UDK 621.18

Prispevek k metodiki preizkušanja parnih kotlov*

LEOPOLD ANDRÉE

1. UVOD

Ekonomičnost obratovanja parnih kotlov ocenjujemo z izkoristkom, tj. razmerjem med koristno pridobljeno toploto in kotlu dovedeno toploto. Znani sta dve metodi za določanje izkoristka parnih kotlov, in sicer: direktna metoda in indirektna metoda. V obeh primerih je treba opraviti preizkus kotla z merjenjem raznih obratovalnih veličin, s katerimi potem izračunamo izkoristek kotla po eni od obeh metod.

Posamezne veličine kotla se med obratovanjem bolj ali manj spreminjajo. Zato mora potekati preizkus za določitev izkoristka kotla neko minimalno dobo pri čim bolj konstantni obremenitvi. Za izračun izkoristka pridejo potem v poštev seveda poprečne vrednosti obratovalnih veličin.

Pri merjenju posameznih veličin dobimo merilni rezultat, ki se razlikuje od prave vrednosti merjene veličine za mogočo merilno toleranco. Čim natančnejša je uporabljena merilna metoda, tem manjša je mogoča merilna toleranca in tem bolj se približuje merilni rezultat pravi vrednosti merjene veličine. Merilne tolerance merjenja posameznih veličin določajo potem skupno merilno toleranco določitve izkoristka kotla.

Da bi bilo omogočeno enotno izvajanje meritev pri preizkusih za določitev izkoristka kotlov, so bila sestavljena ustrezna pravila za preizkuse parnih kotlov v obliki standardov, npr.: nemški standard DIN 1942.

2. DIREKTNA METODA ZA DOLOČANJE IZKORISTKA

V preprostem primeru parnega kotla brez stalnega kaluženja, brez ponovnega (vmesnega) pregrevanja pare in brez dovajanja drugod ogretega zgorevalnega zraka je podan izkoristek kotla po direktni metodi z obrazcem:

$$\eta = \frac{D\,(h - h_v)}{B\,H_i}\,100 \quad [\%]$$

Tu pomenijo:

D — količino proizvedene pare [kg/s];

h — entalpijo proizvedene pregrete pare [kJ/kg];

h_v — entalpijo napajalne vode [kJ/kg];

B — količino dovedenega goriva [kg/s] in

H_i — kurilnost dovedenega goriva [kJ/kg].

Izkoristek kotla se spreminja z obremenitvijo.

Direktna metoda za določitev izkoristka parnega kotla je zaradi svoje preglednosti zelo preprosta, če ni težav pri merjenju posameznih veličin. Za določitev vseh potrebnih veličin je treba pri tej metodi meriti skupno 8 veličin. Da bi ugotovili uporabnost te metode pri uporabi za velike parne kotle, bomo analizirali možnosti merjenja oziroma določanja posameznih veličin.

Pri merjenju količine pare normalno ni nobenih težav. Uporabljamo zaslonko ali kak drug dušilni organ in diferenčni manometer. Merilni rezultat in pripadajočo merilno toleranco izračunamo po ustreznih pravilih za pretočna merjenja, npr.: po nemškem standardu DIN 1952.

Tudi pri določanju entalpije pregrete pare in napajalne vode ni težav. Izmeriti je treba tlak in temperaturo obeh medijev, pa ugotovimo entalpijo v tabelah za vodno paro. Za merjenje tlakov in temperatur obeh medijev je na voljo zadosti merilnih metod, treba jih je le pravilno in vestno uporabljati.

Pri določanju kurilnosti uporabljenih goriv je treba upoštevati, da npr. premog nikakor nima konstantne kvalitete ter zato tudi ne konstantne kurilnosti. Torej bo zelo pomembno, kako odvzemamo vzorce premoga in kako pridemo do poprečnega vzorca premoga, ki mora imeti enako kurilnost, kakor znaša poprečna vrednost kurilnosti vsega premoga, ki je bil pokurjen med tem preizkusom. Za pravilni odvzem in pripravo poprečnih vzorcev premoga so posebna pravila, npr. nemški standard DIN 51701.

Določitev kurilnosti poprečnega vzorca premoga ne povzroča težav, celoten postopek pa je prav tako podan v posebnih pravilih, npr. v nemškem standardu DIN 51708.

Kakšne pa so možnosti za določitev količine uporabljenega premoga pri velikih parnih kotlih, npr. s kurjavo na premogov prah s 4 mlini in z direktnim vpihavanjem? V takih primerih pripada normalno vsakemu mlinu poseben bunker, od koder dovajamo premog v pripadajoči mlin prek tračnega, verižnega ali krožnega dodelilnika. V praksi imamo navadno vgrajeno tračno tehtnico v transportni trak, ki dovaja premog vsem bunkerjem. Z njo torej določamo celotno količino premoga, ki jo dovajamo v bunkerje.

Treba pa je ugotoviti količino premoga, ki pride iz bunkerjev v kotel. Pomagamo si tako, da napolnimo posamezne bunkerje s premogom ob koncu preizkusa do enake višine, do katere so bili napolnjeni ob začetku preizkusa. Potem pa predpostavimo, da je prišla enaka količina premoga, ki smo jo dovedli v bunkerje za izravnavo, tudi v kotel. Čim večji pa je kotel, tem večji so tudi bunkerji in

* Ta članek je nekoliko dopolnjen ponatis poročila iz ZBORNIKA DEL II. jugoslovanskega simpozija o električnih meritvah in merilni opremi, ki je bil v Ljubljani v oktobru 1963. Članek pa je postal aktualen zato, ker izpopolnjena tehnika obravnavanja merilnih podatkov namreč šele sedaj omogoča realizacijo poldirektne metode v praksi za trajno nadziranje obratovanja velikih parnih kotlov s kurjavami na premogov prah.

hkratna izravnava premoga v bunkerjih do enake višine je praktično skoraj neizvedljiva.

Določitev količine uporabljenega premoga zadaja torej pri velikih parnih kotlih toliko težav in s tolikšnimi tolerancami, da je direktna metoda določitve izkoristka pri velikih parnih kotlih s kurjavami na premogov prah praktično sploh neuporabna.

3. INDIREKTNA METODA DOLOČITVE IZKORISTKA

Pri tej metodi moramo določiti vse toplotne izgube, ki se pojavijo med obratovanjem pri določeni obremenitvi kotla, nato pa določimo pripadajoči izkoristek parnega kotla po obrazcu:

$$\eta = 100 - \Sigma\,(x) \quad [\%]$$

Če vzamemo npr. velik parni kotel s kurjavo na premogov prah, vidimo, da se pojavljajo v takih primerih naslednje toplotne izgube:

3.1. Izgube zaradi nezgorelega dela izgorkov (x_1)

Te izgube nastanejo zaradi tega, ker ostajajo na dnu kurišča v izgorkih (žlindri) še gorljive snovi. V primeru uporabe dogorevalne rešetke določimo te izgube po obrazcu:

$$x_1 = y_1 \,.\, c_1 \,.\, 33285/H_i \quad [\%]$$

Tu pomenijo

y_1 — relativno količino teh izgorkov glede na celotno količino goriva [kg/kg];

c_1 — gorljive ostanke v teh izgorkih [%] in

H_i — kurilnost uporabljenega goriva [kJ/kg].

Pri kotlih s kurjavami brez dogorevalnih rešetk pa določimo izgube zaradi nezgorelega dela izgorkov po obrazcu:

$$x_1 = y_1 \,.\, 100 \,.\, H_{i1}/H_i \quad [\%]$$

Tu pomeni H_{i1} — kurilnost izgorkov [kJ/kg]. Pomen drugih označb je enak kakor prej.

3.2. Izgube zaradi nezgorelega dela letečega pepela

Te izgube izračunamo po obrazcu:

$$x_2 = y_2 \,.\, c_2 \,.\, 33285/H_i \quad [\%]$$

Pomen označb je enak kakor zgoraj. Te izgube se pojavljajo povsod, kjer se izloča leteči pepel, in sicer v našem primeru:

— v jašku pod pregrevalnikom (x_2);
— v jašku pod grelnikom zraka (x_3);
— v jašku pred elektrofiltrom (x_4);
— v I. jašku elektrofiltra (x_5) in
— v II. jašku elektrofiltra (x_6).

Na vsakem od teh odvzemnih mest je treba določiti oziroma izmeriti količino pripadajočih izgorkov, tj. letečega pepela (npr. B_2 kg/h), s katerimi potem izračunamo pripadajoče relativne količine, npr.:

$$y_2 = B_2/B \quad [\text{kg/kg}]$$

Poleg tega je treba določiti v letečem pepelu na vsakem od navedenih odvzemnih mest tudi delež gorljivih ostankov (npr.: c_2 %).

3.3. Izgube zaradi nezgorelih plinov (x_p)

Te izgube nastajajo zaradi tega, ker ostajajo v dimnih plinih še gorljivi plini, predvsem CO. Določamo jih npr. po BRAUSSovi enačbi:

$$x_p = f \,.\, CO/(CO_2 + CO) \quad [\%]$$

Tu pomenijo

f — faktor, ki je odvisen od vrste goriva;

CO — prostorninski delež CO v suhih dimnih plinih [%] in

CO_2 — prostorninski delež CO_2 v suhih dimnih plinih.

3.4. Sevalne izgube ($x_ž$)

Sevalne izgube odberemo za normalno izdelane in izolirane vodnocevne parne kotle v ustreznem diagramu, in sicer v odvisnosti od zmogljivosti in obremenitve tistega parnega kotla.

3.5. Izgube zaradi toplote žlindre (x_t)

Te izgube upoštevamo tedaj, kadar odvzemamo žarečo (ali pa raztaljeno) žlindro iz kurišča ter jo speljemo v zaporno vodno korito. Izračunamo jih po obrazcu:

$$x_t = y_1 \,.\, c_ž \,.\, t_ž \,.\, 100/H_i \quad [\%]$$

Tu pomenijo

y_1 — relativno količino žlindre [kg/kg];

$c_ž$ — specifično toploto žlindre [kJ/kgK] in

$t_ž$ — temperaturo odvzete žlindre [°C].

3.6. Dimnične izgube (x_d)

Te izgube povedo, koliko toplote odnašajo plini, ki odtekajo iz kotla proti dimniku. Izračunamo jih npr.: z enačbo po SIEGERTU:

$$x_d = s \,.\, (t_d - t_z)/(CO_2 + CO) \quad [\%]$$

Tu pomenijo

s — faktor, ki je odvisen od vlage goriva ter od deleža ($CO_2 + CO$) [%] v odtekajočih dimnih plinih;

t_d — temperaturo odtekajočih dimnih plinov [°C] in

t_z — temperaturo okoliškega zraka [°C].

3.7. Določitev izkoristka

Indirektna metoda določitve izkoristka je posebno primerna za velike parne kotle s kurjavami na premogov prah. V takih primerih je mogoče uporabljati indirektno metodo pri relativno majhni merilni toleranci. Za dani primer parnega kotla bi torej določili izkoristek takole:

$$\eta = 100 - (x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_p + x_ž + x_t + x_d) \quad [\%]$$

Iz tega je razvidno, da je treba v danem primeru parnega kotla določiti 10 posameznih toplotnih izgub, za kar je skupno potrebno 23 podatkov oziroma merilnih rezultatov.

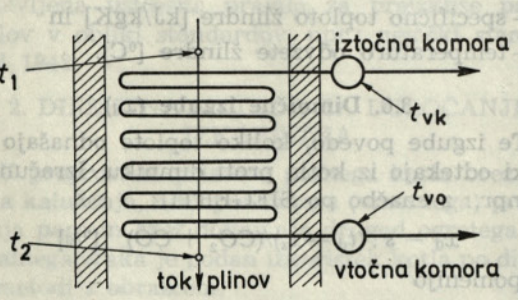
Indirektna metoda za določitev izkoristka sicer zanesljivo vodi do rezultata pri parnih kotlih s kurjavami na premogov prah, je pa manj pregledna kakor direktna metoda ter še zelo zamudna. Prav zato je manj primerna za trajno nadziranje obratovanja velikih parnih kotlov s kurjavami na premogov prah.

4. POLDIREKTNA METODA DOLOČITVE IZKORISTKA

V prizadevanju, da bi dobili pregledno metodo, ki bi omogočala hitro ugotovitev izkoristka velikih parnih kotlov s kurjavami na premogov prah, predlaga in opisuje avtor novo metodo. Imenoval jo je: poldirektna metoda. To je pravzaprav direktna metoda za določitev izkoristka, pri kateri je nadomeščeno zamudno in nenatančno merjenje količine premoga z indirektno določitvijo.

4.1. Indirektna določitev količine premoga

Pri določenem parnem kotlu (prednostno s kurjavo na premogov prah) izberemo oni del ogrevalnih površin, pri katerih je mogoče enoznačno izmeriti veličine stanja na strani plinov, ki oddajajo toploto, in tudi na strani medija, ki toploto sprejema. Normalno je za te namene najbolj primeren grelnik vode, ki pa mora imeti komoro na vtoku in na iztoku (slika 1).



Slika 1

Na strani vode potem izmerimo med preizkusom v stacionarnem stanju obratovanja kotla naslednje veličine:

D_v — količino napajalne vode [kg/s];
t_{vk} — temperaturo napajalne vode na iztoku [°C];
t_{vo} — temperaturo napajalne vode na vtoku [°C] in
p_v — tlak napajalne vode na vtoku [bar].

Z veličinami stanja napajalne vode dobimo potem v parnih tabelah pripadajoče entalpije:
h_{vk} — entalpijo napajalne vode na iztoku [kJ/kg],
h_{vo} — entalpijo napajalne vode na vtoku [kJ/kg].

Toplotni tok, ki ga sprejema grelnik vode, pa je enak:

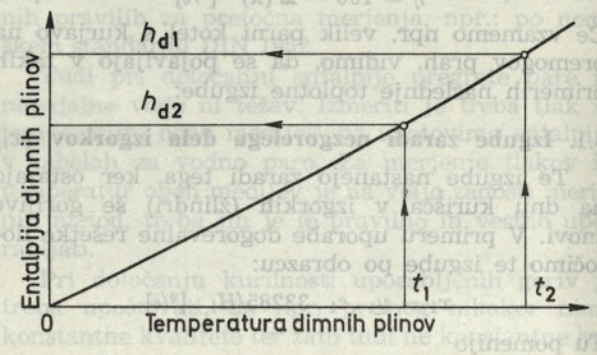
$$\Phi_v = D_v (h_{vk} - h_{vo}) \quad [kW]$$

Da bi lahko določili ta toplotni tok, ki ga sprejema grelnik vode od dimnih plinov, še na drug način, merimo med preizkusom na strani plinov naslednji temperaturi:

t_1 — temperaturo dimnih plinov na vtoku [°C] in
t_2 — temperaturo dimnih plinov na iztoku [°C].

Tema temperaturama dimnih plinov pripadata pri določenem razmerniku zraka po diagramu $h_d - t$ dimnih plinov, ki ga dobimo z elementno analizo uporabljenega premoga (slika 2), naslednji entalpiji:

h_{d_1} — entalpija dimnih plinov na vtoku v grelnik vode [kJ/kg] in
h_{d_2} — entalpija dimnih plinov na iztoku iz grelnika vode [kJ/kg].



Slika 2

Toplotni tok, ki ga oddajajo dimni plini pri pretoku skozi grelnik vode, je potem enak:

$$\Phi_{dv} = B' (h_{d_1} - h_{d_2}) \quad [kW]$$

Tu je seveda treba upoštevati le ono količino goriva, ki dejansko zgori. Ta količina je zaradi vsega nezgorelega goriva manjša od dovedene količine goriva:

$$B' = B (1 - x_k/100) \quad [kg/s]$$

V našem primeru je x_k enak:

$$x_k = (x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6) \quad [\%]$$

Vsota teh izgub je pri določenem gorivu in določeni zgorevalni napravi izkustvena vrednost. Na primer pri zgorevanju lignitov in rjavih premogov v kuriščih na premogov prah pri parnih kotlih s kapacitetami od 140 do 860 t/h znaša od 1 do 3 %.

Ta toplotni tok sprejema v glavnem grelnik vode; en del pa se porablja tudi za kritje sevalnih izgub. Zato je toplotni tok Φ_v, ki ga dejansko sprejme grelnik vode, tudi enak:

$$\Phi_v = \left(1 - \frac{x_ž}{100}\right) \Phi_{dv} =$$

$$= \left(1 - \frac{x_ž}{100}\right) B' (h_{d_1} - h_{d_2}) \quad [kW]$$

Če izenačimo na dva načina določeni toplotni tok Φ_v, ki ga dobiva grelnik vode od dimnih plinov, dobimo naslednjo enačbo:

$$D_v (h_{vk} - h_{vo}) = (100 - x_ž) B' (h_{d_1} - h_{d_2})/100$$

Iz te enačbe izračunamo količino goriva:

$$B' = \frac{D_v (h_{vk} - h_{vo}) 100}{(100 - x_ž) (h_{d_1} - h_{d_2})} \quad [kg/s]$$

Za izračun količine premoga po tem obrazcu potrebujemo poleg pripadajočega $h_d - t$ diagrama dimnih plinov še skupno 9 merilnih rezultatov.

4.2. Določitev izkoristka kotla po novi metodi

Indirektno določeno količino premoga vstavimo v obrazec za izkoristek kotla po direktni metodi ter dobimo:

$$\eta = \frac{D (h - h_v) (100 - x_ž) (h_{d_1} - h_{d_2}) (1 - x_k/100)}{H_i D_v (h_{vk} - h_{vo})} \quad [\%]$$

Za izračun izkoristka kotla po tej metodi je treba meriti naslednje število veličin:

za direktno metodo brez B:	8 — 1 =	7 veličin
za indirektno določitev B:		9 veličin
	skupno:	16 veličin

Iz navedenega je razvidno, da potrebuje poldirektna metoda določitve izkoristka 7 veličin manj kakor indirektna metoda za določitev izkoristka kotla. Prav tako je razvidno, da je poldirektna metoda uporabna predvsem za velike parne kotle s kurjavami na premogov prah, seveda, če imajo ti kotli tako obliko grelnika vode, da je uporaba te metode mogoča.

Poldirektna metoda določitve izkoristka kotla pa se še poenostavi v primeru, če je:

$$h_v = h_{vo}$$
$$D = D_v$$

To pa pomeni, da vstopa napajalna voda v tisti grelnik vode, ki ga uporabljamo za poldirektno metodo, količina proizvedene pare pa je enaka količini napajalne vode. To je tedaj, če ni kaluženja kotelske vode in ne hlajenja pare z vbrizgavanjem napajalne vode.

V tem primeru se glasi obrazec za določitev izkoristka kotla po poldirektni metodi:

$$\eta = \frac{(h - h_v) (100 - x_ž) (h_{d_1} - h_{d_2}) (1 - x_k/100)}{H_i (h_{vk} - h_v)} \quad [\%]$$

Za izračun izkoristka kotla je treba v tem primeru meriti le 11 veličin, kar pove, da je ta nova metoda mnogo preprostejša od indirektne metode za določitev izkoristka kotla. Zato je poldirektna metoda primerna za trajno nadziranje obratovanja velikih parnih kotlov s kurjavami na premogov prah, seveda pod pogojem, da njihovi grelniki vode omogočajo uporabo te metode.

4.3. Uporaba poldirektne metode

Za oceno uporabnosti nove metode bomo analizirali, kako določamo tiste potrebne veličine, ki se ne pojavljajo tudi pri obeh klasičnih metodah za določitev izkoristka. Problematika določanja veličin, potrebnih za obe klasični metodi, je bila navedena v prejšnjih poglavjih. Predvsem je treba ugotoviti možnosti določitve obeh entalpijskih razlik na strani vode in na strani dimnih plinov.

Za določitev entalpijske razlike $(h_{vk} - h_v)$ moramo poznati poleg tlaka napajalne vode tudi temperaturo na vtoku (t_v) in iztoku (t_{vk}) grelnika vode. Če bi merili ti dve temperaturi z enako merilno metodo, bi bila tako pridobljena temperaturna razlika obremenjena z merilno toleranco, ki je enaka vsoti toleranc obeh delnih merjenj. Seveda bi bila tudi pripadajoča entalpijska razlika tako nenatančna, da bi to znatno zmanjšalo uporabnost poldirektne metode za določitev izkoristka kotla. Da bi se temu izognili, bo treba uporabiti kak drug primernejši način merjenja.

Za primer naj navedemo naslednji postopek. Z eno od ustreznih metod izmerimo temperaturo t_v na vtoku v grelnik vode, ki jo potrebujemo za določitev entalpije h_v. Za določitev temperature t_{vk} pa ne bomo uporabljali prav take merilne metode, temveč bomo določali to temperaturo tako, da bomo izmerili temperaturno razliko:

$$(t_{vk} - t_v)$$

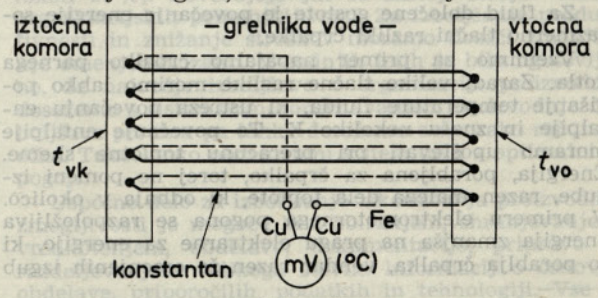
s termoelementom npr.: Fe-konstantan, ki ustreza temu temperaturnemu področju. Za zmanjšanje merilne tolerance tega merjenja npr. na 1/5, vzamemo 5 termoelementov ter jih vežemo zaporedno (slika 3). Po izmerjenju temperaturne razlike $(t_{vk} - t_v)$ določimo potem temperaturo t_{vk} z računom

$$t_{vk} = t_v + (t_{vk} - t_v)$$

Tako ima določena temperatura t_{vk} enakopomensko merilno toleranco, kakršna velja za t_v, vendar povečano za merilno toleranco merjenja temperaturne razlike $(t_{vk} - t_v)$, ki pa je že tako zelo majhna. Z opisanim postopkom smo seveda občutno zmanjšali tudi merilno toleranco določitve $(h_{vk} - h_v)$.

Prav tak postopek je mogoče smiselno uporabljati tudi pri določanju entalpijske razlike $(h_{d_1} - h_{d_2})$. V tem primeru je uporaba nakazanega načina merjenja še toliko pomembnejša, ker omogoča izmerjenje poprečne temperaturne razlike $(t_1 - t_2)$, če so posamezni termoelementi ustrezno razporejeni po prerezu dimnega kanala.

Uporaba opisanega postopka za določitev entalpijske razlike na strani vode in dimnih plinov nam torej omogoča, da občutno zmanjšamo celotno



Slika 3

merilno toleranco poldirektne metode za določitev izkoristka kotlov.

5. SKLEP

Kratko sta podani obe klasični metodi določanja izkoristka parnih kotlov, tj. direktna in indirektna metoda. Analizirane so težave pri uporabi obeh klasičnih metod za določanje izkoristka pri velikih parnih kotlih s kurjavami na premogov prah.

Opisana je nova možnost za ugotovitev količine porabljenega premoga, in sicer s pomočjo toplotnega toka grelnika vode. Tako določena količina porabljenega premoga omogoča uporabo direktne metode za določitev izkoristka tudi pri velikih parnih kotlih s kurjavami na premogov prah. S tem pa smo dobili novo, tako imenovano »poldirektno metodo«, ki omogoča hitro in pregledno določanje izkoristka kotlov, kar je pomembno za uvedbo trajnega nadziranja obratovanja velikih parnih kotlov s kurjavami na premogov prah.

Avtorjev naslov: prof. ing. Leopold Andrée,
Fakulteta za strojništvo
Univerze v Ljubljani

UDK 621.311.162

Energetska ocena nekih turbo strojev

PAVLE GASPARIN

Moč na osi črpalk, ventilatorjev in kompresorjev se porablja pretežno za povečanje energije fluida, manjši del pa za pokrivanje izgub. Velja torej

$$W = W_2 - W_1 + W_z$$

kjer pomenijo

W — delo na osi,
W_1 — energijo vstopnega fluida,
W_2 — energijo izstopnega fluida,
W_z — izgube v okolico.

Moč na osi črpalke lahko izrazimo z

$$P = \frac{q \cdot \Delta p}{\varrho\, \eta_i\, \eta_m} \quad [W]$$

kjer so:

Δp — razlika izstopnega in vstopnega tlaka [Pa]*,
q — masni tok fluida [kg/s],
ϱ — gostota fluida [kg/m³],
η_i — notranji izkoristek črpalke,
η_m — mehanski izkoristek črpalke.

Na fluid se ne prenaša vsa moč na osi črpalke. Energija, ki se ne prenaša na fluid, pomeni izgube, ki odhajajo v okolico neposredno ali s hladilno vodo. V primeru, ko je temperatura fluida višja od temperature okolice, se prenaša del toplotne energije s površine črpalke v okolico. Mehanske izgube upoštevamo z izkoristkom η_m. Toplotne izgube pri dobro izolirani črpalki so razmeroma majhne in jih navadno lahko zanemarimo. Povečanje energije fluida je enako razliki entalpij

$$h_2 - h_1 = \frac{\Delta p}{\varrho\, \eta_i} \quad [J/kg]$$

kjer sta:

h_1 — specifična entalpija izstopnega fluida,
h_2 — specifična entalpija vstopnega fluida.

Za fluid določene gostote je povečanje energije sorazmerno tlačni razliki črpalke.

Vzemimo za primer napajalno črpalko parnega kotla. Zaradi velike tlačne razlike merimo lahko povišanje temperature fluida, ki ustreza povečanju entalpije in znaša nekoliko K. To povečanje entalpije moramo upoštevati pri preračunu toplotne sheme. Energija, porabljena za črpalko, torej ne pomeni izgube, razen malega dela toplote, ki odhaja v okolico. V primeru elektromotornega pogona se razpoložljiva energija zmanjša na pragu elektrarne za energijo, ki jo porablja črpalka, vendar razen že omenjenih izgub črpalke v okolico ni energetskih izgub. V tem smislu je treba korigirati splošno uporabljeni pojem o porabi energije za lastne potrebe elektrarne. Sklenemo lahko, da je s stališča tukaj obravnavane problematike turbinski pogon energetsko boljši od elektromotornega. V praksi ima glavna napajalna črpalka bloka z močjo 200 MW in več pretežno turbinski pogon.

Za drugi primer vzemimo kotlovske ventilatorje. Tukaj gre za majhno povišanje tlaka in veliko maso fluida. Zaradi majhne tlačne razlike vzamemo, da je fluid (plin ali zrak) nestisljiv; uporabljamo lahko iste obrazce kakor za črpalke in zanemarimo tako nastalo majhno napako. Velja torej enak sklep kakor za napajalno črpalko. Vendar je treba omeniti, da merjenje povišanja temperature fluida zaradi majhne tlačne razlike ni mogoče z običajnim termometrom.

Po prehodu skozi primarni ventilator vstopa zrak v kotel z energijo, povečano za energijo, ki smo jo porabili za pogon ventilatorja, zmanjšano za izgubo ventilatorja v okolico. Primarnega ventilatorja, razen izgub v okolico, torej ne bomo upoštevali v izračunu kotlovskih energetskih izgub. Pač pa moramo upoštevati ventilator dimnih plinov, ker ustrezno povečanje energije plina ni koristno in odhaja v dimnik. Iz tega izhaja, da nam je v prid, če povečamo moč primarnega ventilatorja in zmanjšamo moč ventilatorja dimnih plinov. Kurjenje z nadtlakom je torej energetsko boljše od kurjenja s podtlakom.

Podobne ugotovitve veljajo tudi za kotlovske mline. Del energije, porabljene na osi mlina, odhaja z gorivom v kotel in torej ne pomeni energetske izgube. Za realno energetsko oceno parnega kotla bi bilo zanimivo izdelati praktičen postopek za določitev energije, porabljene za drobljenje goriva z ene strani in za povečanje energije goriva z druge strani.

Tipičen primer posode (kotla) pod tlakom je v napravi plinske turbine. Kompresor daje zrak s tlakom okoli 10 bar. Kar se tiče energetske bilance, velja za kompresor isto, kar je bilo rečeno za črpalko in za ventilator. Moč kompresorja izračunamo po znanih obrazcih, ki upoštevajo stisljivost fluida. Energija kompresorja — razen izgub v okolico — se prenaša v krožni proces plinske turbine in ne pomeni izgube. Hlajenje fluida med stopnjami v našem primeru ne prinaša energetske koristi, ker ustrezna količina toplote odhaja s hladilno vodo v okolico. Pač pa ta postopek zmanjšuje moč, potrebno za pogon kompresorja. V praksi povečamo toplotni izkoristek s prenosnikom toplote, kjer grejemo zrak z izpušnimi plini turbine. Prenosnik pomeni dodatne investicije. Stopnjo hlajenja in ponovnega gretja zraka moramo določiti na temelju tehnično-ekonomskega računa.

Avtorjev naslov: prof. Pavle Gasparin, dipl. ing.,
Vrbanska c. 17, 62000 Maribor

* 1 Pa (pascal) = 1 N/m² = 10^{-5} bar.