. főtétel a

$$Q_{12}+W^{*}_{12} = E_2-E_1 \tag{2.15}$$

alakban irható, ahol a zárt rendszer összenergiája a nyitott rendszer állandónak tekinthető E' energiájából és a Δm tömeg energiájából tevődik össze:

$$E = E' + \Delta m\left(u + \frac{c^2}{2} + gz\right).$$

A 2.15 összefüggés ezzel a

$$Q_{12}+W^{*}_{12}= \Delta m\left[\left(u_2+ \frac{c_2^2}{2} + gz_2\right) - \left(u_1 + \frac{c_1^2}{2} + gz_1\right)\right] \tag{2.16}$$

alakban irható fel, ahol Q_{12} a folyamat során a rendszerrel közölt hő és W^{*}_{12} az összmunka, amely a tengelyen jelentkező W_{t12} technikai munkának, valamint a be- és kilépő keresztmetszetben adódó térfogatváltozási munkának az összege. Miközben a zártnak képzelt rendszer elmozdul a gépben, a belépésnél térfogatcsökkenés, a kilépésnél térfogatnövekedés következik be, igy a belépésnél pozitiv, a kilépésnél negativ térfogatváltozási munkával kell számolnunk, amelyek a be- és kilépő keresztmetszetben uralkodó állapotjelzőkből számithatók. Ezzel az összmunka a

$$W^{*}_{12} = W_{t12}+ p_1v_1\,\Delta m-p_2v_2\,\Delta m$$

összefüggésből határozható meg. Ezzel az I. főtétel a következő formában irható fel:

$$Q_{12}+W_{t12}= \Delta m\left[\left(u_2+p_2v_2 +\frac{c_2^2}{2} +gz_2\right)-\left(u_1+p_1v_1 +\frac{c_1^2}{2} + gz_1\right)\right]. \tag{2.17}$$

Az egyenletet $\Delta\tau$ időtartammal osztva a

$$\dot{Q}_{12}+P_{12}=\dot{m}\left[\left(u_2+p_2v_2+\frac{c_2^2}{2}+gz_2\right)-\left(u_1+p_1v_1+\frac{c_1^2}{2}+gz_1\right)\right]$$

alakhoz jutunk. Itt $\Delta\tau$ időtartam tetszőleges, mivel a folyamat stacionárius és

$$\dot{m}=\frac{\Delta m}{\Delta\tau}$$ a tömegáram;

$$\dot{Q}_{12}=\frac{Q_{12}}{\Delta\tau}$$ a hőáram és

$$P_{12}=\frac{W_{t12}}{\Delta\tau}$$ a teljesitmény.

Az entalpia

Az I. főtétel (2.17) alakja speciálisan nyitott rendszerekre érvényes. Az együttesen jelentkező $u+pv$ összeg éppenugy állapotjelző, mint a benne szereplő belső energia, nyomás és fajtérfogat. Ezt az áramló közegeknél jelentkező állapotjelzőt entalpiának nevezzük és H-val jelöljük:

$$H = U + pV,$$

a fajlagos entalpia

$$h=\frac{H}{m}=u+pv.$$

Ezzel a nyitott rendszerekre használható alak a következő lesz:

$$\dot{Q}_{12}+P_{12}=\dot{m}\left[h_2-h_1+\frac{1}{2}\left(c_2^2-c_1^2\right)+g(z_2-z_1)\right], \qquad 2.18$$

ill.

$$q_{12}+w_{t12}=h_2-h_1+\frac{1}{2}\left(c_2^2-c_1^2\right)+g\,(z_2-z_1) \qquad 2.19$$

Szavakban kifejezve a nyitott rendszerbe vezetett hőnek és a technikai munkának az összege az entalpiának, a kinetikus és potenciális energiájának a változásával egyenlő.

Az I. főtételnek nyitott rendszerekre érvényes 2.19 szerinti alakjában csak a rendszerhatáron mérhető mennyiségek szerepelnek, ezért szigoruan csak ezekre szükséges a stacionárius feltételnek teljesülnie. Egyébként azonban a rendszer belsejében instacionárius folyamatok is lejátszódhatnak anélkül, hogy ez a körülmény az I. főtétel érvényességét befolyásolná.

Az entalpia

$$h = u + pv$$

alakjából adódik, hogy

$$du + p\,dv = dh - vdp.$$

Az I. főtétel zárt rendszerekre felirt alakjában a belső energia helyett egyenértékűleg használható az entalpia is. Reverzibilis esetben tehát ezzel a

$$\left(q_{12}\right)_{rev} = u_2 - u_1 + \int_1^2 p\,dv = h_2 - h_1 - \int_1^2 v\,dp \qquad 2.20$$

összefüggéshez jutunk, amelyet jól felhasználhatunk olyan esetekben, amelyekben az entalpiának van szerepe.

A technikai munka és a surlódási munka

A 11. ábrán bemutatott mozgó zárt rendszerre az I. főtétel kétféle alakját irhatjuk fel, egyrészt a 2.12 szerinti

$$q_{12} + w^{*}_{12} = u_2 - u_1 + \frac{1}{2}\left(c_2^2 - c_1^2\right) + g\left(z_2 - z_1\right),$$

másrészt

$$q_{12} + w_{t12} = h_2 - h_1 + \frac{1}{2}\left(c_2^2 - c_1^2\right) + g\left(z_2 - z_1\right)$$

alakot. A kettő összevetve és a 2.13 egyenletet is figyelembe véve a technikai munka kifejezhető az alábbiak szerint:

$$w_{t12}=w^*_{12}+p_2v_2-p_1v_1=w_{12}+p_2v_2-p_1v_1+\frac{1}{2}(c_2^2-c_1^2)+g(z_2-z_1).$$

Kvázistatikus esetben

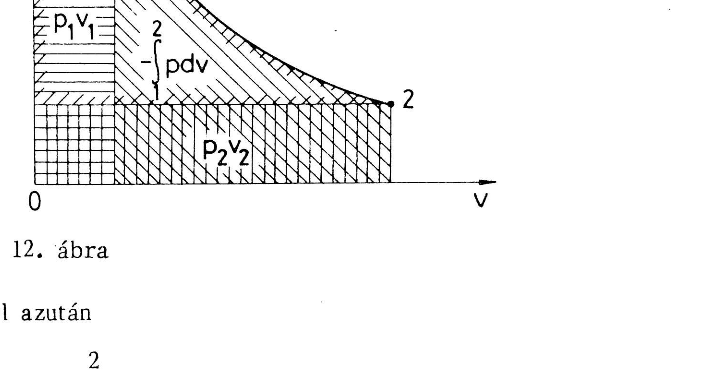
$$w_{12}=-\int_1^2 pdv+w_{12surl},$$

és igy irható, hogy

$$w_{t12}=-\int_1^2 pdv+p_2v_2-p_1v_1+\frac{1}{2}(c_2^2-c_1^2)+g(z_2-z_1)+w_{12surl}.$$

A kávzistatikus állapotváltozást p,v diagramban a 12. ábra tünteti fel. Az ábra alapján irható, hogy

$$-\int_1^2 pdv+p_2v_2-p_1v_1=\int_1^2 v\,dp$$



12. ábra

Ezzel azután

$$w_{t12}=\int_1^2 vdp+w_{12surl}+\frac{1}{2}(c_2^2-c_1^2)+g(z_2-z_1)\ . \qquad 2.21$$

A 12. ábrán az állapotváltozási görbétől balra kivetitett terület arányos az $\int_1^2$ vdp-vel; ez csak reverzibilis esetben és csak akkor egyenlő a technikai munkával, ha a kinetikus és a potenciális energia változása elhanyagolhatóan csekély.

Irreverzibilis kompresszió esetén a nyitott rendszerbe betáplálandó technikai munka a surlódási munkának, valamint a kinetikus és potenciális energia-növekedésnek megfelelően nagyobb, ezzel szemben irreverzibilis expanzió esetén a rendszerből nyerhető technikai munka a felsorolt energiáknak megfelelően kisebb az $\int_1^2$ vdp területtel arányos energiánál.

2.3. Kalorikus állapotegyenletek

A belső energia és az entalpia un. kalorikus állapotjelzők és igy egyszerü rendszerek esetében másik két állapotjelző segitségével kifejezhetők. Ilyen módon adódnak az

$$U = U\,(p, v); \quad U = U\,(p, T) \text{ és } U = U\,(v, t),$$

valamint a

$$H = H(p, v); \quad H = H\,(p, T) \text{ és } H = H\,(v, T)$$

összefüggések, amelyeket kalorikus állapotegyenleteknek szokás nevezni. Ezek a termikus és kalorikus állapotjelzők közötti összefüggések általában rendkivül bonyolultak. Kiindulva a belső energiára felirható fajlagos mennyiségekre vonatkozó

$$u = u\,(T, v)$$

kalorikus állapotegyenletből, a belső energia teljes differenciálja kifejezhető az alábbiak szerint:

$$du = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v dT + \left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T dv\,. \qquad 2.22$$