5 Energetski procesi s idealnim plinom

Procesi u zatvorenim i otvorenim sustavima, kružni procesi

Promatrat ćemo sada, izučavati i analizirati takve energetske procese s idealnim plinom koji su, u prvom približenju, odgovarajući procesima s realnim fluidom (plinom i vodenom parom) u termoelektranama. Ono što moramo pritom ustanoviti jest koliki se mehanički rad promjene volumena dobiva, ili ulaže, radi li se o energetskim procesima u zatvorenim sustavima, odnosno koliki se tehnički rad izmjenjuje, odvijaju li se takvi procesi u otvorenim sustavima, koliko se toplinske energije mora pritom dovoditi ili odvoditi, te koliki su tlakovi, temperature i specifični volumeni djelatne tvari (fluida), koja sudjeluje u procesima, i koji su odnosi među njima, kako bismo mogli provoditi i upravljati energetskim pretvorbama i procesima.

Svi se energetski procesi odvijaju dakako posredstvom realnih fluida, no, pokazuje se, uporabljive rezultate dobivamo i ako pojednostavnimo promatranja idealizirajući zbivanja. Prihvaćamo tako da vrijedi princip očuvanja mase koji, radi li se o zatvorenim sustavima, glasi: $\frac{dm}{dt} = 0$. Radi li se o procesima u otvorenim sustavima pretpostavljamo zasad da se oni odvijaju kao jednodimenzionalni i stacionarni, karakterizirani dakle s konstantnim masenim protokom, $\frac{dm}{dt} = \dot{m} =$ konst. [kg/s], što je analitički oblik principa očuvanja mase za jednodimenzionalne, stacionarne, strujne procese otvorenih sustava.

(U našim razmatranjima, naglasili smo, m će uvijek biti 1kg, a $\dot{m}$ 1kg/s.)

Nadalje, ponašanje realnog fluida u plinovitom stanju predstavljamo ponašanjem idealnog plina, tj. zakonom pv = RT koji nazivamo jednadžbom stanja. Jednadžba opisuje i predviđa ponašanje idealnog plina kada se istodobno mijenjaju i tlak i volumen i temperatura. Radi se o funkciji s dvije neovisne varijable, pa je prostorni koordinatni sustav potrebit za grafičko predstavljanje takve funkcije. Drugim riječima, jednadžba je stanja idealnog plina samo prividno jednostavna pa je stoga, kadgod je to moguće, zamjenjujemo funkcijom s jednom neovisnom varijablom. Naime, to je moguće u svim slučajevima kada je jedna od neovisnih varijabli konstantna, ili je ovisna o drugoj, pa je za grafički prikaz procesa dostatna ravnina. (Na taj način trodimenzionalni problem svodimo na dvodimenzionalni.) U većini se energetskih procesa proizvodnje električne energije, tijekom pretvorbi jednih oblika energije u druge (eksergiju), to normalno događa. Promjene se stanja idealnog plina dadu tada opisati jednadžbom

$$pv^n = \text{konst.}\ [\text{J/kg}] \qquad [5.1]$$

i pokazati u ravninskom dijagramu. Pogodan je p,v-dijagram u kome su ploštine površina „ispod“ ili „iza“ krivulje procesa proporcionalne (jednake) izmijenjenom mehaničkom radu (mehaničkom radu promjene volumena /“ispod“ krivulje/ odnosno tehničkom radu /“iza“ krivulje/), T,s-dijagram u kojem ploštine površina „ispod“ krivulja procesa odgovaraju izmijenjenoj toplinskoj energiji, te h,s-dijagram u kojemu duljine dužina predstavljaju izmijenjeni tehnički rad i toplinsku energiju.

n u jednadžbi [5.1] nije fizikalna veličina. Poprima sve vrijednosti u rasponu od veće ili jednake nuli do manje ili jednake beskonačnom u ovisnosti o tome kako se „gospodari“ s toplinskom energijom u energetskom procesu:

$$0 \leq n \leq \infty \qquad [5.2]$$

Ovisno o vrijednosti koje poprimi eksponent **n** u [5.1] razlikujemo nekoliko (pet) karakterističnih procesa:

- kad **n** poprimi vrijednost nula ($n = 0 \Rightarrow p = \text{konst.}$), radi se o **izobarnom procesu** odnosno o promjeni stanja idealnog plina uz konstantni tlak,
- kad **n** poprimi vrijednost jedan ($n = 1 \Rightarrow pv = \text{konst.}$) radi se o **izotermnom procesu** ($pv = RT = \text{konst.} \Rightarrow T = \text{konst.}$/) odnosno o promjeni stanja idealnog plina uz konstantnu temperaturu,
- kad **n** poprimi vrijednost $\varkappa$ ($n = \varkappa = \dfrac{c_p}{c_v} \Rightarrow q_{12} = 0$), radi se o **adijabatskom procesu** odnosno o promjeni stanja idealnog plina bez dovođenja i odvođenja toplinske energije,
- kad **n** poprimi vrijednost beskonačno ($n = \infty \Rightarrow v = \text{konst.}$) radi se o **izohornom procesu** odnosno o promjeni stanja idealnog plina uz konstantni volumen, i, konačno
- kad **n** poprimi vrijednost **n** (bilo koju vrijednost između nule i beskonačnog a da to nije ni nula ni beskonačna vrijednost, odnosno ni jedinica ni kapa: $n = n \neq 0, 1, \varkappa, \infty \Rightarrow pv^n = \text{konst.}$) radi se o **politropskom procesu** odnosno o promjeni stanja idealnog plina po politropama.

Te ćemo procese analizirati služeći se principima očuvanja mase i energije za zatvoreni i otvoreni sustav:

$m = \text{konst.} = 1\text{kg}$ i $\dot{m} = \text{konst.} = 1\text{kg/s}$,

$$q_{12} = u_2 - u_1 + w_{12} = u_2 - u_1 + \int_{v_1}^{v_2} pdv \text{ odnosno } dq = du + pdv \text{ i}$$

$$q_{12} + u_1 + p_1v_1 + \frac{1}{2}c_1^2 + gz_1 = w_{t12} + u_2 + p_2v_2 + \frac{1}{2}c_2^2 + gz_2 \text{ odnosno}$$

$$dq = dw_t + d(u + pv) + de_k + de_p = du + pdv = dh - vdp,$$

jednadžbom stanja idealnog plina

$pv = RT$ [J/kg] odnosno $pv_\mu = R_\mu T$ [J/kmol],

relacijama kojima su određeni mehanički rad promjene volumena

$$w_{12} = \int_{v_1}^{v_2} pdv \text{ odnosno } dw = pdv$$

i tehnički rad

$w_{t12} = -\int_{p_1}^{p_2} vdp - \frac{1}{2}(c_2^{\,2} - c_1^{\,2}) - g(z_2 - z_1)$ odnosno $dw_t = -vdp - de_k - de_p$,

relacijom koja povezuje integral $\int_{v_1}^{v_2} pdv$ i integral $\int_{p_1}^{p_2} vdp$:

$$\int_{v_1}^{v_2} pdv - (p_2v_2 - p_1v_1) = -\int_{p_1}^{p_2} vdp,$$

vezama između specifične topline idealnog plina i toplinske energije:

$$dq = cdT \text{ odnosno } c = \frac{dq}{dT} = \frac{du}{dT} + \frac{pdv}{dT} = \frac{dh}{dT} - \frac{vdp}{dT},$$

vezama između unutrašnje kaloričke energije i entalpije s temperaturom:

$du = c_v dT$ i $dh = c_p dT$,

kao vezama i između specifičnih toplina uz konstantni tlak i volumen:

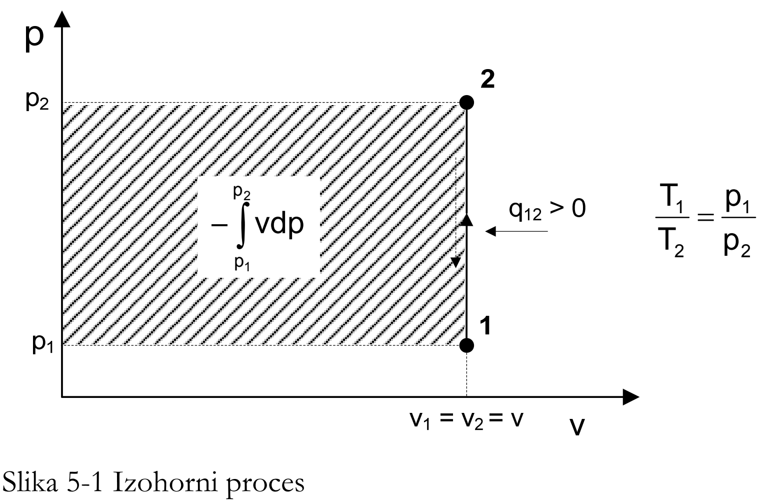
$$c_p = c_v + R,\ \kappa = \frac{c_p}{c_v},\ c_v = \frac{R}{\kappa - 1} \text{ i } c_p = \frac{\kappa R}{\kappa - 1},$$

kako bismo razvili specijalne izraze što vrijede za navedene procese.

5.1 Izohorni proces

Ako se idealnom plinu koji se nalazi u posudi čvrstih stijenki dovodi ili odvodi toplinska energija, kaže se da je to promjena stanja uz konstantni volumen (v = konst.), odnosno izohorni proces, Slika 5-1. (Krivulja procesa je izohora.) Dovođenjem se toplinske energije plinu uz konstantni volumen povisuje tlak, a odvođenjem smanjuje.

(Svaki se energetski proces s (idealnim) plinom može odvijati kako u jednom smjeru (1 → 2) tako i u drugom, suprotnom smjeru (2 → 1), dovođenjem odnosno odvođenjem toplinske energije i/ili mehaničkog rada (mehaničkog rada promjene volumena, rada trenja ili tehničkog rada).)



Slika 5-1 Izohorni proces

Izohorni se proces odvija poprimi li eksponent **n** u jednadžbi pv^n = konst. beskonačnu vrijednost. Vrijedi naime:

$pv^n = p_1 v_1^n = p_2 v_2^n$ = konst. i dalje $\frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{n}} = 1$ (kada $n \to \infty$ $\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{n}} \to 1 \Rightarrow v_1 = v_2 = v$)

Budući da je sustav zatvoren, mehanički je rad promjene volumena jednak nuli:

$dw = pdv = 0$ ($dv = 0$) [5.3]

Radi li se međutim o izohornom strujanju idealnog plina (ili idealne kapljevine), mehanički je rad (tehnički rad) različit od nule:

$w_{t12} = -\int_{p_1}^{p_2} vdp - \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) - g(z_2 - z_1) = -v(p_2 - p_1) - \delta e_k - \delta e_p$ [5.4]

Izmijenjena se toplinska energija određuje iz relacije

$dq = du + pdv$ ili $dq = dh - vdp$

Dobivamo:

$dq = c_v dT$, dakle $q_{12} = c_v(T_2 - T_1)$ [5.5]

ili

$dq = c_p dT - vdp$.

Diferenciramo li jednadžbu stanja idealnog plina, $pv = RT$, dobit ćemo:

$pdv + vdp = RdT$ [5.6]

Jer je v = konst, to je $pdv = 0$, pa je vdp jednako RdT ($vdp = RdT$). Vrijedi dakle,

$dq = c_p dT - vdp = c_p dT - RdT = (c_p - R)dT = c_v dT$.

Dobili smo relaciju [5.5] potvrdivši da se izmijenjena toplinska energija može računati iz relacije $dq = du + pdv$ ili $dq = dh - vdp$.

Ako je $T_2 > T_1$, $q_{12} > 0$, toplinska se energija dovodi u sustav, raste temperatura i tlak budući da se volumen ne mijenja ($pv = RT$).

U obrnutom se slučaju, odvođenjem toplinske energije, smanjuju temperatura i tlak. Naime, budući da za bilo koje stanje vrijedi jednadžba stanja idealnog plina ($pv = RT$), to je veza između temperature, tlaka i volumena:

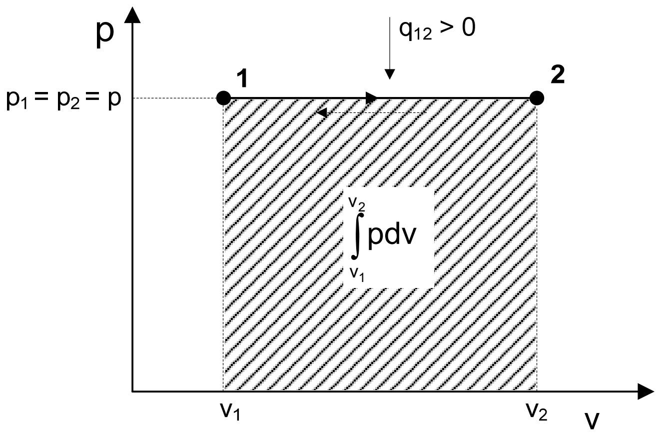
$pv = RT = p_1 v_1 = RT_1 = p_2 v_2 = RT_2 = p_1 v = RT_1 = p_2 v = RT_2$ ($v_1 = v_2 = v$)

pa je omjer temperatura jednak omjeru tlakova (višoj temperaturi izohornog procesa odgovara viši tlak, nižoj niži tlak):

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{p_1}{p_2} \qquad [5.7]$$

5.2 Izobarni proces

Poprimi li eksponent **n** u jednadžbi pv^n = konst. vrijednost nula (n = 0), odvija se proces uz konstantni tlak, izobarni proces, Slika 5-2. (Krivulja procesa je izobara.)



Slika 5-2 Izobarni proces

Dovodi li se zatvorenom sustavu (idealnom plinu) toplinska energija uz održavanje konstantnog tlaka, povećat će mu se volumen (pv = RT, T ↑ ⇒ v ↑ /p = konst./).

Količina je izmijenjene toplinske energije (toplinska se energija može dovoditi ili odvoditi):

$$dq = c_p dT,\; q_{12} = c_p(T_2 - T_1) \qquad [5.8]$$

a mehanički rad promjene volumena (ekspanzije ili kompresije):

$$dw = pdv \text{ odnosno } w_{12} = \int_{v_1}^{v_2} pdv = p(v_2 - v_1) = R(T_2 - T_1) \qquad [5.9]$$

Odvija li se izobarni proces u otvorenom sustavu, tehnički je rad jednak:

$dw_t = -vdp - de_k - de_p = - de_k - de_p$ (dp = 0) odnosno

$$w_{t12} = -\int_{p_1}^{p_2} vdp - \frac{1}{2}(c_2^{\,2} - c_1^{\,2}) - g(z_2 - z_1) = -\frac{1}{2}(c_2^{\,2} - c_1^{\,2}) - g(z_2 - z_1) \qquad [5.10]$$

Tehnički se rad dobiva pretvorbom iz kinetičke i/ili potencijalne energije plina, odnosno dovedeni se tehnički rad sustavu transformira u kinetičku i/ili potencijalnu energiju plina.

Vezu između temperature, tlaka i volumena za vrijeme odvijanja izobarnog procesa određujemo iz jednadžbe stanja idealnog plina

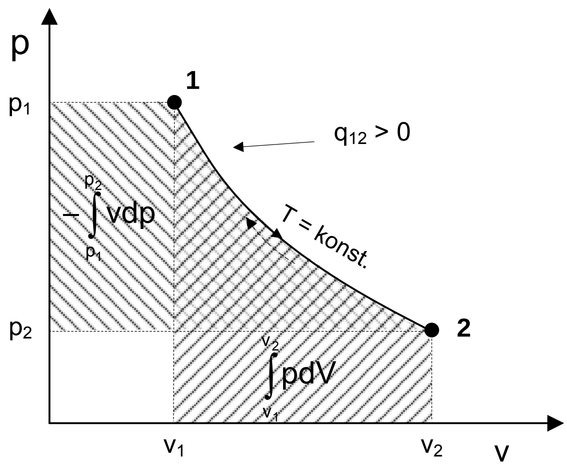
$T_1 = \frac{pv_1}{R}$ i $T_2 = \frac{pv_2}{R}$ pa će vrijediti (višoj temperaturu odgovara veći volumen, nižoj manji):

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{v_1}{v_2} \qquad [5.11]$$

Dovodi li se toplinska energija ($q_{12} > 0$), povećava se temperatura [5.8] i volumen plina [5.11] uz istodobno dobivanje mehaničkog rada promjene volumena (ekspanzija plina). Odvija li se međutim proces u suprotnom smjeru (od 2 prema 1), potrebno je sustavu dovoditi mehanički rad (kompresija plina) uz istodobno odvođenje toplinske energije.

5.3 Izotermni proces

Poprimi li eksponent **n** u jednadžbi pv^n = konst. vrijednost jedan (n = 1), odvija se proces uz konstantnu temperaturu, izotermni proces, Slika 5-3. (Krivulja procesa je izoterma.)



Slika 5-3 Izotermni proces

Jednadžba se izoterme dobiva iz jednadžbe stanja idealnog plina i jednaka je:

$$pv = RT = \text{konst. (jer je } T = \text{konst.)} \qquad [5.12]$$

Vrijedi pritom odnos (većem tlaku odgovara manji volumen, manjem veći):

$$pv = p_1v_1 = p_2v_2 \text{ odnosno } \frac{p_1}{p_2} = \frac{v_2}{v_1} \qquad [5.13]$$

Izoterma je istostranična hiperbola (u p,v koordinatnom sustavu). Ploština je površine „ispod“ krivulje procesa jednaka (zanemarimo li rad trenja) izmijenjenom mehaničkom radu promjene volumena, a ploština „iza“ krivulje procesa (zanemarimo li rad trenja te promjene kinetičke i potencijalne energije) izmijenjenom tehničkom radu. Uzmemo li u obzir da prema [5.12] odnosno [5.13] vrijedi

$$p = \frac{p_1 v_1}{v} = \frac{p_2 v_2}{v} = \frac{RT}{v} \qquad [5.14]$$

dobivamo da je izmijenjeni mehanički rad promjene volumena (doveden ili odveden) jednak:

$$w_{12} = \int_{v_1}^{v_2} p dv = p_1 v_1 \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v} = p_1 v_1 \ln \frac{v_2}{v_1} = p_1 v_1 \ln \frac{p_1}{p_2} = RT \ln \frac{v_2}{v_1} .= RT \ln \frac{p_1}{p_2} \qquad [5.15]$$

($p_1 v_1 = p_2 v_2 = RT$)

a izmijenjeni tehnički rad:

$$w_{t12} = -\int_{p_1}^{p_2} v dp - \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) - g(z_2 - z_1) = p_1 v_1 \ln \frac{v_2}{v_1} - \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) - g(z_2 - z_1) \qquad [5.16]$$

Naime integral $-\int_{p_1}^{p_2} v dp$ mora biti jednak integralu $\int_{v_1}^{v_2} p dv$ budući da je izoterma istostrana hiperbola. I doista, diferenciramo li jednadžbu stanja idealnog plina, dobit ćemo: pdv + vdp = RdT = 0 (dT = 0, jer je T = konst.). Vrijedi dakle pdv = -vdp odnosno $\int p dv = -\int v dp$.

Toplinsku energiju koja se izmjenjuje za vrijeme izotermnog procesa odredit ćemo iz 1.glavnog stavka termodinamike za zatvorene sustave:

dq = du + pdv = pdv = dw (du = c_vdT = 0, T = konst.) odnosno

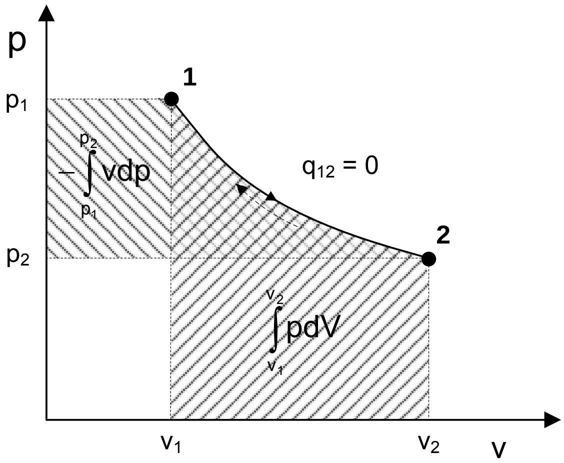
$$q_{12} = w_{12} = \int_{v_1}^{v_2} p dv = p_1 v_1 \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v} = p_1 v_1 \ln \frac{v_2}{v_1}$$
$$= p_1 v_1 \ln \frac{p_1}{p_2} = RT \ln \frac{v_2}{v_1} = RT \ln \frac{p_1}{p_2} \qquad [5.17]$$

Uz izotermičku je ekspanziju plina obavljeni mehanički rad promjene volumena (rad predan u okolicu, $w_{12} > 0$) jednak dovedenoj toplinskoj energiji ($q_{12} > 0$), a za izotermičku kompresiju mora se dovoditi mehanički rad ($w_{12} < 0$) i odvoditi ista količina toplinske energije ($q_{12} < 0$). Ne smije se međutim zaključiti da se pritom sva dovedena toplinska energija pretvara u mehanički rad: mehanički se rad dobiva pretvorbom iz eksergije unutrašnje kaloričke energije plina, a dovedena toplinska energija, koja se pretvara u unutrašnju kaloričku energiju plina, omogućuje da se za vrijeme ekspanzije (energetskog procesa proizvodnje mehaničkog rada) ne smanjuje temperatura sustava (idealnog plina).

5.4 Adijabatski proces

Poprimi li eksponent **n** u jednadžbi pv^n = konst. vrijednost **ϰ** ($n = \varkappa = \frac{c_p}{c_v}$), odvija se proces bez dovođenja i odvođenja toplinske energije, dakle proces uz potpunu toplinsku izolaciju ($q_{12} = 0$). Takav proces nazivamo adijabatskim**,** a krivulju procesa adijabatom, Slika 5-4.

(Kad je to povratljiva adijabata (o tome ćemo govoriti kasnije), proces se naziva izentropskim.)



Slika 5-4 Adijabatski proces

Pokažimo prvo da je energetski proces predstavljen relacijom

$pv^{\varkappa}$ = konst. [5.18]

(hiperbola u p,v koordinatnom sustavu) doista proces koji se odvija bez dovođenja i odvođenja toplinske energije (adijabatski proces).

Prema prvom je glavnom stavku termodinamike toplinska energija što se izmjenjuje između zatvorenih i otvorenih sustava i okolice određena ovim diferencijalnim jednadžbama:

$dq = du + pdv = dh - vdp$

Radi li se o adijabatskom procesu jednadžbe prelaze u oblik (jer se toplinska energija ne izmjenjuje /$q_{12} = 0$/):

$0 = du + pdv = dh – vdp$ [5.19]

Relacija je dakle [5.19] diferencijalna jednadžba (diferencijalne jednadžbe) adijabatskog procesa. Rješenje te jednadžbe (tih jednadžbi) mora biti relacija [5.18].

Pišemo:

$du + pdv = 0$, odnosno $c_v dT = -pdv$ (I), i $dh – vdp = 0$, odnosno $c_p dT = vdp$ (II).

Dijeljenjem (II) s (I) dobivamo:

$\frac{c_p}{c_v} = \kappa = -\frac{vdp}{pdv}$ (III).

Diferencijalnu jednadžbu (III) možemo odmah riješiti separacijom varijabli i integriranjem:

$\kappa \frac{dv}{v} = - \frac{dp}{p}$

$\int \kappa \frac{dv}{v} = - \int \frac{dp}{p}$ +C. Radi se o elementarnim integralima ($\int \frac{dx}{x}$ = lnx + C) čija su rješenja:

κ lnv = - lnp + ln konst. (C = ln konst.) Dalje je:

$\ln v^{\kappa} + \ln p$ = ln konst, odnosno, $\ln(pv^{\kappa})$ = ln konst.

Rješenje je te logaritamske jednadžbe jednadžba adijabatskog procesa [5.18]:

pv^{κ} = konst.

Dakle je doista energetski proces predstavljen relacijom pv^{κ} = konst. proces koji se odvija uz potpunu toplinsku izolaciju (bez dovođenja i odvođenja toplinske energije).

Ploština je površine „ispod" krivulje adijabatskog procesa jednaka (zanemarimo li rad trenja) izmijenjenom mehaničkom radu promjene volumena, a ploština površine „iza" krivulje procesa izmijenjenom tehničkom radu (zanemarimo li rad trenja te promjene kinetičke i potencijalne energije). Te radove možemo odmah dobiti rješenjem integrala:

$w_{12} = \int_{v_1}^{v_2} pdv$ i $w_{t12} = - \int_{p_1}^{p_2} vdp - \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) - g(z_2 - z_1)$

jer poznajemo funkcionalne odnose između volumena i tlaka iz jednadžbe [5.18].

Npr.,

$p = \frac{p_1 v_1^{\kappa}}{v^{\kappa}}$ ($p_1 v_1^{\kappa}$ = konst.) , pa je mehanički rad promjene volumena jednak:

$$w_{12} = \int_{v_1}^{v_2} pdv = p_1 v_1^{\kappa} \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v^{\kappa}} = \frac{p_1 v_1^{\kappa}}{\kappa - 1}\left(\frac{1}{v_1^{\kappa-1}} - \frac{1}{v_2^{\kappa-1}}\right) \quad [5.20]$$

Postupit ćemo međutim jednostavnije budući da se radi o „adijabatskom" mehaničkim radu (mehaničkom radu koji se izmjenjuje između adijabatskog sustava i okolice). Takav je mehanički rad veličina stanja pa je njegova vrijednost određena samo početnim i konačnim stanjem sustava a ne i procesom između tih stanja. To slijedi izravno iz 1. glavnog stavka termodinamike primijenjenog na procese s adijabatskim sustavima:

$$dq = du + pdv = dh - vdp = 0 \quad [5.21]$$

pdv i –vdp sada su totalni diferencijali (mehaničkog rada promjene volumen i tehničkog rada) jer je pdv = -du, a vdp = dh. Ukupne radove dobivamo integrirajući relacije [5.21] preko cijelog adijabatskog procesa:

$$w_{12} = \int_{v_1}^{v_2} pdv = -\int_{u_1}^{u_2} du = -\int_{T_1}^{T_2} c_v dT = c_v (T_1 - T_2) = \frac{R}{\kappa - 1}(T_1 - T_2) \qquad [5.22]$$

i

$$-\int_{p_1}^{p_2} vdp = -\int_{h_1}^{h_2} dh = -\int_{T_1}^{T_2} cpdT = c_p (T_1 - T_2) = \frac{\kappa \cdot R}{\kappa - 1}(T_1 - T_2) \qquad [5.23]$$

Dakle je izmijenjeni tehnički rad jednak:

$$w_{t12} = c_p (T_1 - T_2) - \frac{1}{2}(c_2^{\,2} - c_1^{\,2}) - g(z_2 - z_1) \qquad [5.24]$$

Odredimo sada odnose između tlakova, volumena i temperatura adijabatskih procesa. Krenimo od jednadžbe stanja idealnih plinova. Postupimo ovako. Napišimo prvo jednadžbu stanja za početno (1) i konačno stanje (2) adijabatskog procesa i zatim ih množimo kako je pokazano. Dobit ćemo relacije (A) i (B):

$p_1 v_1 = RT_1 \,/\bullet\, v_1^{\kappa-1} \Rightarrow p_1 v_1^{\kappa} = RT_1 v_1^{\kappa-1}$ (A)

$p_2 v_2 = RT_2 \,/\bullet\, v_2^{\kappa-1} \Rightarrow p_2 v_2^{\kappa} = RT_2 v_2^{\kappa-1}$ (B)

Budući da vrijedi: $p_1 v_1^{\kappa} = p_2 v_2^{\kappa} = pv^{\kappa}$, to su i desne strane relacija (A) i (B) jednake:

$RT_1 v_1^{\kappa-1} = RT_2 v_2^{\kappa-1}$, pa dakle postoji ovakav odnos između temperatura i specifičnih volumena za vrijeme adijabatskog procesa:

$$T_1 v_1^{\kappa-1} = T_2 v_2^{\kappa-1} \text{ ili } \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\kappa-1} \qquad [5.25]$$

Za vrijeme se adijabatske ekspanzije ($v_2 > v_1$, dobivanja mehaničkog rada), smanjuje temperatura, $T_2 < T_1$. Obratno vrijedi za proces kompresije, ulaganja (dovođenja) mehaničkog rada.

Jer vrijedi i odnos:

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{\kappa}} \qquad [5.26]$$

to je relacija koja povezuje sve tri veličine stanja (tlak, temperaturu i volumen) za vrijeme odvijanja adijabatskog procesa jednaka.

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\kappa-1} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad [5.27]$$

Višoj temperaturi za vrijeme odvijanja adijabatskog procesa odgovara veći tlak i manji volumen., nižoj manji tlak i veći volumen.

5.5 Politropski proces

U realnim se strojevima međutim ne postižu ni izotermni ni adijabatski procesi već politropski procesi koji se mogu prikazati općim hiperbolama, tzv. politropama, kojima je jednadžba:

pv^n = konst. [5.28]

(S iznimkom agregatnih pretvorbi, izotermni bi se procesi odvijali beskonačno sporo, a adijabatski se procesi u realnosti ne mogu odvijati budući da ne postoji savršena (potpuna) toplinska izolacija: u realnim se situacijama stoga uvijek izmjenjuju određene količine toplinske energije.)

Eksponent **n** poprima pritom vrijednosti $0 < n < \infty$ a da to nisu 1 ni $\varkappa$. (Ako je n = 1 radi se o izotermnom procesu, a kada je $n = \varkappa$ o adijabatskom procesu.)

Za razliku od adijabatskog procesa, pri politropskom se procesu izmjenjuje toplinska energija. Njezin ćemo iznos odrediti rješenjem diferencijalne jednadžbe 1. glavnog stavka termodinamike:

dq = du + pdv ili dq = dh – vdp.

Pišemo:

$dq = du + pdv = c_v dT + pdv$ [5.29]

Pritom je, relacija [5.28],

$$p = \frac{konst.}{v^n} \quad [5.30]$$

pa bismo uvrštenjem [5.30] u [5.29] dobili diferencijalnu jednadžbu koju možemo odmah riješiti integriranjem. Međutim, ne ćemo tako postupiti. Instruktivnije rješenje jednadžbe [5.29] dobit ćemo ako član pdv u toj jednadžbi izrazimo relacijom koja ima (odmah vidljivo) svojstvo totalnog diferencijala. Diferencirat ćemo stoga jednadžbu politropskog procesa, pv^n = konst, i jednadžbu stanja idealnog plina, pv = RT, budući da ona vrijedi za bilo koji proces s idealnim plinom pa mora dakle vrijediti i za politropske procese. Dobit ćemo:

pv^n = konst. /dif. $\Rightarrow$ $v^n dp + npv^{n-1}dv = 0$.

Podijelimo li jednadžbu $v^n dp + npv^{n-1}dv = 0$ s v^{n-1} dobit ćemo diferencijalnu jednadžbu politropskog procesa:

vdp + npdv = 0 [5.31]

Diferencirajmo sada jednadžbu stanja idealnog plina. Dobivamo:

$pv = RT$ /dif. $\Rightarrow$ $vdp + pdv = RdT$ [5.32]

Odbijmo [5.32] od [5.31]:

$vdp + npdv = 0$

$-vdp - pdv = -RdT$

da bismo dobili

$npdv – pdv = -RdT$, pa je pdv jednako:

$$pdv = -\frac{RdT}{n-1} \quad [5.33]$$

Uvrstimo li [5.33] u [5.29] dobivamo diferencijalnu jednadžbu koja određuje količine toplinske energije što se izmjenjuju za vrijeme politropskih procesa. Ta se jednadžba može odmah integrirati izrazimo li je u obliku ($R = c_p – c_v$, $\varkappa = c_p/c_v$):

$$dq = du + pdv = c_v dT + pdv = c_v dT - \frac{RdT}{n-1}$$
$$= \left(c_v - \frac{c_p - c_v}{n-1}\right) dT = c_v\left(\frac{n-1}{n-1} - \frac{\kappa-1}{n-1}\right) dT = = c_v \frac{n-\kappa}{n-1} dT \quad [5.34]$$

Dakle je $dq = c_v \dfrac{n-\kappa}{n-1} dT$ toplinska energija koja se izmjenjuje s okolicom, dovodi ili odvodi, za vrijeme politropskih procesa. Uočavamo sličnost s izrazima koji određuju količine toplinske energije što se izmjenjuju za vrijeme odvijanja izohornih i izobarnih procesa:

$dq = c_v dT$ i $dq = c_p dT$. Nameće se zaključak da relacija $c_v \dfrac{n-\kappa}{n-1}$ mora biti „politropska specifična toplina“. Označit ćemo je s indeksom **n**:

$$c_n = c_v \frac{n-\kappa}{n-1} \quad [5.35]$$

n u [5.35] upućuje da postoji beskonačno mnogo specifičnih toplina budući da n poprima sve vrijednosti između nule (uključivo) i beskonačnog (uključivo): $0 \le n \le \infty$. I, doista, poprimi li **n** vrijednosti $0 \le n \le \infty$ dobivamo:

$n = 0 \Rightarrow c_n = c_v \bullet \varkappa = c_p$ (izobarni proces, specifična toplina uz konstantni tlak),

$n = 1 \Rightarrow c_n = \infty = c_{izotermna}$ (izotermni proces, specifična toplina uz konstantnu temperaturu beskonačno je velika: toplinska se energija dovodi (odvodi) a da se pritom temperatura sustava ne mijenja),

$n = \varkappa \Rightarrow c_n = 0 = c_{adijabatska}$ (adijabatski proces: adijabatska je specifična toplina jednaka nuli budući da se toplinska energija ne dovodi niti odvodi),

$n = \infty \Rightarrow c_n = c_v$ (izohorni proces, specifična toplina uz konstantni volumen), i, konačno

$0 < n < \infty$ ($n \neq 0, 1, \varkappa, \infty$) $\Rightarrow c_n = c_v \dfrac{n-\kappa}{n-1}$ (politropska specifična toplina).

Integrirajući diferencijalnu jednadžbu [5.34] dobivamo toplinsku energiju koja se izmjenjuje za vrijeme politropskog procesa:

$$q_{12} = c_v \frac{n-\kappa}{n-1} (T_2 - T_1) \qquad [5.36]$$

Poprimi li n vrijednosti između 1 i $\varkappa$, $\mathbf{1 < n < \varkappa}$, politropska će specifična toplina biti negativna, $c_n < 0$, premda će se toplinska energija dovoditi ($q_{12} > 0$) u proces. Naime, dovodi li se toplinska energija i pritom dobiva mehanički rad (plin ekspandira), temperatura će T_2 biti manja od temperature T_1, $T_2 < T_1$, pa će zbog toga biti $q_{12} > 0$.

I sada će, dakako, mehanički rad promjene volumena biti jednak ploštini površine „ispod“ krivulje procesa, a tehnički proporcionalan onoj „iza“, te će ti radovi biti određeni izrazima analognim onima pomoću kojih se određuju radovi adijabatskog procesa, relacije [5.20], [5.22] i [5.24], s time da se indeks $\boldsymbol{\varkappa}$ zamjenjuje u svim relacijama koje određuju mehaničke radove, indeksom **n.** Npr., relacija [5.20] postaje jednaka

$$w_{12} = \int_{v_1}^{v_2} pdv = p_1 v_1^n \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v^n} = \frac{p_1 v_1^n}{n-1}\left(\frac{1}{v_1^{n-1}} - \frac{1}{v_2^{n-1}}\right) = \frac{R}{n-1}\left(T_1 - T_2\right)$$

a za tehnički rad politropskog procesa dobivamo, jer je

$$w_{t12} = -\int_{p_1}^{p_2} vdp = -\int_{h_1}^{h_2} dh = -\int_{T_1}^{T_2} cpdT = c_p\,(T_1 - T_2) = \frac{\kappa \cdot R}{\kappa - 1}\left(T_1 - T_2\right), \text{ odnosno}$$

$$w_{t12} = -\int_{p_1}^{p_2} vdp = \int_{v_1}^{v_2} pdv + p_1 v_1 - p_2 v_2 = \frac{R}{n-1}\left(T_1 - T_2\right) + R\left(T_1 - T_2\right) =$$

$$= \frac{nR}{n-1}\left(T_1 - T_2\right),$$

ili

$w_{t12} = \dfrac{nR}{n-1}\,(T_1 - T_2) - \dfrac{1}{2}\,(c_2^{\,2} - c_1^{\,2}) - g(z_2 - z_1)$ ne možemo li zanemariti promjenu kinetičke i potencijalne energije.

Isto vrijedi i za relacije koje povezuje tlak, temperaturu i volumen za vrijeme odvijanja adijabatskog procesa; da bismo dobili relacije koje vrijede za politropske procese zamjenjujemo $\boldsymbol{\varkappa}$ s **n**:

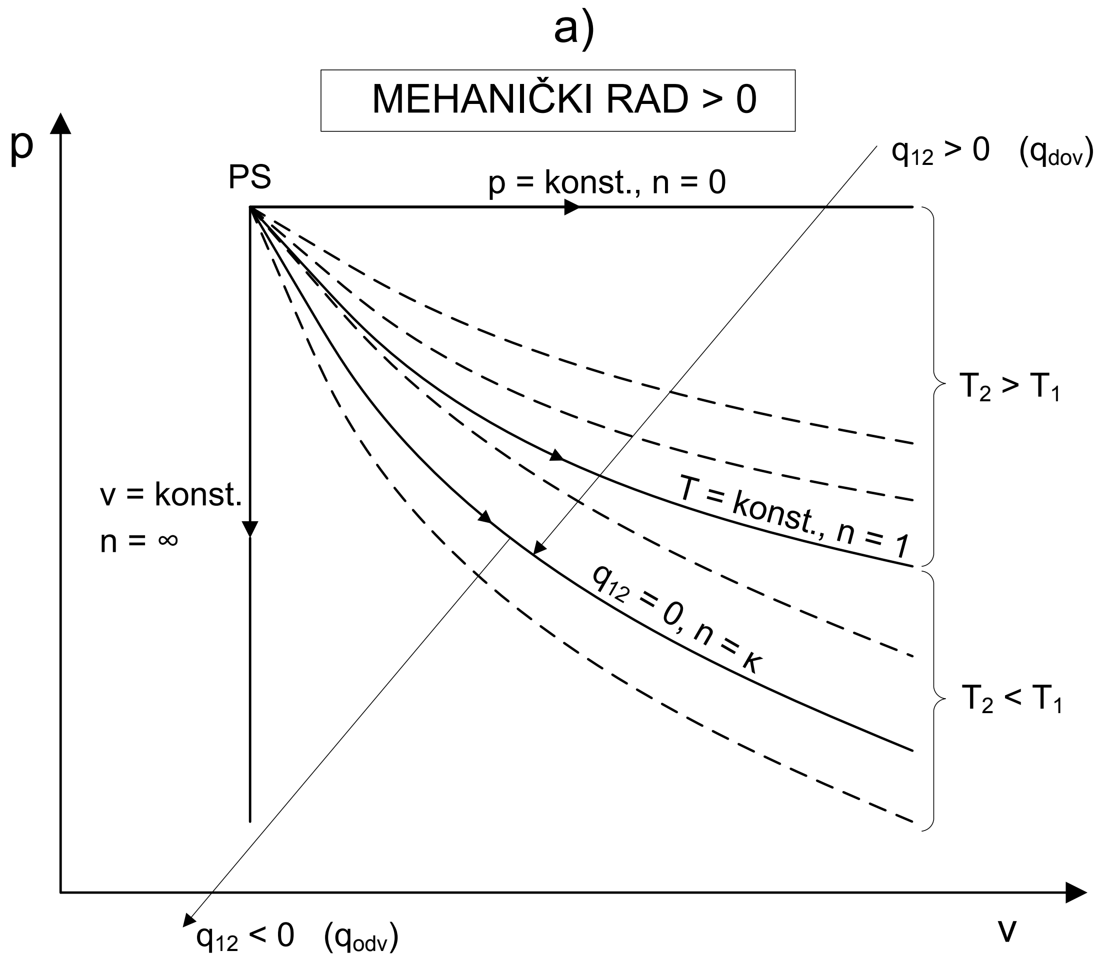
$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{n-1} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{n-1}{n}} \qquad [5.37]$$

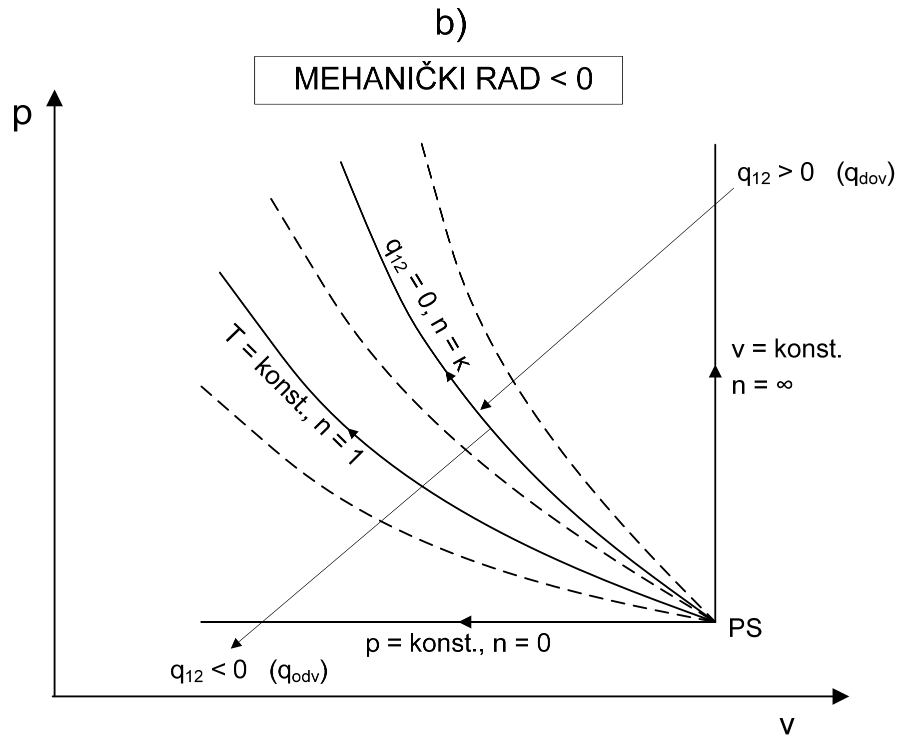
Očito se dakle za vrijeme promatrane politropske ekspanzije (**1 < n < ϰ**) temperatura smanjuje, $T_2 < T_1$, jer je $n > 1$, a $v_2 > v_1$.

Što znači negativna politropska specifična toplina?

Za vrijeme se ekspanzije plina (dobivanja mehaničkog rada) toplinska energija dovodi u proces ($q_{12} > 0$) u svim slučajevima kad je $1 < n < \varkappa$ jer je razlomak u [5.36] tada negativan (negativna je politropska specifična toplina), a $T_2 < T_1$. Negativna specifična toplina znači da je eksergija toplinske energije, koja se dovodi u sustav (plinu), manja od dobivenog mehaničkog rada, a jer je energija (eksergija) nestvoriva, manjak eksergije nadoknađuje se eksergijom unutrašnje kaloričke energije plina kome se zbog toga smanjuje temperatura.

Očito, s energetskog su stajališta zbog toga prihvatljivi samo politropski procesi s vrijednosti eksponenta **n** između 1 i ϰ: $1 < n < \varkappa$, Slika 5-5 a). Procesi izvan tog područja energetski su neprihvatljivi; npr. politropski proces ekspanzije (dobivanje mehaničkog rada) kojeg, da bi se mogao odvijati, treba hladiti (odvoditi toplinsku energiju).





Slika 5-5 Politropski procesi pri ekspanziji (a) i pri kompresiji (b)

U slučaju ekspanzije (dobivanje mehaničkog rada), Slika 5-5 a), ukoliko su vrijednosti eksponenta **n**:

$0 \leq n < \kappa$ toplinska se energija mora dovoditi u proces ($q_{12} = q_{dov} > 0$),

jedino kad je $n = \varkappa$ toplinska se energija niti dovodi niti odvodi ($q_{12} = 0$, adijabatski proces), a ako je

$\kappa < n \leq \infty$ toplinska se energija mora odvoditi u proces ($q_{12} = q_{odv} < 0$).

Očito, valja izbjegavati područja $T_2 > T_1$ budući da se toplinska energija „troši“ i na zagrijavanje plina (povećanje unutrašnje kaloričke energije) a ne samo na dobivanje mehaničkog rada, kao i područja u kojima se toplinska energija mora odvoditi kako bi se dobivao mehanički rad. Dakle su uistinu najbolji politropski procesi dobivanja mehaničkog rada oni s vrijednostima $1 < n < \varkappa$.

Uočimo i ove odnose (kasnije ćemo se pozvati na njih): ukoliko su krivulje politropskih procesa položitije od krivulje adijabatskog procesa u p,v-dijagramu, toplinska se energija mora dovoditi plinu za vrijeme procesa ekspanzije (dobivanje mehaničkog rada). Ukoliko su pak krivulje politropskih procesa strmije od krivulje adijabatskog procesa u p,v-dijagramu, toplinska se energija mora odvoditi plinu za vrijeme procesa ekspanzije (dobivanje mehaničkog rada).

Suprotno vrijedi u slučaju kompresije (obavljanje mehaničkog rada), Slika 5-5 b). Ako su vrijednosti eksponenta **n**:

$\kappa < n \leq \infty$ toplinska se energija mora dovoditi u proces ($q_{12} = q_{dov} > 0$).

$n = \varkappa$ toplinska se energija niti dovodi niti odvodi ($q_{12} = 0$, adijabatski proces),

$0 \leq n < \kappa$ toplinska se energija mora odvoditi iz procesa ($q_{12} = q_{odv} < 0$).

Sada vrijedi: ukoliko su krivulje politropskih procesa strmije od krivulje adijabatskog procesa u p,v-dijagramu, toplinska se energija mora dovoditi plinu za vrijeme procesa kompresije (obavljanja mehaničkog rada), a ako su položitije od adijabate, toplinska se energija mora odvoditi.

5.6 Kružni procesi

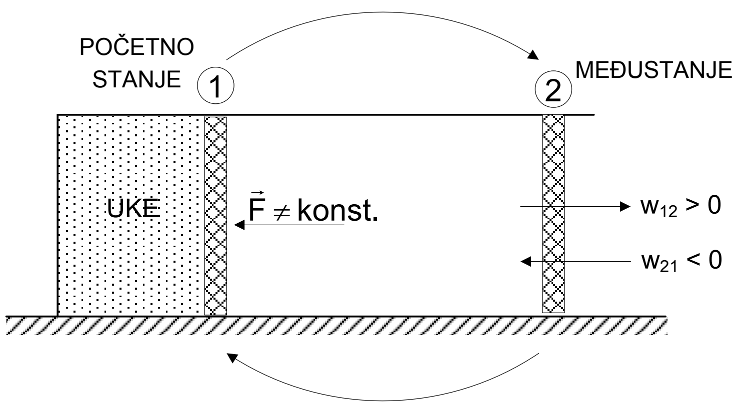
Govorit ćemo dalje o procesima s procesima. Najvažniji su od takvih procesa **kružni procesi**. Definirano je već dosad da se svaki proces /sklop procesa/ koji sustav /bilo kakav sustav/ dovodi ponovno u početno stanje naziva **kružnim procesom**. Pritom, nakon što je protekao kružni proces, sve veličine stanja, kao tlak, temperatura, volumen, unutrašnja kalorička energija, entalpija, itd, postižu početne vrijednosti i to vrijedi bez obzira je li je kružni proces sastavljen od povratljivih ili nepovratljivih procesa, odnosno radi li se o zatvorenom, otvorenom itd. sustavu.

5.6.1 Kružni procesi zatvorenih sustava

Kako je niknula ideja o uspostavljanju kružnih procesa?

Promatrajmo zatvoreni sustav i upitajmo se je li je moguće iz takvog sustava trajno dobivati mehanički rad a da ga ne „pretvorimo“ u otvoreni sustav?

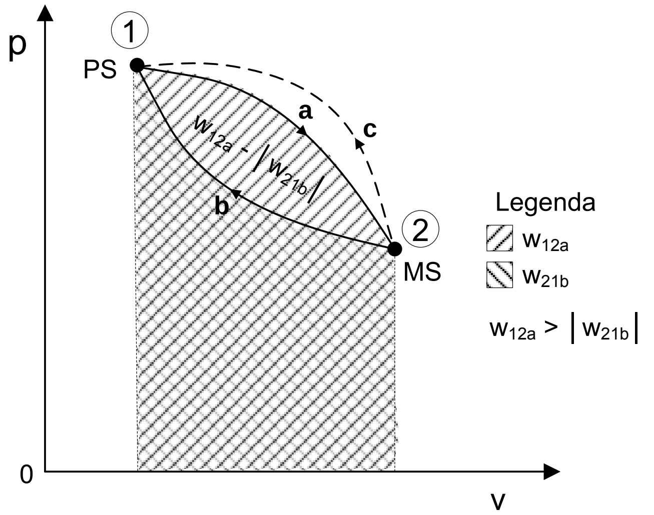
Očito, da, uz određene uvjete, vratimo li zatvoreni sustav, nakon što je obavio mehanički rad promjene volumena, w_{12} [J/kg], (nekako) u početno stanje (1), Slika 5-6. Naime, da bi se iz zatvorenog sustava rad mogao neprestano dobivati, a ne samo jednokratno, nužno je zatvoreni sustav podvrći procesu (procesima) koji će ga vratiti (vraćati) ponovno i ponovno u početno stanje kako bismo neprekidno mogli dobivati mehanički rad promjene volumena. Sustav će dakle „kružiti“, odatle naziv „kružni proces“, između početnog stanja (1) i, nazovimo to tako, (nekog) međustanja stanja (2), stanja kada je sva eksergija zatvorenog sustava pretvorena u mehanički rad, a količina će dobivenog mehaničkog rada ovisiti tada samo o broju obavljenih kružnih procesa.



Slika 5-6 „Kruženje“ zatvorenog sustava između početnog stanja i međustanja

No, kako vratiti sustav u početno stanje? Kompresijom očito, dakle trošenjem mehaničkog rada, w_{21} [J/kg] < 0. Ima li to smisla? Da, uz uvjet da je dobiveni mehanički rad za vrijeme ekspanzije zatvorenog sustava, w_{12}, veći od apsolutnog iznosa uloženog mehaničkog rada komprimiranja sustava (vraćanja u početno stanje), w_{21}, Slika 5-7:

$w_{12} > |w_{21}|$.



Slika 5-7 Ukupni mehanički rad promjene volumena zatvorenog sustava podvrgnutog kružnom procesu

Drugim riječima, zatvoreni sustav **mora** biti podvrgnut procesima poput procesa a i b, Slika 5-7, između početnog stanja (PS) 1 i međustanja (MS) 2 kako bi ukupno dobiveni rad za vrijeme kružnog procesa bio pozitivan:

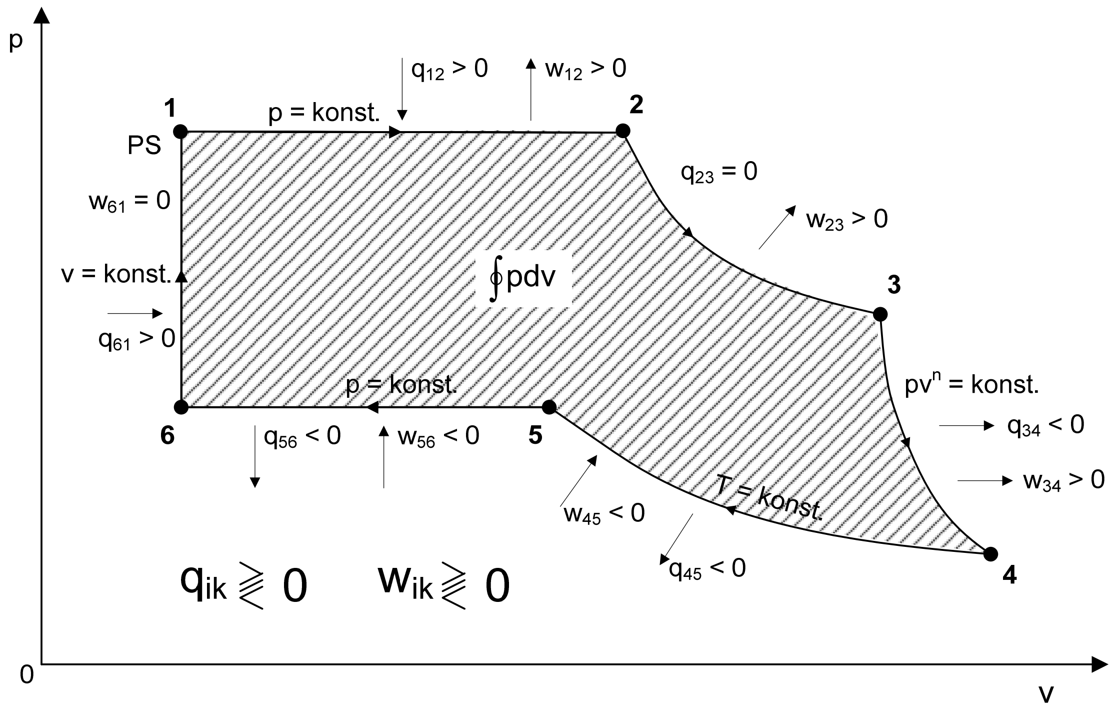
$w_{12a} + w_{21b} = w_{12a} - |w_{21b}| = w_{KP_{ZS}} > 0.$

(Vraćanje sustava u početno stanje procesom **c,** želimo li dobivati mehanički rad, bilo bi besmisleno jer bismo tada sumarno morali trošiti mehanički rad za odvijanje kružnog procesa umjesto da ga dobivamo:

$w_{12a} + w_{21c} = w_{12a} - |w_{21c}| = w_{KP_{ZS}} < 0.$)

Kako postići da vrijedi $w_{12a} > |w_{21b}|$? Kako je moguće vratiti sustav u početno stanje uz manji utrošak mehaničkog rada (ne narušavajući princip očuvanja energije)?

Pomoću toplinske energije! Oblika energije koja, poput mehaničkog rada, prelazi granice sustava nevezano uz tvar. Drugim riječima, zatvoreni ćemo sustav vratiti (vraćati) u početno stanje trošenjem mehaničkog rada ali i uz pomoć toplinske energije zadovoljavajući tako temeljni odnos u svijetu u kojem živimo: princip očuvanja energije. U protivnom, zamisao bi odvijanja kružnog procesa spadala u kategoriju nemogućih (neprovedivih) energetskih procesa. To će postati još uočljivije zamislimo li nekakav, bilo kakav, između beskonačnog broja mogućnosti odvijanja, kružni proces kojem ćemo podvrći zatvoreni sustav, Slika 5-8.



Slika 5-8 Kružni proces zatvorenog sustava

Zaključujemo, na temelju poznavanja odvijanja pojedinačnih procesa kružnog procesa, da bi se kružni proces zatvorenog sustava uopće mogao odvijati treba dovoditi ili odvoditi toplinsku energiju i mehanički rad za vrijeme pojedinih dijelova kružnog procesa, odnosno ni dovoditi ni odvoditi:

$$q_{ik} \le 0; q_{ik} \ge 0; w_{ik} \le 0; w_{ik} \ge 0$$

No, koliki je ukupni mehanički rad dobiven iz kružnog procesa (dovedeni mehanički rad minus odvedeni), a koliki je iznos ukupno izmijenjene toplinske energije (dovedena toplinska energija minus odvedena toplinska energija)? Što se događa s mehaničkim radom promjene volumena i toplinskom energijom za vrijeme pojedinačnih procesa kružnog procesa?

Pogledajmo. Sastoji li se kružni proces od nekoliko procesa kojima je podvrgnut zatvoreni sustav, to za svaki pojedini proces vrijedi princip očuvanja energije (prvi glavni stavak termodinamike za zatvoreni sustav, relacija [3.15]):

$$q_{12} = w_{12} + u_2 - u_1$$

$$q_{23} = w_{23} + u_3 - u_2$$

$$q_{34} = w_{34} + u_4 - u_3$$

…

$$q_{61} = w_{61} + u_1 - u_6 \qquad [5.38]$$

Pritom je q_{ik} toplinska energija što se izmjenjuje za vrijeme procesa koji se odvija između stanja **i** i **k**, $w_{ik} = \int_{v_i}^{v_k} pdv - |w_{RTik}|$ izmijenjeni mehanički rad promjene volumena između istih stanja, a $u_k - u_i$ promjena unutrašnje kaloričke energije zatvorenog sustava zbog izmjene toplinske energije i mehaničkog rada za vrijeme odvijanja promatranog procesa.

Zanemarimo li rad trenja koji se (sigurno) razvija za vrijeme realnih procesa, zbrajanjem (energija je skalarna veličina) dobivamo:

$$q_{12} + q_{23} + q_{34} + \ldots + q_{61} = w_{12} + w_{32} + w_{34} + \ldots + w_{61} \qquad [5.39]$$

jer se vrijednosti unutrašnjih kaloričkih energija pojavljuju sa suprotnim predznakom.

(Rezultat je dakako očekivan: ukupna (sumarna) promjena unutrašnje kaloričke energije sustava podvrgnutog kružnom procesu mora biti jednaka nuli budući da se sustav vratio u početno stanje (PS), a unutrašnja je kalorička energija veličina stanja (veličina neovisna o procesu između promatranih stanja /du je totalni diferencijal/): $\delta u = u_{PS} - u_{PS} = 0$.)

Prema tome, kad zatvoreni sustav ostvari kružni proces, zbroj je mehaničkih radova pojedinih dijelova procesa, odvedenih ili dovedenih, jednak zbroju izmijenjenih toplinskih energija, dovedenih ili odvedenih, za vrijeme odvijanja pojedinih dijelova procesa:

$$w_{KP_{ZS}} = \sum w_{ik} = \sum q_{ik} \quad [\mathrm{J/kg}] \qquad [5.40]$$

Pritom treba mehaničke radove i toplinske energije uvrstiti s odgovarajućim predznacima.

Koliki je $w_{KP_{ZS}}$?

Jer je $w_{ik} = \int_{v_i}^{v_k} pdv$ (zanemarujemo trenje), to je

$$w_{KP_{ZS}} = \sum w_{ik} = \int_{v_1}^{v_2} pdv + \int_{v_2}^{v_3} pdv + \ldots + \int_{v_n}^{v_1} pdv = \oint pdv \qquad [5.41]$$

Dakle je ploština površine unutar krivulja kružnog procesa (Slika 5-8) jednaka (proporcionalna računamo li s pojavom trenja) mehaničkom radu što prelazi granice sustava jer je:

$$\oint pdv = w_{KP_{ZS}} + \sum |w_{RTik}| \qquad [5.42]$$

odnosno za mehanički povratljivi proces (ne postoji trenje):

$$w_{povKP_{ZS}} = \oint pdv \qquad [5.43]$$

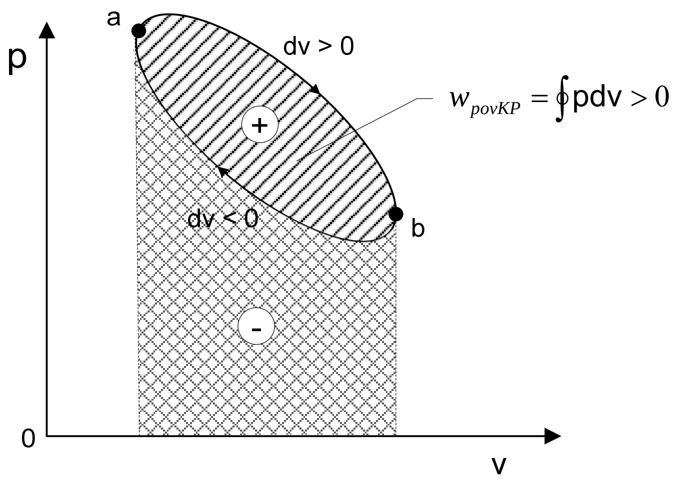
S druge je strane

$$\sum q_{ik} = \sum q_{ik_{dov}} + \sum q_{ik_{odv}} = q_{dov} + q_{odv} = q_{dov} - |q_{odv}| \qquad [5.44]$$

pa, zanemarimo li trenje, dobiveni mehanički rad za vrijeme odvijanja kružnog procesa sa zatvorenim sustavom možemo računati na dva načina: sumirajući mehaničke radove promjene volumena pojedinačnih procesa ili određujući razliku između ukupno dovedene i ukupno odvedene toplinske energije za vrijeme odvijanja kružnog procesa:

$$w_{povKP_{ZS}} = \oint pdv = q_{dov} - |q_{odv}| \qquad [5.45]$$

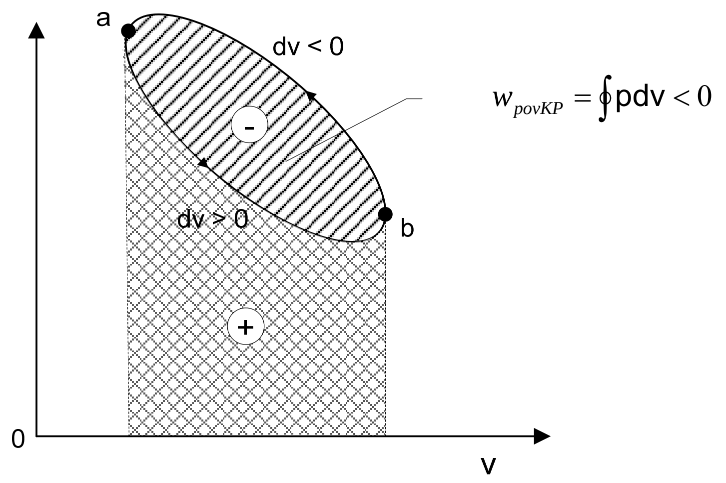
Uočimo sada još nešto. Realizirajući kružni proces kretali smo se u desnu stranu. U smjeru gibanja kazaljke na satu, Slika 5-9. Takav se kružni proces naziva **desnokretnim**.



Slika 5-9 Desnokretni kružni proces zatvorenog sustava

Zatvoreni sustav podvrgnut desnokretnom kružnom procesu predavat će mehanički rad u okolicu jer je vrijednost integrala u [5.42] pozitivna. Naime, za gornji je dio krivulje (između **a** i **b**) vrijednost integrala pozitivna jer specifični volumen raste (radi se o ekspanziji, dv > 0, dobivanju mehaničkog rada: $\int_a^b pdv > 0$), a za donji će dio krivulje vrijednost integrala biti negativna jer je dv < 0 (radi se o kompresiji, dovođenju mehaničkog rada u sustav: $\int_b^a pdv < 0$). Ukupni je, međutim, izmijenjeni mehanički rad (dobiveni minus uloženi) za vrijeme odvijanja desnokretnog kružnog procesa zatvorenog sustava pozitivan; rad se dobiva iz sustava i predaje u okolicu: $w_{DKP} = \int_a^b pdv - |\int_b^a pdv| > 0$ jer je $\int_a^b pdv > |\int_b^a pdv|$).

Zamislimo dalje da je moguća realizacija i **ljevokretnog kružnog procesa**, kružnog procesa koji će se odvijati suprotno kretanju kazaljke na satu, Slika 5-10.



Slika 5-10 Ljevokretni kružni proces zatvorenog sustava

Uočimo zasad samo činjenicu da će sada ukupno izmijenjeni mehanički rad biti negativan, što znači da se ljevokretni kružni proces može odvijati samo ako se dovodi (ulaže, troši) mehanički rad. ($w_{LJK} = \int_a^b pdv + \int_b^a pdv = \int_a^b pdv - |\int_b^a pdv| < 0$ jer je $\int_a^b pdv < |\int_b^a pdv|$)

Zašto je to (fizikalno gledajući) tako i čemu služe ljevokretni kružni procesi odgovorit ćemo kasnije.

Za naša su razmatranja međutim, razmatranja energetskih pretvorbi i procesa u elektroenergetici, mnogo važniji od kružnih procesa zatvorenih sustava kružni procesi koji se provode pomoću otvorenih sustava. Jedan od takvih procesa susrećemo u termoelektranama.

5.6.2 Kružni procesi otvorenih sustava

U termoelektranama fluid je sustav podvrgnut kružnom procesu koji je realiziran pomoću različitih procesa u otvorenim sustavima, Slika 3-10. U takvom kružnom procesu fluid „kruži", tjeran razlikom tlakova (pumpom), kroz parni kotao (izmjenjivač topline), turbinu, kondenzator (izmjenjivač topline) i pumpu vraćajući se ponovno u kotao. Koliki je ukupno dobiveni mehanički rad iz takvog desnokretnog kružnog procesa, $w_{KP_{OS}} \equiv w_{t_{KP}}$?

Pišemo li za svaki od procesa princip očuvanja energije (1. glavni stavak termodinamike za otvoreni sustav) dobit ćemo da je ukupno izmijenjeni mehanički rad (tehnički rad) za vrijeme odvijanja kružnog procesa jednak:

$$w_{KP_{OS}} \equiv w_{t_{KP}} = \sum w_{tik} = \sum q_{tik} \quad [\mathrm{J/kg}] \qquad [5.46]$$

Naime, zanemarimo li trenje (mehanički povratljivi procesi), to za svaki dio kružnog procesa, jer se radi o otvorenim sustavima, vrijedi relacija:

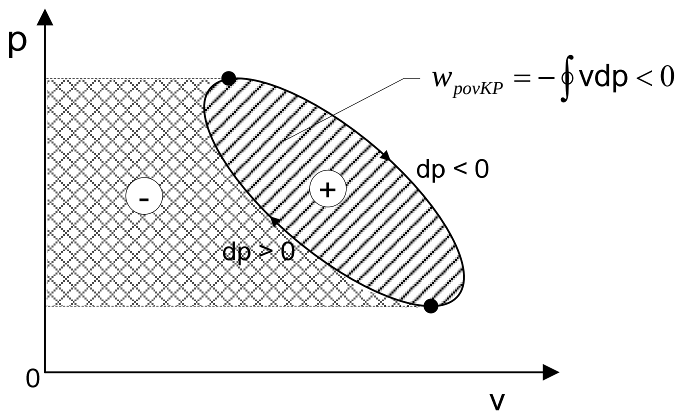
$$w_{tik} = -\int_{p_i}^{p_k} vdp - \frac{1}{2}(c_k^2 - c_i^2) - g(z_k - z_i) \qquad [5.47]$$

pa zbrajanjem tehničkih radova za sve otvorene procese dobivamo:

$$w_{t_{KP}} = -\oint vdp = \sum w_{t\,ik} = w_{t_{turbine}} + w_{t_{pumpe}} = w_{t_{turbine}} - |\,w_{t_{pumpe}}\,| = \\ = \sum q_{tik} \ [\mathrm{J/kg}] \qquad [5.48]$$

jer se svi članovi u kojima se pojavljuju brzine **c** i visine **z** međusobno poništavaju.

Dakle i sada vrijedi, jer integral $-\oint vdp$ predstavlja u p,v-dijagramu površinu ograničenu krivuljama kružnog procesa, da je ploština površine kružnog procesa jednaka (proporcionalna ne zanemarimo li ukupan rad trenja) ukupnom tehničkom radu dobivenom iz kružnog procesa. Suglasno dosad rečenome tehnički će rad biti pozitivan, Slika 5-11, odvija li se kružni proces kao desnokretni, odnosno, negativan teče li proces kao ljevokretni.



Slika 5-11 Desnokretni kružni proces otvorenih sustava

Kolika je ukupno izmijenjena toplinska energija $\sum q_{tik}$?

Naglasili smo više puta, toplinska je energija oblik energije što prelazi granice sustava nevezano uz masu, što znači da je neovisna o tome odvija li se (isti) proces u zatvorenom ili otvorenom sustavu, pa mora stoga vrijediti:

$$\sum q_{tik} \equiv \sum q_{ik} = \sum q_{ik_{dov}} + \sum q_{ik_{odv}} = q_{dov} + q_{odv} = q_{dov} - |q_{odv}| \qquad [5.49]$$

Jer vrijedi i da je

$w_{t_{KP}} = \sum q_{tik} = \sum q_{ik}$, a $w_{KP_{ZS}} = \sum q_{ik}$,

zaključujemo da je ukupni iznos izmijenjenog mehanički rada za vrijeme odvijanja kružnog procesa neovisan o tome provodi li se kružni proces sa zatvorenim sustavom ili otvorenim sustavima:

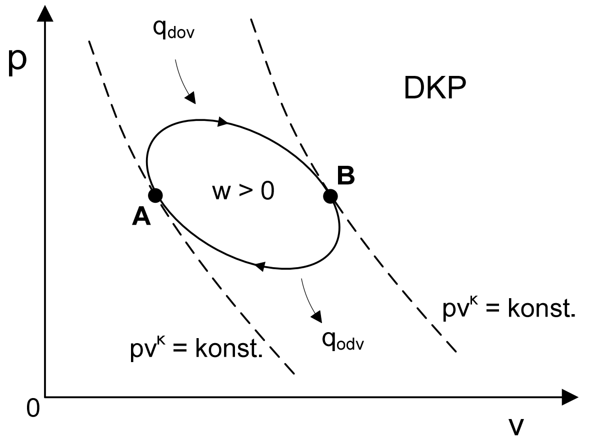
$$w_{KP_{ZS}} = w_{t_{KP}} = \mathrm{w}_{\mathrm{KP}} = \mathrm{w} = \oint pdv = -\oint vdp = \mathrm{q}_{\mathrm{dov}} + \mathrm{q}_{\mathrm{odv}} = \mathrm{q}_{\mathrm{dov}} - |\mathrm{q}_{\mathrm{odv}}| \quad [5.50]$$

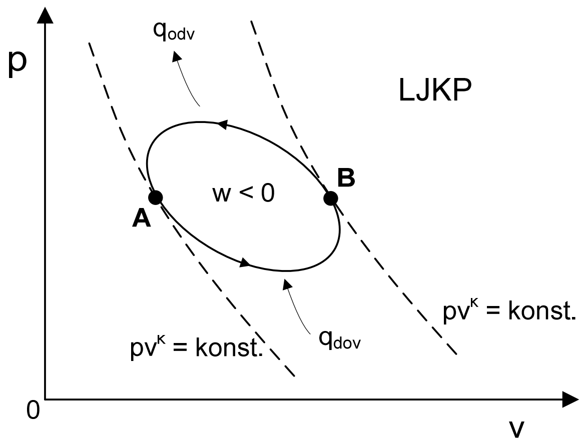
Drugim riječima, radi li se o količini mehaničkog rada koji se dovodi ili odvodi iz sustava podvrgnutih kružnim procesima ne treba razlikovati $w_{KP_{ZS}}$ od $w_{KP_{OS}}$ ($w_{t_{KP}}$): u oba je slučaja mehanički rad jednak ploštini površine koju u p,v-dijagramu formira kružni proces, odnosno razlici ukupno dovedene i ukupno odvedene toplinske energije za vrijeme odvijanja kružnog procesa.

Zaključno konstatirajmo i razmotrimo i ovo. Ustanovili smo, analizirajući rad nekih općenitih desnokretnih i ljevokretnih kružnih procesa, da bi bilo moguće odvijanje kružnih procesa, a to vrijedi za kružne procese s bilo kakvim sustavima odnosno fluidom, treba, na pogodan način, dovoditi i odvoditi toplinsku energiju. Postavljamo pitanje je li je to i nužno ili nismo li samo dostatno domišljati i vješti da provedemo kružni proces bez dovođenja ili, barem, odvođenja toplinske energije? „Intuitivno“ prihvaćamo nemogućnost odvijanja desnokretnog kružnog procesa bez dovođenja toplinske energije; u suprotnom radilo bi se o „perpetuum mobile prve vrste“: dobivanju mehaničkog rada (energije) bez utroška energije (bez transformacije iz nekog drugog oblika energije).

(Sigurno, takva se intuicija „današnjice“ temelji na znanju „jučerašnjice“: prihvaćanju valjanosti principa očuvanja energije.)

Ali, zašto je potrebno odvoditi toplinsku energiju iz kružnog procesa kako bi se on mogao provoditi? Je li je moguća izvedba kružnog procesa bez odvođenja toplinske energije? „Matematička analiza“ odbacuje mogućnost odvijanja kružnog procesa bez dovođenja i odvođenja toplinske energije. Uvjerimo se u to razmatrajući rad bilo kakvog desnokretnog i ljevokretnog kružnog procesa u p,v-dijagramu, Slika 5-12.





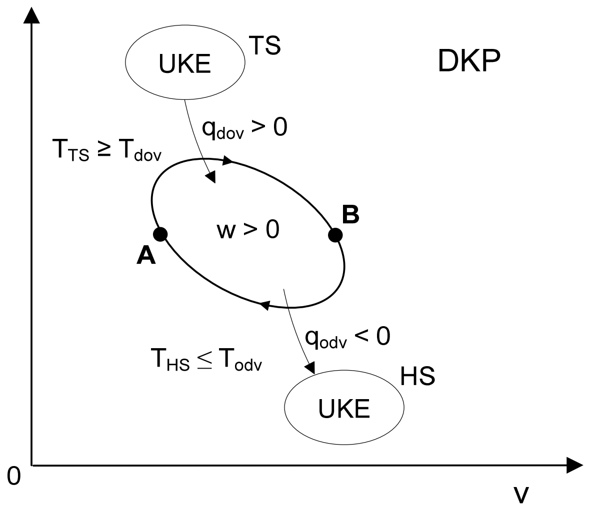
Slika 5-12 Dovođenje i odvođenje toplinske energije u desnokretnom i ljevokretnom kružnom procesu

Odijelimo dijelove procesa kojima se toplinska energija dovodi od onih kojima se ona odvodi polažući dvije adijabate tako da dodiruju krivulje procesa kružnih procesa. U dodirnim točkama A i B krivulje se procesa podudaraju s adijabatama, što znači da se u kružni proces ne mora dovoditi ni odvoditi toplinska energija jedino kad se nalazi u tim stanjima. U svim se ostalim dijelovima procesa toplinska energija mora dovoditi ili odvoditi. U protivnom, kružni se proces ne bi mogao odvijati. Prema rečenome u 5.5. zaključujemo kada se toplinska energija mora dovoditi, a kada odvoditi iz kružnog procesa, Slika 5-12.

Spomenuli smo, „Matematika“ nije predviđena za ovakva dokazivanja. Uvjetno prihvatimo stoga, zasad bez dodatnih tumačenja, da nije moguće odvijanje kružnih procesa bez dovođenja i odvođenja toplinske energije.

Spomenuli smo isto tako dosad, isto tako zasad bez čvršćih argumenata, da se svaka energija sastoji od eksergije i anergije. Dovođenje toplinske energije u kružni proces predstavlja stoga dovođenje energije u procese transformacija oblika energije u kojima se eksergija toplinske energije pretvara u mehanički rad, a anergija se toplinske energije u obliku toplinske energije (prijelazan oblik energije) odvodi u okolicu. Drugim riječima, kružni proces omogućuje odvajanje eksergije(toplinske) energije od anergije (toplinske) energije. Eksergija (mehanički rad) pretvara se zatim u najrazličitijim uređajima u korisne oblike energije, a anergija se odvodi u okolicu – ne postoji druga mogućnost.

Sustav dakle ne može sam po sebi obaviti kružni proces jer mu u jednom dijelu procesa treba dovoditi toplinsku energiju, a u drugom dijelu odvoditi. Ako je to tako, moramo znači osigurati dovođenje i odvođenje toplinske energije. A to možemo samo pomoću, nazovimo ih tako, dva **toplinska spremnika**. Jednog, imenujmo ga **toplim spremnikom** (ogrjevnim spremnikom ili izvorom topline), koji će dobavljati toplinsku energiju potrebnu za odvijanje kružnog procesa transformacijom iz unutrašnje kaloričke energije, i drugog, **hladni spremnik** (rashladni spremnik ili ponor topline), koji će preuzimati toplinsku energiju (anergiju) odvedenu iz kružnog procesa, Slika 5-13, i u kojem će se ta toplinska energija pretvarati u unutrašnju kaloričku energiju.



Slika 5-13 Toplinski spremnici i prijelaz toplinske energije u i iz desnokretnog kružnog procesa

Pokazali smo, toplinska energija prelazi sa sustava na sustav samo zbog razlika u temperaturi. Zbog toga mora temperatura toplog spremnika, T_{TS}, biti veća, ili u graničnom slučaju jednaka, maksimalnoj temperaturi kružnog procesa, $T_{maxKP} \equiv T_{dov}$:

$$T_{TS} \geq T_{\max_{KP}} \equiv T_{dov}, \qquad [5.51]$$

a temperatura hladnog spremnika, T_{HS}, manja, ili u graničnom slučaju jednaka, minimalnoj temperaturi kružnog procesa, $T_{minKP} \equiv T_{odv}$:

$$T_{HS} \leq T_{\min_{KP}} \equiv T_{odv} \qquad [5.52]$$

Dalje zaključujemo: dovođenje i odvođenje toplinske energije ne uzrokuje promjene u sustavu (fluidu); na kraju se procesa sustav vraća u početno stanje. Promjene međutim ostaju u toplinskim spremnicima jer se iz jednog odvodi a u drugi dovodi toplinska energija: u toplom spremniku nastaje zbog toga manjak, a u hladnom višak unutrašnje kaloričke energije. Prema tome prijelaz je toplinske energije iz toplog spremnika preko kružnog procesa u hladni spremnik pravi izvor mehaničkog rada (eksergije). Sustav je (fluid odnosno djelatna tvar) pritom samo posrednik: postojanje je toplog spremnika, kao dobavljača eksergije, i hladnog spremnika, kao preuzimatelja anergije, nezaobilazni preduvjet za odvijanje (svih) kružnih procesa. To postaje još očitije upitamo li se koje veličine kružnog procesa moramo smatrati zadanima. Primjerice, stanja 1, 2, 3 i 4 kružnog procesa, Slika 5-8, možemo odabrati po volji, ali samo tako da se pritom ne prekorače temperature toplinskih spremnika; u protivnom prijelaz bi toplinske energije u željenom smjeru bio nemoguć. Ako je to tako, definirajmo onda pokazatelj koji će odgovoriti na pitanje koliko je toplinske energije u kružnom procesu pretvoreno u mehanički rad (u eksergiju) i nazovimo ga **termičkim** ili **energetskim stupnjem djelovanja** i označimo grčkim slovom eta s indeksom t (termički): $\boldsymbol{\eta_t}$.

5.6.3 Termički (energetski) stupanj djelovanja

U svakom se desnokretnom kružnom procesu dobiva mehanički rad transformacijom iz eksergije dovedene toplinske energije. Tehnički se sustav, u kojem je fluid (djelatna tvar) podvrgnut promjenama stanja u kružnom procesu, a usto mu se energija dovodi u obliku toplinske energije i on predaje mehanički rad, naziva (često) **toplinskim strojem**.

Za svaki toplinski stroj vrijedi relacija:

$w = q_{dov} - |q_{odv}|$ [J/kg]

gdje je w predani mehanički rad a q_{dov} i q_{odv} dovedena i odvedena toplinska energija po kg fluida (djelatne tvari).

Omjer se između w i q_{dov} naziva termički stupanj djelovanja, ili energetski stupanj djelovanja, jer je to omjer zahtijevanog (korisnog, dobivenog) oblika energije (mehaničkog rada) i upotrijebljene energije (toplinske energije u promatranom slučaju):

$$\eta_t = \frac{w}{q_{dov}} = \frac{q_{dov} + q_{odv}}{q_{dov}} = \frac{q_{dov} - |q_{odv}|}{q_{dov}} = 1 - \frac{|q_{odv}|}{q_{dov}} \qquad [5.53]$$

Stupanj djelovanja η_t pokazuje koliki se dio dovedene toplinske energije (energije) pretvara u mehanički rad (eksergiju). Očito, da bi se postiglo da se sva dovedena toplinska energija (q_{dov}) pretvori u mehanički rad, mora q_{odv} biti jednaka nuli. Pokazali smo, međutim, „matematičkim dokazom“, da je vrijednost q_{odv} različita od nule.

(Kasnije ćemo se uvjeriti da količina odvedene toplinske energije za svaki kružni proces ima neku minimalnu vrijednost, različitu od nule, ovisnu i o prirodnim uvjetima pa, po tome, η_t ne može nikada biti jednak jedan.)

Prirodno, postavlja se pitanje koliko je q_{odv}, koliko je $q_{odv_{min}}$? Kako ostvariti najbolji mogući kružni proces, η_{tmax}, i spoznati to kako bismo izbjegli skupo i bezuspješno traganje za još boljim kružnim procesom?

Odgovor je na to pitanje dao francuski inženjer Nicolas Léonard Sadi Carnot u prvoj četvrtini XIX. stoljeća analizirajući (zamišljeni) kružni proces njemu u počast nazvan **Carnotovim kružnim procesom.**

O stupnjevima djelovanja pretvorbi oblika energije u korisne oblike i poteškoćama proračuna ukupnog stupnja djelovanja transformacija

Najšire prihvaćena definicija **stupnja djelovanja** (naziva se još i korisnost, učinkovitost, djelotvornost, efikasnost, koeficijent iskorištenja, koeficijent korisnog djelovanja itd.) izriče da je to bezdimenzijski broj koji izražava omjer korisne energije dobivene od nekog stroja ili uređaja i dovedene (utrošene) energije potrebne da bi se dobila korisna energija transformacijom iz dovedene. Dakako da pritom za sve transformacije oblika energije mora vrijediti kako princip očuvanja energije tako i princip rasta entropije, odnosno drugi glavni stavak termodinamike. Naime, ukupna energija dovedena u neki proces transformacije mora biti jednaka ukupnoj energiji koja se iz njega odvodi, bilo u onom (traženom, korisnom) obliku u koji se želi pretvoriti dovedena energija, bilo u nekim drugim oblicima koje možemo smatrati posljedicom nesavršenosti procesa ali i posljedicom prirodom ograničenih mogućnosti pretvorbe energije u željeni oblik. Omjer između količine energije E_{tr} (e_{tr}) koja se u nekom procesu transformacije dobiva u željenom (zahtijevanom, traženom, korisnom) obliku i količine energije E_{dov} (e_{dov}) koja se, u nekom drugom ili istom obliku, dovodi u proces transformacije zvat ćemo **stupnjem djelovanja transformacije** η_{tr} (dakle ne korisnošću, efikasnošću, učinkovitošću ili slično):

$$\eta_{tr} = \frac{E_{tr}[J]}{E_{dov}[J]} = \frac{e_{tr}[J/kg]}{e_{dov}[J/kg]} \qquad [5.54]$$

Posebno, ukoliko je E_{tr} mehanički rad (dakle eksergija) a E_{dov} toplinska energija (dakle energija) stupanj djelovanja transformacije zvat ćemo **termičkim ili energetskim stupnjem djelovanja** η_t:

$$\eta_t = \frac{W[J]}{Q_{dov}[J]} = \frac{w[J/kg]}{q_{dov}[J/kg]} \qquad [5.55]$$

Zbog gubitaka eksergije prigodom pretvaranja jednog oblika energije u drugi, odnosno zbog nemogućnosti da se bilo koji oblik energije u cijelosti pretvori u mehanički rad (eksergiju), termički je (energetski) stupanj djelovanja uvijek manji od idealne vrijednosti 1 ili 100% što, u nekim slučajevima, pokazat ćemo, može uzrokovati pogrešna zaključivanja. Zbog toga se, pokraj termičkog (energetskog) stupnja djelovanja, definira i tzv. **eksergijski stupanj djelovanja** označen grčkim slovom zeta (ζ) koji predstavlja omjer količine eksergije dobivene iz nekog procesa i količine eksergije dovedene u taj proces:

$$\zeta = \frac{Eksergija_{dob}[J]}{Eksergija_{dov}[J]} = \frac{eks_{dob}[J/kg]}{eks_{dov}[J/kg]} \qquad [5.56]$$

(Termički (energetski) stupanj djelovanja osniva se na prvom glavnom stavku, a eksergijski, pokazat ćemo, na drugom glavnom stavku termodinamike.)

Uz te se stupnjeve djelovanja, koji u potpunosti opisuju sve moguće energetske transformacije, rabe, zbog što kraćeg i jednostavnijeg opisa transformacija, i brojni stupnjevi djelovanja (pojedinih) uređaja i procesa. Primjerice: stupanj djelovanja ložišta, parnog kotla, parovoda; unutrašnji, efektivni i mehanički stupanj djelovanja turbine; stupanj djelovanja sinkronog generatora, vlastitog potroška, elektrane na pragu; stupanj djelovanja procesa s međupregrijanjem pare, sa zagrijavanjem kondenzata, s oduzimanjem kondenzata; stupanj djelovanja kogeneracije, spojnog procesa itd, itd.

Sve su te podjele stupnjeva djelovanja nužne budući da stupanj djelovanja transformacije ovisi s jedne strane o transformiranim i dovedenim oblicima energije, a s druge strane o upotrijebljenim procesima za transformaciju (tipovima procesa i parametrima procesa) i o kvaliteti postrojenja u kojima se provode pretvorbe oblika energije.

(To je ujedno i razlog zašto smo prisiljeni izbjegavati kraće, no nedostatno precizne, termine poput korisnost, učinkovitost, djelotvornost, efikasnost,…)

Naime, govorili smo o tome, potrošačima je potrebna energija u jednom od sljedećih oblika: mehanički rad, toplinska, kemijska ili rasvjetna energija, odnosno dva ili više korisnih oblika energije istodobno. Poteškoće nastupaju jer se potrebe za korisnim oblicima energije mogu zadovoljiti na najrazličitije načine. Primjerice, toplinska se energija može potrošačima osigurati transformacijom iz unutrašnje kaloričke energije vrele vode ili vodene pare, miješanjem vodene pare ili vrele vode s kapljevinom koju treba ugrijati, izgaranjem drveta i fosilnih goriva u ložištima (pojedinačnim ložištima, kotlovima za centralna grijanja, parnim kotlovima, tehnološkim pećima i sl.), ali i transformacijom iz električne energije u otpornim i indukcijskim pećima. Slično vrijedi i za opskrbu mehaničkim radom. Radi li se o potrošačima koji su s obzirom na smještaj stabilni danas dolazi u obzir praktički samo električna energija (električni motori). Znatan je dio mehaničkog rada međutim potreban za transport, dakle pokretne potrošače. Tada se mehanički rad proizvodi pomoću motora s unutrašnjim izgaranjem (cestovni i zračni promet), dok se za željeznički i brodski promet upotrebljavaju uz motore s unutrašnjim izgaranjem i parni kotlovi s parnim turbinama ali i pogoni s plinskim turbinama. Za željeznički i gradski promet uobičajeno se rabi i električna energija. Stabilni se potrošači mogu opskrbiti mehaničkim radom i neposredno, pomoću bilo kojeg pogonskog stroja (parna, plinska, vodna turbina, motor s unutrašnjim izgaranjem), bez međutransformacije u električnu energiju.

(To obično nije pogodno zbog kompliciranog održavanja u pogonu (vođenje pogona, dopremanje goriva, održavanje postrojenja), ali i zbog toga što je racionalnije proizvesti električnu energiju u velikim elektranama i zatim je pomoću električne mreže dovesti do električnih motora u kojima će biti pretvorena u mehanički rad.)

Električna energija često je i posrednik u transformacijama u mehanički rad. Pritom mislimo na procese u kojima se mehanički rad pogonskih strojeva prvo pretvara u električnu energiju a ova ponovno u mehanički rad (dizelsko-električne lokomotive, brodski pogoni).

Za opskrbu potrošača rasvjetnom energijom danas se pretežito upotrebljava električna energija, odnosno jedino električna energija u društvima koja njome raspolažu. *(Nešto malo manje od dvije milijarde ljudi ne raspolaže još uvijek s električnom energijom.)* Ta je energija također nezamjenjiva za elektrokomunikacijske uređaje (telefon. radio, televizija) i za „procesiranje znanja".

Za redukcijske peći, visoke peći za proizvodnju sirovog željeza, lučne peći za proizvodnju karbida i ferolegura i dr., i za elektrolize, koje se temelje na kemijskim procesima, potreban je ili koks, ili električna energija, ili istodobno i koks i električna energija. U visokim se pećima pritom sve više koks djelomično zamjenjuje prirodnim plinom ili teškim loživim uljem. U prvom je redu dakle kemijska energija korisni oblik energije u redukcijskim pećima i elektrolizama, ali se tu pojavljuje i toplinska energija kao korisni oblik energije.

Stupnjevi se djelovanja transformacija stoga mogu međusobno toliko znatno razlikovati da izrada energetske bilance, pomoću koje bi se mogle usporediti ukupne potrebe energije s ukupnim primarnim oblicima energije, nije moguća pa ni uz uvjet da se svakome primarnom obliku energije prida neki nepromjenljivi i opći stupanj djelovanja transformacije. Takva energetska bilanca naime ne bi vodila računa o potrebnim oblicima korisne energije, a prema tome ni o nužnim energetskim transformacijama, a baš o ta dva čimbenika ovise potrebne količine primarnih energetskih oblika.

Energetske bilance obuhvaćaju tokove (tijekove) svih oblika energije u nekoj državi ili užem području da bi se na prikladan način prikazalo iskorištenje primarnih oblika energije, energetske transformacije, uvoz i izvoz primarnih i transformiranih oblika energije, uporaba oblika energije za opskrbu potrošača (industrija, promet, mali potrošači, kućanstva), te korisni oblici energije u koje se transformiraju svi oblici energije predani potrošačima. Energetska je bilanca zapravo energetska statistika posebna oblika koja prati tokove energije od njezine pojave u energetskom gospodarstvu države ili područja do prijelaza ukupne energije u anergiju. Energetska bilanca služi kao osnova za prognoziranje razvoja kako bi se pravodobnim zahvatima osigurala opskrba potrošača odnosno kao podloga za eliminaciju negativnih i stimuliranje pozitivnih pojava u proizvodnji i opskrbi energijom.

Ilustrirajmo rečeno ograničavajući se na problem različitih stupnjeva djelovanja u onim slučajevima kada se radi o oblicima energije koji se mogu međusobno supstituirati, odnosno na slučajeve kada razlika između stupnjeva djelovanja transformacija, izazvana različitim načinima dobivanja istog korisnog oblika energije, utječe na rezultate energetske bilance.

(Postoje naime i neke potrebe koje se ne mogu zadovoljiti na različite načine već samo određenim, nezamjenjivim oblicima energije: cestovni i zračni promet primjerice.)

Na primjer, za grijanje se prostorija može upotrijebiti ugljen neposredno, ložeći ga u pojedinačnim ložištima, ali i posredno, pretvorbom kemijske energije ugljena najprije u električnu energiju i zatim električne energije u toplinsku. U prvom slučaju, da se dobije korisna količina toplinske energije za grijanje prostorija u iznosu od 1MJ, koliko je potrebno da peć za grijanje predaje zraku u sobi, trebaju 2MJ toplinske energije oslobođene izgaranjem ugljena računamo li sa stupnjem djelovanja transformacije kemijske energije ugljena u korisnu toplinsku energiju u peći. U drugom slučaju, stupanj će djelovanja transformacije kemijske energije ugljena u električnu energiju iznositi u prosjeku oko, primjerice, 0,30, a stupanj djelovanja prijenosa i raspodjele električne energije oko 0,85. Prema tome ukupni stupanj djelovanja transformacije kemijske u električnu energiju do mjesta potrošnje je 0,30•0,85 = 0,255. Dakle za grijanje iste prostorije električnom energijom potrebno je nešto manje od 4MW energije u ugljenu. Naravno da se prostorije mogu grijati i na druge načine: npr. vrelom vodom iz toplana, centralnim grijanjem loženim ugljenom, loživim uljem, prirodnim plinom itd. Općenito, postižu se više ili manje različiti stupnjevi djelovanja, pa istoj količini korisne energije odgovaraju različite količine energije u primarnom ili u transformiranom obliku.

Sličan je zaključak promatraju li se pretvorbe u električnu energiju. U termoelektranama su za proizvodnju 1 kWh električne energije potrebna oko 3 kWh (10,8 MJ), a u hidroelektranama za istu količinu električne energije oko 1,3 kWh (4,68 MJ) potencijalne energije vode. Prema tome potrebna količina primarnih, odnosno transformiranih oblika energije ne ovisi samo o potrebnoj količini električne energije, već i o obliku energije koja se transformira u električnu energiju.

(Jasno, u termoelektranama se energija (kemijska, nuklearna, Sunčeva zračenja ili unutrašnja kalorička energija) transformira u električnu energiju (eksergiju), a u hidroelektranama se eksergija (potencijalna energija vode) transformira u električnu energiju koja je eksergija.)

Tako će biti i s potrebama energije za željeznički transport. Stupanj djelovanja parnog stroja (parne lokomotive) znatno je niži od stupnja djelovanja dizelskog motora (dizelske lokomotive), a pogotovo od stupnja djelovanja električnog motora (električne lokomotive). Pri razmatranju potreba energije za željeznički transport valja još uzeti u obzir i činjenicu da se iz sirove nafte može dobiti samo određeni postotak goriva za dizelske motore te da je stupanj djelovanja transformacije u električnu energiju ovisan i o vrsti elektrana.

Tehnički napredak, osim toga, znatno utječe na ostvarivanje stupnjeva djelovanja. Usporedba različitih transformacija ovisi dakle i o vremenu. Tako se u pregledima korištenja energetskih oblika računa da je u 1940-tim godinama bilo potrebno više od 23 MJ za proizvodnju 1 kWh (3,6 MJ) električne energije u termoelektranama, u 1950-im više od 17 MJ, u 1960-im oko 12 MJ, a danas manje od 11 MJ.

Prema tome ne može se pronaći neka zajednička mjera za energiju kojom bi se omogućila izrada takvih energetskih bilanci koje bi u sebi uključivale sve energetske aspekte iskorištavanja oblika energije.

(1 MJ energije u gorivu upotrijebljen za proizvodnju električne energije ne daje isti efekt kao 1 MJ potencijalne energije vode budući da se u prvom slučaju radi o energiji koju transformiramo u eksergiju (i zatim u korisni /traženi/ oblik energije) a u drugom je slučaju riječ o eksergiji koja se transformira u električnu energiju (eksergiju odnosno u koristan /traženi/ oblik energije). Zbog toga se ta dva oblika energije s obzirom na potrebne količine ne mogu međusobno zamijeniti.)

Još su veće poteškoće uključimo li u energetske bilance i ekonomske aspekte budući da se troškovi iskorištavanja primarnih oblika energije po jedinici količine energije međusobno znatno razlikuju, a to vrijedi i za transformacije. Osim toga troškovi iskorištavanja istih primarnih oblika i troškovi za iste transformacije znatno ovise o proizvodnim uvjetima (npr., način proizvodnje nuklearnog goriva ili ugljena, dubina nalazišta, izdašnost itd.)

Na slične su poteškoće, pa i nepremostive, naišli i pokušaji da se odredi ukupni konačni stupanj djelovanja korištenja energije na nekom području. Pritom valja postaviti pitanje što je to konačni stupanj djelovanja korištenja energije? Da se pokaže nemogućnost precizne definicije, razmotrit ćemo dva slučaja.

U prvom primjeru promatrajmo željeznički transport. Možemo točno odrediti stupanj djelovanja na osovini pogonskog stroja, odnosno na osovini kotača lokomotive. Međusobnim djelovanjem kotača i tračnice lokomotiva i vagoni kreću se naprijed, ali ta je snaga (energija) manja od snage (energije) na osovini. Pri kretanju lokomotiva mora svladati otpor zraka i sve otpore koji se protive kretanju cijelog vlaka. Zbog čega bi te otpore trebalo promatrati drukčije nego otpor lokomotive? Što, međutim, kako postupiti, nastavimo li tako i u slučaju ako se vlak, nakon što je svladao neki uspon, spusti na istu razinu s koje je pošao: kako odrediti rad koji je obavila lokomotiva?

Drugi primjer odnosi se na uporabu električne energije za rasvjetu. Od ukupne električne energije kod žarulje sa žarnom niti oko 10% zračenja pojavljuje se u vidljivom dijelu spektra, na koje je osjetljivo ljudsko oko, oko 70% zračenja je u infracrvenom području, a ostatak se odvodi u obliku toplinske energije u okolicu. Je li je međutim sva energija u vidljivom području spektra stvarno iskoristiva? Najveći dio pada na predmete koje nitko ne gleda, pa bi se taj dio energije rasvjete mogao smatrati gubitkom. Osim toga, samo dio svjetlosti koji pada na promatrane predmete dolazi u promatračevo oko, pa bi se samo taj dio mogao smatrati stvarno konačnim korisnim dijelom upotrijebljene energije. On je međutim vrlo malen u usporedbi s emitiranim zračenjem u vidljivom dijelu spektra. *(Kao ilustracija neka posluži podatak da je ljudsko oko osjetljivo na snagu zračenja od 10^{-15} W.)*

Zbog toga konačni stupanj djelovanja većinom nema smisla (i za druge slučajeve vrijede slični zaključci) pa on ne može poslužiti kao osnova ni za energetske ni za ekonomske analize. To međutim ne znači da nema nekog smisla određivanje stupnja djelovanja energetskih transformacija ili određivanje stupnja djelovanja energetskih procesa i sustava.

Istaknuli smo, stupanj je djelovanja energetskih transformacija omjer energije proizvedenih transformiranih oblika i energije utrošene za te transformacije. Taj stupanj djelovanja može npr. biti vrlo visok ako se sve energetske potrebe, osim električne energije, zadovoljavaju derivatima nafte, a potrebna se električna energija proizvodi u hidroelektranama. Tada se postiže vrlo povoljno iskorištenje energije upotrijebljene za energetske transformacije, jer i rafinerije nafte i hidroelektrane imaju visoki energetski stupanj djelovanja. Nasuprot tome, stupanj djelovanja energetskih transformacija bit će vrlo nepovoljan ako se najveći dio potreba zadovoljava električnom energijom proizvedenom u termoelektranama budući da su procesi u termoelektranama energetske transformacije s vrlo lošim energetskim stupnjem djelovanja. (Ne i s eksergijskim!)

(Međutim, ni te konstatacije nisu (ne moraju biti) odlučujuće: prvi sustav (nafta + hidroelektrane) naime, i uz vrlo povoljan stupanj djelovanja energetskih transformacija, može biti ekonomski vrlo nepovoljan zbog visoke cijene nafte i relativno velikih investicija potrebnih za gradnju hidroelektrana.)

Stupanj djelovanja energetskog sustava definiran je omjerom ukupno predane energije potrošačima i ukupno utrošene energije u energetskom sustavu. Stupanj djelovanja energetskog sustava ovisi u znatnoj mjeri o stupnju djelovanja energetskih transformacija, pa je najpovoljnije da se što više primarnih oblika energije preda potrošačima u svojem prirodnom stanju.

(Ta direktna predaja, međutim, može izazvati veliku potrošnju energije: razvoženje ugljena, primjerice, do potrošača.)

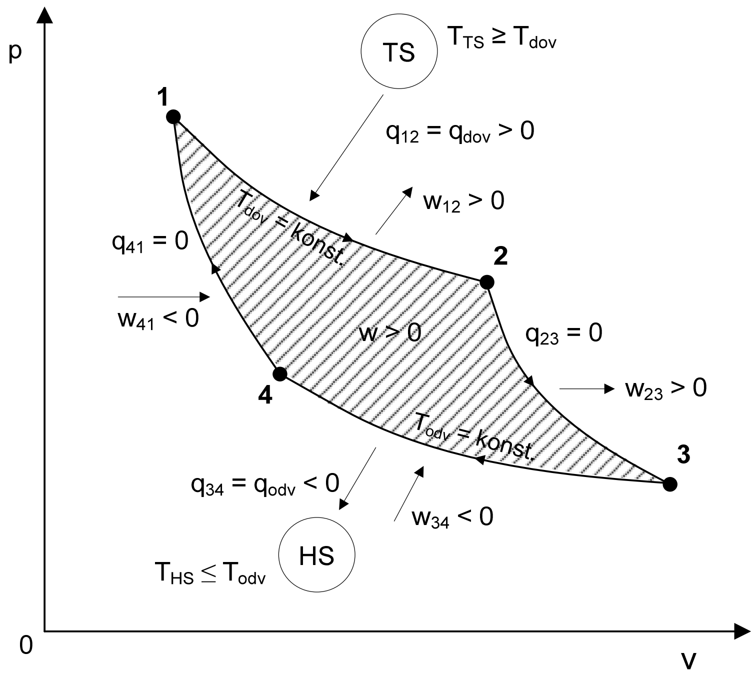
Osim toga na stupanj djelovanja energetskog sustava djeluju gubici u prijenosnim i razdjelnim mrežama (električne, plinske i toplinske mreže). Ako takvih mreža nema, ili ako se mali dio od ukupne energije prenosi i razdjeljuje tim mrežama, bit će povoljniji stupanj djelovanja energetskog sustava. Drugo je pitanje tada hoće li takav energetski sustav, s relativno visokim stupnjem djelovanja, uopće moći zadovoljiti potrebe potrošača; između ostalog to će ovisiti i o strukturi potrošača ali i o njihovim željama s obzirom na udobnost opskrbe energijom.

U stupnju djelovanja energetskog sustava nisu međutim uključeni gubici u postrojenjima i uređajima potrošača za transformacije u korisnu energiju. Takav stupanj djelovanja praktički nije ni moguće odrediti jer se radi o golemom broju postrojenja, uređaja i trošila često vrlo različitih energetskih karakteristika.

Zbog svega je toga nemoguće uspoređivati energetske sustave međusobno, ali je moguće pratiti razvoj pojedinačnih energetskih sustava kako bi se utvrdile tendencije razvoja i provele eventualne korekcije energetske politike.

5.6.4 Carnotov kružni proces

Proučavajući rad stapnih parnih strojeva, dvadesetak godina prije vremena koje se („službeno“) prihvaća kao vrijeme postavljanja 1. glavnog stavka termodinamike, zamislio je S. Carnot desnokretni kružni proces, neprovediv u praksi, ali od presudne važnosti za teorijske usporedbe, Slika 5-14.



Slika 5-14 Carnotov desnokretni kružni proces

Carnotov se desnokretni kružni proces sastoji od četiri (povratljiva) procesa: dvije izoterme, kada se u kružni proces dovodi toplinska energija (eksergija) i iz kružnog procesa odvodi toplinska energija (anergija), dobiva mehanički rad za vrijeme ekspanzije i ulaže za vrijeme kompresije, i dvije adijabate (dobivanje i ulaganje mehaničkog rada).

Analizirajući rad Carnotovog kružnog procesa zanimat će nas, kao i kod svakog kružnog procesa, količina dobivenog ili utrošenog mehaničkog rada, dovedene i odvedene toplinske energije, temperature, tlakovi i volumeni za vrijeme odvijanja kružnog procesa, te termički stupanj djelovanja.

Izmijenjeni mehanički rad računat ćemo prema jednom od izraza relacije [5.50]:

$$w = \oint pdv = -\oint vdp = q_{dov} + q_{odv} = q_{dov} - |q_{odv}| \ \ [J/kg]$$

Primjerice, odredimo dobiveni rad iz Carnotovog desnokretnog kružnog procesa kao razliku dovedene i odvedene toplinske energije. Budući da se toplinska energija i dovodi i odvodi za vrijeme izotermnog procesa to vrijedi, prema [5.17]:

$$q_{12} = RT_{dov} \ln \frac{v_2}{v_1} = q_{dov} > 0,$$

odnosno,

$$q_{34} = RT_{odv} \ln \frac{v_4}{v_3} = -RT_{odv} \ln \frac{v_3}{v_4} = q_{odv} < 0.$$

Procesi se između stanja 2 i 3 i stanja 4 i 1 odvijaju kao adijabatski pa vrijedi stoga relacija [5.26]:

$$\frac{T_{dov}}{T_{odv}} = \left(\frac{v_3}{v_2}\right)^{\kappa-1} = \left(\frac{v_4}{v_1}\right)^{\kappa-1}$$

odnosno, za Carnotov kružni proces vrijedi odnos između specifičnih volumena procesa

$$\frac{v_3}{v_2} = \frac{v_4}{v_1} \text{ ili } v_1v_3 = v_2v_4 \qquad [5.57]$$

pa je dobiveni mehanički rad ($T_{dov} > T_{odv}$, $w > 0$) jednak razlici između količine dovedene toplinske energije za vrijeme izotermne ekspanzije (između stanja 1 i 2)i odvedene toplinske energije za vrijeme izotermne kompresije (između stanja 3 i 4):

$$w = q_{dov} - |q_{odv}| = RT_{dov}\ln\frac{v_2}{v_1} - RT_{odv}\ln\frac{v_3}{v_4} = R(T_{dov} - T_{odv})\ln\frac{v_2}{v_1} \text{ [J/kg]} > 0 \qquad [5.58]$$

Zaključujemo da rad dobiven za vrijeme adijabatske ekspanzije (između stanja 2 i 3) mora biti jednak radu uloženom za odvijanje adijabatske kompresije (između stanja 4 i 1). Provjerimo to određujući rad kružnog procesa sumirajući radove pojedinih dijelova procesa. Dobivamo:

$$w = \oint pdv = \int_{v_1}^{v_2} pdv + \int_{v_2}^{v_3} pdv + \int_{v_3}^{v_4} pdv + \int_{v_4}^{v_1} pdv =$$

$$= RT_{dov}\ln\frac{v_2}{v_1} + c_v(T_{dov} - T_{odv}) + RT_{odv}\ln\frac{v_4}{v_3} + c_v(T_{odv} - T_{dov}) = R(T_{dov} - T_{odv})\ln\frac{v_2}{v_1}$$

Dakako, isti bismo rezultat dobili računamo li rad kružnog procesa i prema izrazu $w = -\oint vdp$. Jedina bi razlika bila, računali bismo sa specifičnom toplinom uz konstantni tlak, c_p, računajući radove adijabatskih procesa u otvorenim sustavima, [5.23].

Odnos tlakova i volumena za vrijeme izotermnih procesa određujemo relacijom [5.13], a termički stupanj djelovanja Carnotovog kružnog procesa relacijom [5.53]. Dobivamo:

$$\eta_{tCKP} = \frac{w}{q_{dov}} = \frac{q_{dov} + q_{odv}}{q_{dov}} = \frac{q_{dov} - |q_{odv}|}{q_{dov}} = 1 - \frac{|q_{odv}|}{q_{dov}} = 1 - \frac{T_{odv}}{T_{dov}} \qquad [5.59]$$

Prema tome je količina toplinske energije koja se u Carnotovom desnokretnom kružnom procesu pretvara u mehanički rad jednaka:

$$w = \eta_{tCKP}\, q_{dov} = \left(1 - \frac{T_{odv}}{T_{dov}}\right) q_{dov} \text{ [J/kg]} \qquad [5.60]$$

Termički stupanj djelovanja Carnotovog kružnog procesa, [5.59], ovisi dakle samo o temperaturama procesa, $\eta_{tCKP} = f(T)$. Je li je to iznenađujući rezultat? Ne. Sustav za vrijeme kružnog procesa ne pretrpljuje nikakve promjene, za razliku od toplinskih spremnika. Logično je stoga da temperature toplinskih spremnika (uz mehaničku i toplinsku izdržljivost materijala) određuju valjanost (odvajanje eksergije od anergije) odvijanja kružnog procesa. Kružni proces može biti bilo kakav, no da bi se mogao odvijati moraju biti zadovoljeni zahtjevi [5.51] i [5.52]:

$T_{TS} \geq T_{\max_{KP}} \equiv T_{dov}$ i $T_{HS} \leq T_{\min_{KP}} \equiv T_{odv}$.

Pokazat ćemo kasnije, Carnotov je desnokretni kružni proces najbolji mogući kružni proces, proces s najvećim termičkim stupnjem djelovanja, pa je dakle mjera za sve kružne procese. Drugim riječima, q_{odv} Carnotovog kružnog procesa je q_{odvmin}, minimalna toplinska energija koju se **mora** iz kružnog procesa (Carnotovog kružnog procesa) odvesti u okolicu, pa jer je $|q_{odvmin}| > 0$, termički stupanj djelovanja Carnotovog kružnog procesa ne može biti jednak jedan ($\eta_{tCKP} = 1 - \frac{|q_{odv}|}{q_{dov}} = 1 - \frac{T_{odv}}{T_{dov}}$). To slijedi i iz ovakve analize. Vrijedi naime da je uvijek $T_{odv} >> 0$ K, pa je stoga i termodinamički stupanj djelovanja Carnotovog kružnog procesa uvijek manji od 1, $\eta_{tCKP} < 1$. Zašto je $T_{odv} >> 0$ K? T_{odv} mora biti viša od temperature hladnog spremnika, koja pak ne može biti niža od najniže temperature u okolici (temperature zraka, vode ili tla), ne ulaže li se, kao što ćemo pokazati, mehanički rad, jer bi u protivnom toplinska energija iz okolice (sustava okolice) prelazila na hladni spremnik i kružni proces povisujući temperaturu hladnog spremnika i T_{odv}, najnižu temperaturu koju poprima sustav (fluid) podvrgnut kružnom procesu, na temperaturu okolice. T_{odv} je dakle, kao i temperatura hladnog spremnika, ograničena i određena temperaturom okolice, T_{ok}.

(Pretpostavljamo da temperaturu okolice, barem ne u kraćem vremenskom intervalu, ne mijenjamo provodeći energetske procese: T_{ok} = konst.)

Priprema toplog spremnika (ogrjevnog spremnika) košta: radi se o korištenju goriva (fosilnog i nuklearnog), skupljanju Sunčevog zračenja i sl. Poželjno je stoga da je hladni spremnik što jeftiniji, „besplatan“ po mogućnosti. Hladnim spremnikom odabiremo stoga jedan, ili više, od sustava okolice: zrak, vodu ili tlo u okolici.

(Dakako, i to košta: hladni spremnik, zbog dugoročnog (nepovoljnog) toplinskog, kemijskog i radioaktivnog utjecaja na okoliš, nije besplatan.)

Je li je moguće, teoretski barem, postići $\eta_{tCKP} = 1$? Ne, jer nije moguće ostvariti $T_{dov} = \infty$, kao ni, što izriče 3. glavni stavak termodinamike, T_{HS} (T_{odv}) = 0 (pa ni uz ulaganje mehaničkog rada).

Zašto se Carnotov kružni proces ne provodi u tehničkoj praksi? U termoelektranama s parnim turbinama, pokazat ćemo, nije praktički moguće ostvariti Carnotov kružni proces, a u termoelektranama s plinskim turbinama ne provodi se (nije ga moguće provesti) jer valja postići vrlo visoke omjere tlakova $p_{max}/p_{min} = p_1/p_3$ da bi se ostvario dovoljno visok termički stupanj djelovanja. Naime, taj omjer tlakova traži vrijednosti koje nije moguće ostvariti jer bi se pritom uspostavile temperature koje materijali ne mogu izdržati. Provjerimo tvrdnju. Izrazimo dovedenu i odvedenu toplinsku energiju pomoću pripadajućih vrijednosti tlaka prema relaciji [5.13]:

$$q_{dov} = RT_{dov} \ln\frac{v_2}{v_1} = RT_{dov} \ln\frac{p_1}{p_2} \text{ i } q_{odv} = -RT_{odv} \ln\frac{v_3}{v_4} = -RT_{odv} \ln\frac{p_4}{p_3}.$$

Dobit ćemo.

$$w = R(T_{dov} - T_{odv})\ \ln\frac{v_2}{v_1} = R(T_{dov} - T_{odv})\ \ln\frac{p_1}{p_2}.$$

Jer vrijedi:

$$\frac{T_2}{T_3} = \left(\frac{p_2}{p_3}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad \text{odnosno} \quad \frac{p_3}{p_2} = \left(\frac{T_3}{T_2}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = \left(\frac{T_2}{T_3}\right)^{\frac{-\kappa}{\kappa-1}},$$

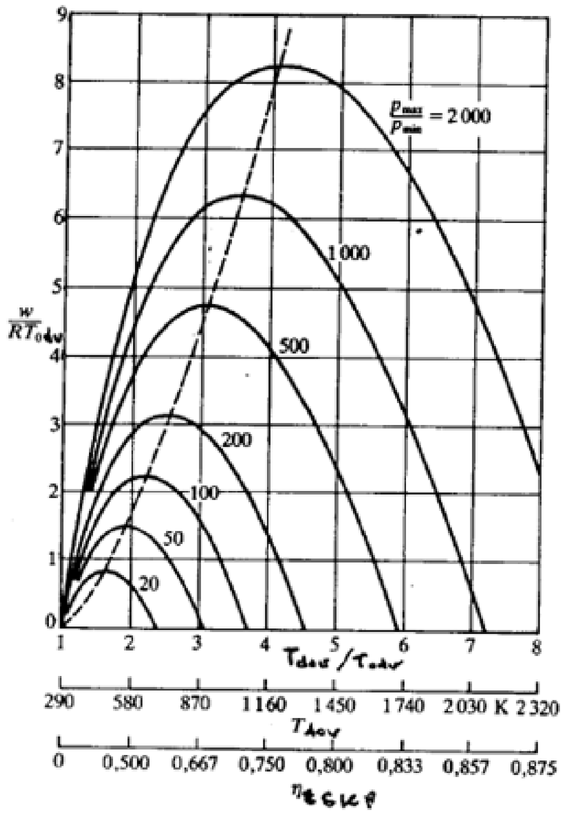
to je

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{p_1}{p_3} \bullet \frac{p_3}{p_2} = \frac{p_{\max}}{p_{\min}} \bullet \left(\frac{T_{dov}}{T_{odv}}\right)^{\frac{-\kappa}{\kappa-1}},$$

pa dobiveni rad Carnotovog kružnog procesa možemo i ovako izraziti:

$$w = R(T_{dov} - T_{odv})\ \ln\frac{p_1}{p_2} .= RT_{odv}\left(\frac{T_{dov}}{T_{odv}} - 1\right)\left[\ln\frac{p_{\max}}{p_{\min}} - \frac{\kappa}{\kappa-1}\ln\frac{T_{dov}}{T_{odv}}\right] \qquad [5.61]$$

Iz [5.61] može se odrediti ovisnost w/T_{odv} o omjeru temperatura T_{dov}/T_{odv} i o omjeru tlakova p_{max}/p_{min}, Slika 5-15.



Slika 5-15 Ovisnost omjera w/T_{odv} Carnotovog procesa o omjeru temperatura T_{dov}/T_{odv} za različite omjere tlakova p_{max}/p_{min}

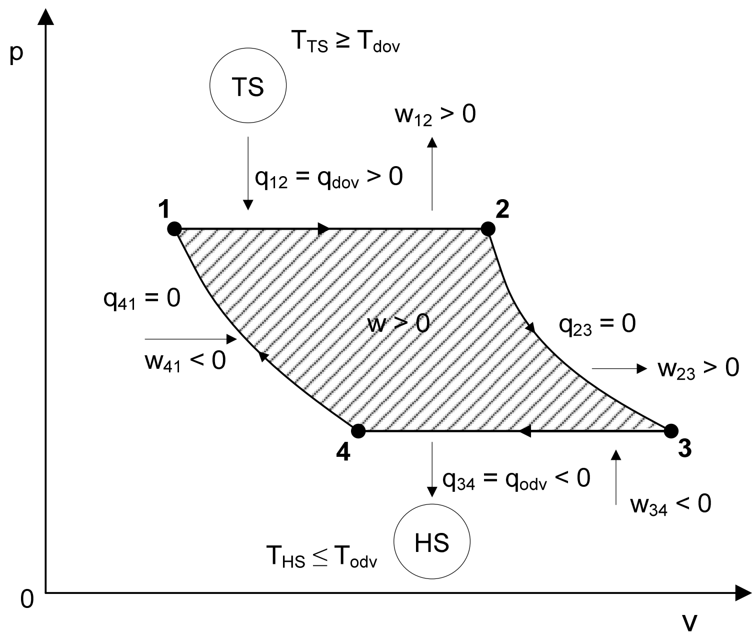
Za svaki se omjer tlakova postiže neka maksimalna vrijednost omjera w/T_{odv}. To ipak ne znači da se za maksimum omjera w/T_{odv} postiže i maksimalni termički stupanj djelovanja, jer on ovisi samo o omjeru temperatura [5.59], ali se za maksimalni omjer w/T_{odv} dobiva takav kružni proces kojim se postiže maksimalni mehanički rad, a to je posljedica činjenice da se ne mogu slobodno odabrati tlakovi p_2 i p_4 kad su zadani tlakovi p_1 i p_3 te temperature T_{dov} i T_{odv}. Ako se dakle želi ostvariti maksimalni mehanički rad, potrebno je za svaki omjer temperatura odabrati odgovarajući omjer p_{max}/p_{min}. Slika 5-15 crtkanom linijom spaja maksimalne vrijednosti krivulja. Tako se može očitati da je za temperaturu T_{dov} = 900 K (T_{odv} = 290 K) potreban omjer tlakova p_{max}/p_{min} = 500 i da se tada postiže termički stupanj djelovanja Carnotovog kružnog procesa jednak 0,678.

Pokušaji da se ostvari toplinski stroj s (idealnim) plinom prema Carnotovom desnokretnom kružnom procesu nisu uspjeli pa on danas ima samo teorijsku važnost za usporedbu s tehnički izvedivim procesima.

5.6.5 Jouleov kružni proces

Za tehničku je praksu primjenjiv kružni proces sastavljen od dviju izobara i dviju adijabata, Slika 5-16. To je proces među stalnim (konstantnim) tlakovima ili Jouelov kružni proces.

(U američkoj se literaturi i praksi naziva Braytonovim kružnim procesom).



Slika 5-16 Jouelov kružni proces

Dobiveni je rad za vrijeme odvijanja desnokretnog Jouelovog kružnog procesa jednak:

$$w = q_{dov} - |q_{odv}| = c_p (T_2 - T_1) - c_p (T_3 - T_4) \text{ [J/kg]} \qquad [5.62]$$

a termički stupanj djelovanja

$$\eta_{\mathrm{tJKP}} = \frac{w}{q_{dov}} = 1 - \frac{|q_{odv}|}{q_{dov}} = 1 - \frac{T_3 - T_4}{T_2 - T_1} = 1 - \frac{T_4}{T_1}\frac{\left(\frac{T_3}{T_4} - 1\right)}{\left(\frac{T_2}{T_1} - 1\right)} = 1 - \frac{T_4}{T_1} \qquad [5.63]$$

Za Jouelov kružni proces vrijedi ovaj odnos između temperatura procesa:

$$\mathrm{T_1T_3 = T_2T_4} \qquad [5.64]$$

pa je razlomak $\dfrac{\left(\frac{T_3}{T_4} - 1\right)}{\left(\frac{T_2}{T_1} - 1\right)}$ jednak 1.

Naime, procesi su između stanja **2** i **3** i stanja **4** i **1** adijabatski tako da vrijedi relacija [5.26]:

$$\frac{T_1}{T_4} = \left(\frac{p_v}{p_n}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = \frac{T_2}{T_3} = \left(\frac{p_v}{p_n}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \Rightarrow \frac{T_1}{T_4} = \frac{T_2}{T_3} \Rightarrow \mathrm{T_1T_3 = T_2T_4}$$

Usporedimo sada termičke stupnjeve djelovanja Carnotovog i Jouleovog kružnog procesa. Dakako, oba se procesa moraju odvijati u istim okolnostima. Drugim riječima, budući da toplinski spremnici određuju termičke stupnjeve djelovanja kružnih procesa, mora vrijediti:

$T_{maxCKP} = T_{maxJKP} = T_{max}$ i $T_{minCKP} = T_{minJKP} = T_{min}$. No, $T_{maxCKP} = T_{dov}$, a $T_{maxJKP} = T_2$. Slično, $T_{minCKP} = T_{odv}$, a $T_{minJKP} = T_4$, Slika 5-16.

Vrijedi dakle:

$$\eta_{\mathrm{tCKP}} = 1 - \frac{T_{odv}}{T_{dov}} = 1 - \frac{T_{\min}}{T_{\max}} \qquad \text{i} \qquad \eta_{\mathrm{tJKP}} = \frac{w}{q_{dov}} = 1 - \frac{T_4}{T_1} = 1 - \frac{T_{\min}}{T_1}.$$

Jer temperatura T_1 nije najviša temperatura u Jouleovom kružnom procesu, $T_1 < T_{maxJKP} = T_2$, to je termički stupanj djelovanja Jouleovog kružnog procesa manji od termičkog stupnja djelovanja Carnotovog kružnog procesa: $\eta_{tJKP} < \eta_{tCKP}$.

Dvije su najvažnije primjene Jouleovog kružnog procesa u termoelektranama s plinskim turbinama, odnosno u termoelektranama sa spojnim procesima, i za pogon reaktivnih (mlaznih) motora velikih zrakoplova.

U termoelektranama s plinskim turbinama Jouleov se kružni proces ostvaruje prema slikama 3-41 i 3-42 s time da se toplinska energija što se dovodi u kružni proces dobiva transformacijom iz kemijske energije goriva ili nuklearne energije nuklearnog goriva. U zatvorenom se procesu djelatna tvar (plin) i niži tlak, p_n, mogu odabrati prema potrebi, a u otvorenom je procesu djelatna tvar okolni zrak pa je dakle $p_n = p_{ok}$.

Plinska se turbina međutim u otvorenom procesu upotrebljava učestalije za pogon zrakoplova (reaktivnog motora) nego li kao dio stacionarnog postrojenja u kojemu se proizvodi električna energija ili za neposredni pogon nekog stroja. Pritom u turbini smjesa plinova izgaranja i zraka ekspandira samo djelomično do nekog tlaka, koji je viši od onog u okolici, jer treba proizvesti samo onoliku snagu kolika je potrebna za pogon kompresora. Preostali se dio entalpije, uz ekspanziju do tlaka okolice, transformira u kinetičku energiju u izlaznoj sapnici (to može biti i de Lavalova sapnica) tako da plinovi izgaranja izlaze brzinom (mnogo) većom od brzine zrakoplova. Zbog toga se pojavljuje „sila reakcije“ (o toj ćemo sili kasnije detaljno govoriti na idućoj godini studija) koja omogućuje let zrakoplova. Ta je sila (zadovoljavajuće) približno jednaka (točnu silu odredit ćemo isto tako na idućoj godini studija; radi se naime o gibanju sustava s promjenljivom masom):

$$\vec{F} \approx -\dot{m}\left(\vec{c}_{izlplinova} + \vec{c}_{zrakoplova}\right) \text{ [N]}.$$

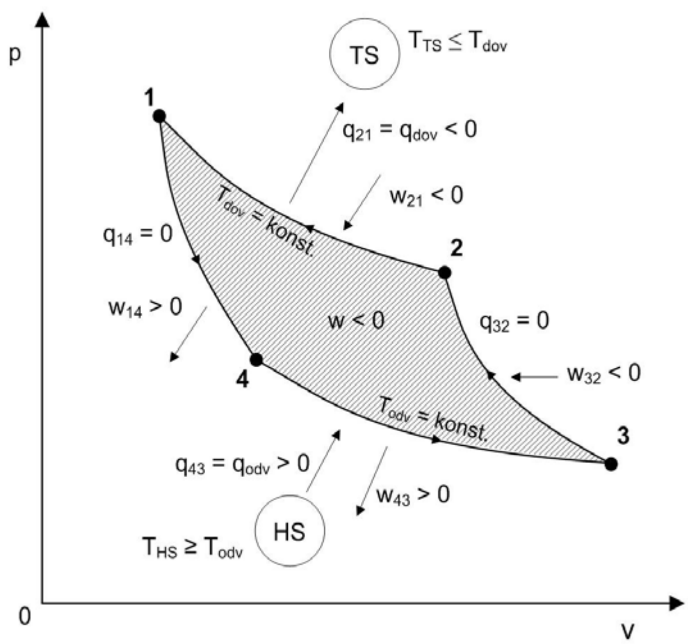
Predznak minus naznačuje da je smjer sile suprotan smjeru vektorskog zbroja brzina.

(Brzine dakako, jer se radi o vektorima, moramo zbrajati vektorski; u promatranom slučaju one su suprotnog smjera.)

Očito, što je veća izlazna brzina plinova, to zrakoplov (raketa) može uz istu potrošnju goriva, $\dot{m}$ [kg/s], brže letjeti i dalje doletjeti. otuda i velika važnost konstrukcije i izvedbe de Lavalove sapnice.

5.6.6 Ljevokretni kružni procesi

Razmotrimo sada mogućnosti provođenja ljevokretnih kružnih procesa i njihovu uporabu. U načelu svaki se desnokretni kružni proces može odvijati i kao ljevokretni; nužan će uvjet i sada biti postojanje dvaju toplinskih spremnika. Ilustracije radi, promatrajmo realizaciju ljevokretnog Carnotovog kružnog procesa, Slika 5-17. Zadržat ćemo (namjerno) oznake i parametre tog kružnog procesa jednake onima desnokretnog Carnotovog kružnog procesa, Slika 5-14; bit će kasnije jasno zašto.



Slika 5-17 Ljevokretni Carnotov kružni proces

Početno stanje kružnog procesa neka je stanje **1**. I dok desnokretni kružni proces započinje s izotermnom ekspanzijom između stanja **1** i **2**, ljevokretni će započeti adijabatskom ekspanzijom između stanja **1** i **4**. Za vrijeme tog procesa dobiva se mehanički rad. *(U slučaju desnokretnog kružnog procesa odvijala se adijabatska kompresija između stanja **4** i **1**, dakle dovođenje mehaničkog rada u kružni proces.)* Nakon toga se u ljevokretnom kružnom procesu odvija izotermna ekspanzija (dobivanje mehaničkog rada) na temperaturi T_{odv}. Da bi takav proces bio moguć, mora se u kružni proces dovoditi toplinska energija. Budući da je proces zamišljen tako da se toplinska energija dovodi iz hladnog spremnika, tj., toplinskog spremnika niže temperature, mora temperatura T_{odv} biti niža od temperature hladnog spremnika, odnosno u graničnom slučaju jednaka: $T_{odv} \leq T_{HS}$. Toplinska se energija dovodi u kružni proces, ona je dakle pozitivnog predznaka, i trebali bismo je označiti s q_{dov}. No, jer smo, kada smo razmatrali desnokretne kružne procese, toplinsku energiju koja se izmjenjuje između kružnog procesa i hladnog spremnika označili s q_{odv}, a onu koja se izmjenjuje između kružnog procesa i toplog spremnika s q_{dov}, zadržat ćemo te oznake i u slučaju odvijanja ljevokretnog kružnog procesa znajući da se sada, u slučaju ljevokretnog kružnog procesa, q_{odv} dovodi u kružni proces.

(Zašto postupamo tako? Jer ćemo u tom slučaju, pokazat ćemo, iste izraze moći rabiti kako za desnokretne tako i za ljevokretne kružne procese.)

Nakon izotermne ekspanzije slijedi adijabatska kompresija, ulaganjem mehaničkog rada, između stanja **3** i **2**, da bi se izotermnom kompresijom, temperature T_{dov}, između stanja **2** i **1**, ljevokretni kružni proces vratio u početno stanje. Izotermna je kompresija moguća samo odvodi li se toplinska energija iznosa q_{dov} iz procesa. Tu toplinsku energiju mora preuzeti topli spremnik, toplinski spremnik više temperature, pa dakle mora vrijediti ovaj odnos između temperatura: $T_{dov} \geq T_{TS}$. Predznak je međutim te toplinske energije negativan, ona se odvodi iz procesa uz istodobno ulaganje mehaničkog rada kompresije. Budući da se radovi adijabatskih procesa međusobno poništavaju, mehanički je rad ljevokretnog kružnog procesa očito negativan i jednak razlici dobivenog mehaničkog rada za vrijeme izotermne ekspanzije i utrošenog mehaničkog rada za vrijeme odvijanja izotermne kompresije:

$$w = \oint pdv = -\oint vdp = q_{dov} + q_{odv} = q_{odv} - |q_{dov}| = = RT_{odv} \ln\frac{v_3}{v_4} - RT_{dov} \ln\frac{v_2}{v_1} \qquad [5.65]$$

$$= R(T_{odv} - T_{dov}) \ln\frac{v_2}{v_1} \quad [J/kg]$$

Jer je $T_{dov} > T_{odv}$, to je $w < 0$, ali je i sada mehanički rad utrošen na odvijanje ljevokretnog kružnog procesa jednak (proporcionalan) ploštini površine kružnog procesa u p,v-dijagramu. Da bi se dakle mogao provoditi ljevokretni kružni proces nužno je prema rečenome raspolagati s mehaničkim radom i toplinskim spremnicima temperatura koje određuju temperature u ljevokretnom kružnom procesu: $T_{HS} \geq T_{odv}$ i $T_{TS} \leq T_{dov}$. Rezultat je odvijanja ljevokretnog kružnog procesa manjak unutrašnje kaloričke energije u hladnom a višak u toplom spremniku: ljevokretnim kružnim procesom „dižemo“ toplinsku energiju s niže temperature hladnog spremnika na višu temperaturu toplog spremnika što nije prirodan smjer strujanja toplinske energije. Uređaji u kojima se provodi ljevokretni kružni proces nazivaju se stoga rashladnim strojevima (hladnjacima) jer oduzimajući toplinsku energiju jednom (hladnom) toplinskom spremniku snižavamo njegovu temperaturu, odnosno i dizalicama topline (toplinskim pumpama) jer predajući toplinsku energiju drugom (toplom) toplinskom spremniku povisujemo njegovu temperaturu. Naime, temperature se T_{odv} i T_{dov} kod takvih uređaja, prilagođene izboru hladnog i toplog spremnika, postavljaju odgovarajući potrebama. U slučaju hladnjaka hladni je spremnik unutrašnjost hladnjaka, a topli spremnik okolica. Utroškom mehaničkog rada smanjujemo količinu (gustoću) unutrašnje kaloričke energije u hladnjaku (odvođenjem toplinske energije u okolicu) i zbog toga se snižava temperatura u hladnjaku. Možemo međutim, što je s energetskog stajališta zanimljiviji ljevokretni kružni proces, podići temperaturnu razinu tako da je okolica hladni spremnik, a topli će nam spremnik onda biti prostorija (prostorije) koju (koje) treba grijati. U tom ćemo slučaju „dizati" toplinsku energiju iz okolice (toplinsku energiju nastalu transformacijom iz unutrašnje kaloričke energije okolice) predajući je u unutrašnjost grijanih prostorija. Način rada takvog uređaja (kružnog procesa), „dizalice topline", ne razlikuje se od rada nekog rashladnog stroja samo što je smještaj temperatura viši, a toplinska se energija ne predaje okolici nego se oduzima od nje. Npr., zamislimo zimski dan s niskom temperaturom, - 20°C; jezero pokraj kuće „okovano" je debelim ledom. No, ispod leda, dostupna voda neka je temperature 2°C. Raspolažemo s dizalicom topline i želimo temperaturu prostorija kuće održavati na 20°C. Dakle je: T_{odv} = 275,15 K, a T_{dov}= 293,15 K. Zanima nas utrošak mehaničkog rada (električne energije) i količina toplinske energije kojom ćemo grijati kuću. U idealnom slučaju (promatramo Carnotov ljevokretni kružni proces) dobivamo, jer vrijedi za Carnotov kružni proces $\frac{w}{q_{dov}} = \frac{q_{dov} + q_{odv}}{q_{dov}} = \frac{T_{dov} - T_{odv}}{T_{dov}}$, zanimaju li nas samo apsolutne vrijednosti izmijenjenih energija:

$|q_{dov}| = |w| \dfrac{T_{dov}}{T_{dov} - T_{odv}}$ odnosno

$$\frac{|q_{dov}|}{|w|} = \frac{T_{dov}}{T_{dov} - T_{odv}} = \frac{293{,}15}{293{,}15 - 275{,}15} \approx 16{,}29. \qquad [5.66]$$

Drugim riječima, utroškom 1 kWh električne energije (eksergije) za pogon dizalice topline kuću bismo grijali sa 16,29 kWh toplinske energije. *(Jasno, neposrednim grijanjem električnim otpornikom (električnom peći), dobili bismo samo 1 kWh toplinske energije.)*

Omjer se $\frac{|q_{dov}|}{|w|}$ (često) naziva faktorom preobrazbe.

Dakako, razmatrali smo idealni slučaj; u realnosti postižu se (najveći) omjeri $\frac{|q_{dov}|}{|w|}$ oko 7 do 8.

(Postavlja se pitanje zašto se dizalice topline ne rabe više. Zato jer se još uvijek radi, ne može li se iskorištavati geotermalna energija, u usporedbi s cijenom energije, o preskupim uređajima čije je održavanje isto tako skupo. Iskorištava li se međutim geotermalna energija, dizalice topline mogu biti isplative. U tom slučaju naime faktor se preobrazbe enormno povećava budući da je razlika između temperatura T_{dov} i T_{odv} bliska nuli pa omjer $\frac{|q_{dov}|}{|w|} = \frac{T_{dov}}{T_{dov} - T_{odv}}$ teži prema beskonačnom.)

Obrazložimo sada zašto smo inzistirali na zadržavanju istih oznaka bez obzira radi li se o desnokretnom ili ljevokretnom kružnom procesu, odnosno zašto smo q_{dov} povezivali s toplim spremnikom, bez obzira dovodi li mu se ili odvodi toplinska energija, a q_{odv} s hladnim spremnikom, bez obzira na stvarni smjer prijelaza toplinske energije. Razlog je jer u tom slučaju (ista) relacija, $w = q_{dov} + q_{odv}$, vrijedi i za desnokretni i za ljevokretni kružni proces.

(U suprotnom morali bismo rabiti dva izraza, ovisno o tome koji kružni proces analiziramo.)

Naime, u slučaju desnokretnog kružnog procesa vrijedi: $w = q_{dov} + q_{odv} > 0$ budući da je $q_{dov} > 0$ pa je i $w > 0$, mada je $q_{odv} < 0$, jer je $q_{dov} > |q_{odv}|$, Slika 5-14.

Radi li se o ljevokretnom kružnom procesu, to je $w = q_{dov} + q_{odv} < 0$ jer je sada $q_{dov} < 0$ pa je i $w < 0$, mada je sada $q_{odv} > 0$, jer i u slučaju ljevokretnog kružnog procesa vrijedi relacija $|q_{dov}| > q_{odv}$, Slika 5-17.