

UDK 621.186.1

Sevalne oziroma konvektivne izgube in prestrežena toplota pri določanju izkoristka parnega kotla po indirektni metodi

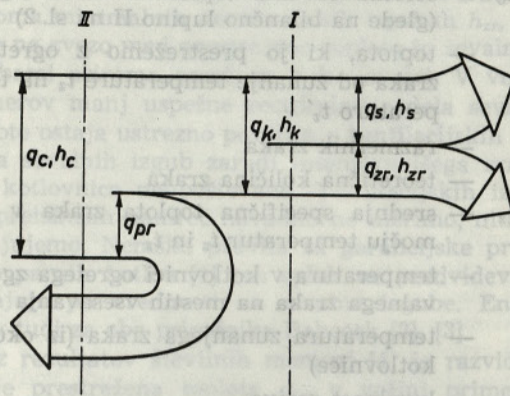
DUŠAN POLJAK

Pri indirektnem določanju izkoristka parnih kotlov je poleg drugih izgub treba upoštevati tudi izgube toplote, ki s sevanjem, prevajanjem in konvekcijo (v nadaljevanju kratko sevalne izgube) uhaja iz kotla v kotlovnico in dalje v okolico. Njihovo neposredno merjenje je težavno in zamudno, zaradi česar jih pri preizkusih upoštevamo na osnovi izkustvenih vrednosti, ki so v odvisnosti od maksimalne zmogljivosti in preizkusne obremenitve kotla podane navadno v obliki diagramov ali tabel. Te so seveda veljavne samo v določenih razmerah (toplotni izolaciji kotla, zračenju kotlovnice, načinu dovajanja zgorevalnega zraka, temperaturi okolice). Dokler so resnične razmere vsaj približno enake predpostavljenim, je razlika med dejanskimi in že omenjenimi diagramskimi oziroma tabelarnimi (v nadaljnjem tabeliranimi) vrednostmi zanemarljiva. Če pa so razmere bistveno drugačne, lahko postanejo te razlike znatne in nič več zanemarljive.

Vsesavanje zgorevalnega zraka nad kotlom oziroma pod stropom kotlovnice, ki je značilno za večino sodobnih konstrukcij večjih parnih kotlov, pa razmere v kotlovnici močno spremeni, ker povzroča recirkulacijo dela toplote, ki prihaja iz kotla v kotlovnico. Z vsesavanjem zraka nad kotlom prestrežemo del te toplote ter jo z najbolj ogretim zrakom pod stropom kotlovnice vračamo v kurišče. S tem zmanjšamo tako imenovano dokončno sevalno izgubo, to je količino toplote, ki je iz kotla prek kotlovnice ušla v zunanjo okolico in je dokončno izgubljena.

Tabela 1. Sevalne in konvektivne izgube

Viri podatkov	Maksimalna trajna obremenitev t/h				
	20	40	80	120	200
Sevalne izgube %					
DIN 1942, sep. 1956 [1]	2	1,2	0,8	0,7	0,5
Priročnik Babcock 1957 [2]	2,2	1,55	1,11	0,92	0,71
Priročnik Babcock 1965 [3]					
črni premog	1,7	1,3	0,98	0,84	0,68
lignit	2	1,45	1,16	0,99	0,81



Sl. 1. Sevalne toplote oziroma izgube glede na bilančni lupini I in II

Nemška pravila za preizkušanje parnih kotlov DIN 1942 [1] navajajo tabelo sevalnih izgub v odvisnosti od maksimalne trajne zmogljivosti kotlov in to od 20 t/h (sevalne izgube 2 %) do 200 t/h (sevalne izgube 0,5 %). Priročnik Babcock [2] iz leta 1957 navaja za enake zmogljivosti kotlov večje, iz leta 1965 [3], ki upošteva tudi vpliv vrste goriva, pa za lignit še večje vrednosti, kar je razvidno iz tabele 1.

Ne glede na to, da sevalne izgube na enak ali podoben način upoštevajo tudi norme drugih držav, sloni pričujoči prispevek na primerjavi z zgoraj omenjenimi nemškimi pravili. To pa zato, ker so se pri nas doslej za garancijske preizkuse uporabljali v glavnem prav ti, razmeroma še najbolj izčrpni predpisi, katere tudi osnutek jugoslovanskih standardov za preizkušanje parnih kotlov, ki je v končni fazi, prevzema skoraj v celoti. Omenjena nemška pravila [1] navajajo tabelo sevalnih izgub z navodilom za njeno uporabo v primerih, ko del toplote, ki prehaja iz kotla v kotlovnico, s smotno namestitvijo ustij za vsesavanje zgorevalnega zraka prestregamo in vračamo v kotel (recirkulacija dela celotne sevalne toplote oziroma izgube). Po tem navodilu je dokončna sevalna izguba h_k enaka razliki med sevalno toploto q_c , oziroma izgubo h_c v omenjeni tabeli in prestreženo toploto q_{pr} (sl. 1) po enačbi (1).

$$q_k = q_c - q_{pr}$$

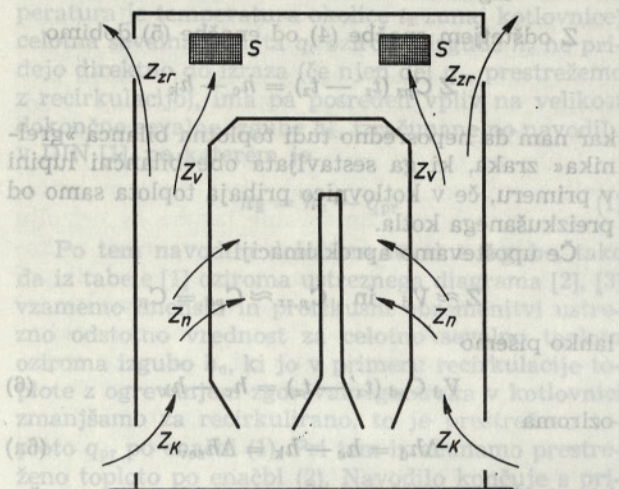
oziroma

$$h_k = h_c - q_{pr} \quad (1)$$

pri čemer je

$$q_{pr} = \frac{100 \lambda \cdot Z_0 \cdot C_{p, \text{sr. z.}} \cdot (t'_z - t_z)}{H_i} \quad (2)$$

- Z — dejanska količina zraka, dovedenega v kurišče
 λ — razmernik zraka v kurišču
 Z_0 — teoretična (minimalna) potrebna količina zraka za zgorevanje
 Z_v — količina zraka, ki jo dobavljajo ventilatorji za zgorevalni zrak
 Z_n — količina zraka, ki prihaja v kotel zaradi netesnosti
 Z_{zr} — količina zraka, ki odhaja iz kotlovnice z zračenjem



Sl. 3. Zračni tokovi k definiciji razmernika zraka λ_k kotlovnice

S — ustja sesalnih cevovodov

Intenzivnejšemu zračenju ustreza večji razmernik zraka kotlovnice in nasprotno. Idealne razmere so pri vrednosti $\lambda_k = 1$.

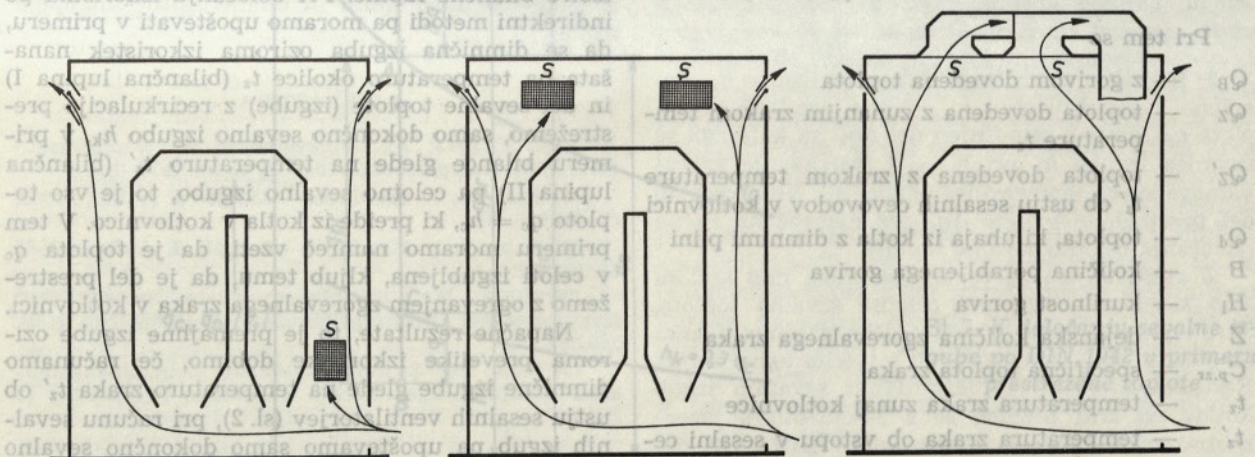
Slike 4, 5 in 6 prikazujejo značilne primere vsesavanja zgorevalnega zraka. Slika 4 kaže primer vsesavanja zraka s temperaturo okolice t_z . Toplota, ki tu s sevanjem prehaja v kotlovnico, uhaja odtoč v celoti tudi v okolico. Slika 5 prikazuje vsesavanje

zgorevalnega zraka s temperaturo t_z' nad kotlom. Izvedba na sliki 6 pa je najboljša rešitev (najmanjši λ_k). Sesalna ustja v stropu kotlovnice zagotavljajo močan tok zraka ob kotlu navzgor in odsesavanja najbolj ogretega zraka, ki se zaradi naravne konvekcije dviga pod strop kotlovnice. Tako prestrežemo največ sevalne toplote pri minimalnem zračenju oziroma minimalnih ventilacijskih izgubah h_{zr} , kar kaže na zvezo med prestreženo toploto in sevalnimi izgubami oziroma ozračjem v kotlovnici. V večini primerov manj uspešne recirkulacije dela sevalne toplote ostaja ustrezno povečanje ventilacijskih oziroma sevalnih izgub zaradi intenzivnejšega zračenja kotlovnice neupoštevano. Ventilacijskih izgub pri preizkusih namreč navadno ne merimo, niti ne ocenjujemo. Nemška pravila za garancijske preizkuse parnih kotlov [1] teh sploh ne predvidevajo, navajajo pa vrednosti za sevalne izgube. Enako velja tudi za oba priročnika Babcock [2], [3].

Iz rezultatov številnih merenj [4] je razvidno, da je prestrežena toplota q_{pr} v večini primerov večja ne samo od $0,3 h_c$, ampak tudi od celotne, v tabelah ali diagramih navedene sevalne izgube h_c , kar je nelogično, saj potemtakem prestrežemo več toplote, kakor jo je prišlo iz kotla ($q_{pr} > h_c$). Za takšne primere so torej predlagane vrednosti sevalnih izgub očitno premajhne. Ker pa se morajo nanašati vse izgube kotla na isto temperaturo, se pojavlja tu zaradi dveh različnih bilančnih lupin še dodatno vprašanje, to je zveza (korespondenca) med celotnimi h_c oziroma dokončnimi sevalnimi izgubami h_k in referenčno temperaturo dimničnih izgub. Doslej omenjena problematika terja za to pri določanju izkoristka kotla po indirektni metodi pojasnila oziroma navodila v zvezi s tremi vprašanji:

1. Kdaj in kako naj upoštevamo pri določanju sevalnih izgub toploto, ki uhaja iz kotlovnice z zračenjem (ventilacijske izgube h_{zr})?

2. Kakšna je zveza med odločilnimi sevalnimi in dimničnimi izgubami pri različnih referenčnih temperaturah izkoristka?



Sl. 4, 5, 6. Značilni primeri vsesavanja zgorevalnega zraka

S — ustja sesalnih cevovodov

3. Kako naj uporabljamo določila DIN [1] za preizkušanje parnih kotlov v primerih prestrežene toplote?

Možno merilo oziroma kriterij v zvezi s prvim vprašanjem za upoštevanje ventilacijskih izgub bi bil omenjeni razmernik zraka λ_k kotlovnice, pri čemer je treba določiti oziroma izmeriti količino in temperaturo zraka, ki uhaja iz kotlovnice z zračenjem. Razmernik zraka kotlovnice, pri katerem naj bi se te izgube upoštevale (če bi prekoračile zanemarljivo vrednost), je odvisna od temperature uhaajočega zraka. Pri garancijskih preizkusih bi se o tem, tudi na osnovi tolerance sevalnih izgub oziroma izkoristka, morala partnerja sporazumeti v primerih, kjer je za vzdrževanje znosnega ozračja v kotlovnici potrebno intenzivnejše zračenje. Avtor tega članka je ob garancijskih preizkusih kotla z maksimalno zmogljivostjo 100 t/h meril izgube zaradi zračenja kotlovnice, ki so znašale 0,7 % z gorivom vložene toplote, kar navaja tudi vodja teh preizkusov Kuhn [5]. Te ventilacijske izgube so torej večje od celotne sevalne izgube po DIN 1942 [1] in zato seveda niso zanemarljive.

Odgovor na drugo vprašanje izhaja iz toplotne bilance glede na dve različni bilančni lupini (sl. 2). Bilanca glede na lupino I nam da izraz

$$Q_B + Q_Z + Q_V = Q_D + \Sigma H + Q_d + h_k$$

oziroma

$$B H_1 + Z C_{p,zr} t_z + D_v i_v = D i_D + \Sigma H + V_d C_{pd} t_d + h_k \quad (4)$$

bilanca glede na lupino II pa

$$Q_B + Q_Z' + Q_V = Q_D + \Sigma H + Q_d + h_c$$

oziroma

$$B H_1 + Z C_{p,zr} t_z' + D_v i_v = D i_D + \Sigma H + V_d C_{pd} t_d + h_c \quad (5)$$

Pri tem so

- Q_B — z gorivom dovedena toplota
- Q_Z — toplota dovedena z zunanjim zrakom temperature t_z
- Q_Z' — toplota dovedena z zrakom temperature t_z' ob ustju sesalnih cevovodov v kotlovnici
- Q_d — toplota, ki uhaja iz kotla z dimnimi plini
- B — količina porabljenega goriva
- H_1 — kurilnost goriva
- Z — dejanska količina zgorevalnega zraka
- $C_{p,zr}$ — specifična toplota zraka
- t_z — temperatura zraka zunaj kotlovnice
- t_z' — temperatura zraka ob vstopu v sesalni cevovod
- D_v — količina napajalne vode

- i_v — entalpija napajalne vode
- V_d — količina dimnih plinov
- C_{pd} — specifična toplota dimnih plinov
- t_d — temperatura dimnih plinov na iztoku iz kotla
- h_k — dokončna sevalna izguba (glede na bilančno lupino I)
- h_c — celotna sevalna izguba (glede na bilančno lupino II)
- ΣH — izgube kotla brez sevalnih in dimničnih izgub

Z odštetjem enačbe (4) od enačbe (5) dobimo

$$Z C_{p,zr} (t_z' - t_z) = h_c - h_k$$

kar nam da neposredno tudi toplotna bilanca »grelnika« zraka, ki ga sestavljata obe bilančni lupini v primeru, če v kotlovnico prihaja toplota samo od preizkušnega kotla.

Če upoštevamo aproksimaciji

$$Z \approx V_d \text{ in } C_{p,zr} \approx C_{pd} = C_p$$

lahko pišemo

$$V_d C_{pd} (t_z' - t_z) = h_c - h_k \quad (6)$$

oziroma

$$\Delta h_d = h_c - h_k = \Delta h_{sev} \quad (6a)$$

kjer je Δh_d zmanjšanje dimnične, Δh_{sev} pa povečanje sevalne izgube, če preidemo od bilančne lupine I na lupino II. Pri tem je sprememba dimnične izgube enaka razliki med celotno h_c in (v primeru recirkulacije dela celotne sevalne izgube) dokončno sevalno izgubo h_k . Ta razlika je recirkulirana toplota q_{pr} , ki jo prestrežemo z ogretjem zgorevalnega zraka od temperature okolice t_z na temperaturo t_z' ob ustju cevovoda sesalnega ventilatorja za zgorevalni zrak.

Rezultat zgornjih izvajanj je logično dejstvo, da izgube oziroma izkoristek kotla niso odvisni od izbire bilančne lupine. Pri določanju izkoristka po indirektni metodi pa moramo upoštevati v primeru, da se dimnična izguba oziroma izkoristek nanašata na temperaturo okolice t_z (bilančna lupina I) in del sevalne toplote (izgube) z recirkulacijo prestrežemo, samo dokončno sevalno izgubo h_k , v primeru bilance glede na temperaturo t_z' (bilančna lupina II) pa celotno sevalno izgubo, to je vso toploto $q_c = h_c$, ki preide iz kotla v kotlovnico. V tem primeru moramo namreč vzeti, da je toplota q_c v celoti izgubljena, kljub temu, da je del prestrežemo z ogrevanjem zgorevalnega zraka v kotlovnici.

Napačne rezultate, to je premajhne izgube oziroma prevelike izkoristke dobimo, če računamo dimnične izgube glede na temperaturo zraka t_z' ob ustju sesalnih ventilatorjev (sl. 2), pri računu sevalnih izgub pa upoštevamo samo dokončno sevalno izgubo h_k , kar se pri izvedbi oziroma izvedenosti garancijskih preizkusov včasih predlaga.

Dejstvo, da se sevalne izgube določajo navadno po izkustvenih vrednostih (po omenjenih tabelah ali diagramih), zaradi česar je toleranca znatna (VDI pravila navajajo $f_{sev} = \pm 50\%$), govori za bilančno lupino I oziroma referenčno temperaturo okolice t_z . Ker je celotna toleranca izgub odvisna tako od velikosti merilne oziroma določevalne tolerance kakor od velikosti izgub samih, je mogoče tako z zmanjšanjem odločilne sevalne izgube ($h_k < h_c$) zmanjšati toleranco sevalnih, s tem pa celotnih izgub in izkoristka. Pri določanju izkoristka glede na bilančno lupino I (referenčna temperatura je temperatura okolice t_z zunaj kotlovnice) celotna sevalna toplota q_c oziroma izgube h_c ne pridejo direktno do izraza (če njen del q_{pr} prestrežemo z recirkulacijo), ima pa posreden vpliv na velikost dokončne sevalne izgube h_k , izračunane po navodilu v DIN [1], po katerem je

$$h_k = h_c - q_{pr} \quad (1)$$

Po tem navodilu določimo sevalne izgube, tako da iz tabele [1] oziroma ustreznega diagrama [2], [3] vzamemo imenski in preizkusni obremenitvi ustrezno odstotno vrednost za celotno sevalno toploto oziroma izgubo h_c , ki jo v primeru recirkulacije toplote z ogrevanjem zgorevalnega zraka v kotlovnici zmanjšamo za recirkulirano, to je prestreženo toploto q_{pr} po enačbi (1). Pri tem izračunamo prestreženo toploto po enačbi (2). Navodilo končuje s pripombo, da je treba za sevalne izgube vzeti 30 % tabeliranih vrednosti, če dobimo po enačbi (1) za dokončno sevalno izgubo manj kakor 30 % v tabeli navedenih vrednosti, iz česar izhaja za sevalne izgube v primeru recirkulacije toplote omejitvev $h_k \geq 0,3 h_c$.

Meritve prestrežene toplote [4] na sodobnih kotlih z vsesavanjem zgorevalnega zraka nad kotlom kažejo, da je z ogretjem zgorevalnega zraka po enačbi (2) izračunana prestrežena toplota celo

večja od tabelirane vrednosti celotne sevalne izgube h_c , kar je — kakor je bilo že rečeno — nelogično, saj prestrežemo več toplote, kakor jo iz kotla uhaja. Posledica tega bi bila po enačbi (1) izračunana končna sevalna izguba h_k negativna. Očitno so za takšne primere v tabelah in diagramih navedene vrednosti za celotno sevalno toploto q_c oziroma izgubo h_c premajhne, kar izhaja iz analize po sliki 7.

Iz te je razvidno, da pomeni uporaba končne pripombe v DIN 1942 [1] za primer, če dobimo po enačbi (1) manj od 30 % tabeliranih vrednosti, pravzaprav povečanje celotne sevalne toplote q_c oziroma izgube h_c . Saj pridemo do enakega rezultata, to je dokončne sevalne izgube h_k (točka C) po direktni poti A—C, če vzamemo kar 0,3 celotne sevalne toplote ($h_k = 0,3 q_c$), ali po indirektni poti A—D—C, če povečamo najprej tabelirano vrednost $q_c = h_c$ za $\Delta q = q_{pr} - 0,7 q_c$ ter dobimo tako povečano celotno sevalno toploto q_c' (točka D)

$$q_c' = q_c + \Delta q = q_{pr} + 0,3 q_c \quad (7)$$

Od te odštejemo prestreženo toploto q_{pr} (točka C) in dobimo

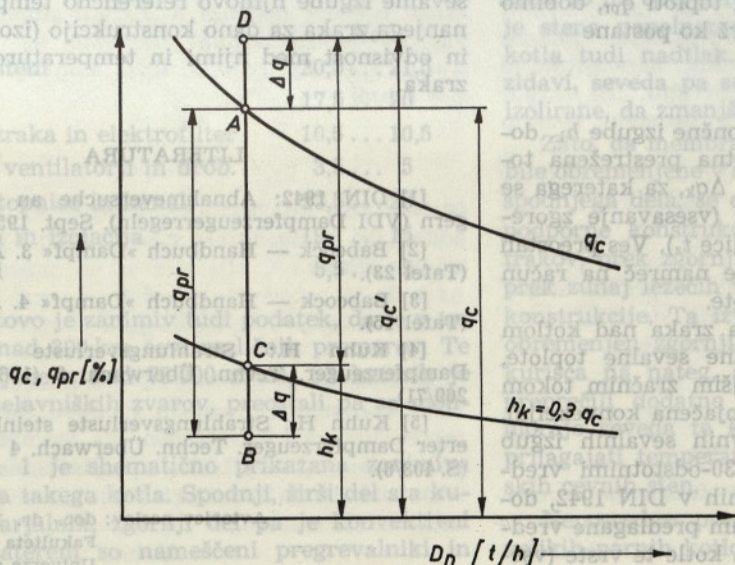
$$h_k = q_c' - q_{pr} = 0,3 q_c$$

Obe poti končata v točki C.

Gornji postopek, ki ga predpisuje DIN 1942 [1] in je razviden na sliki 8, pomeni torej povečanje DIN 1942 [1] navedenih sevalnih izgub.

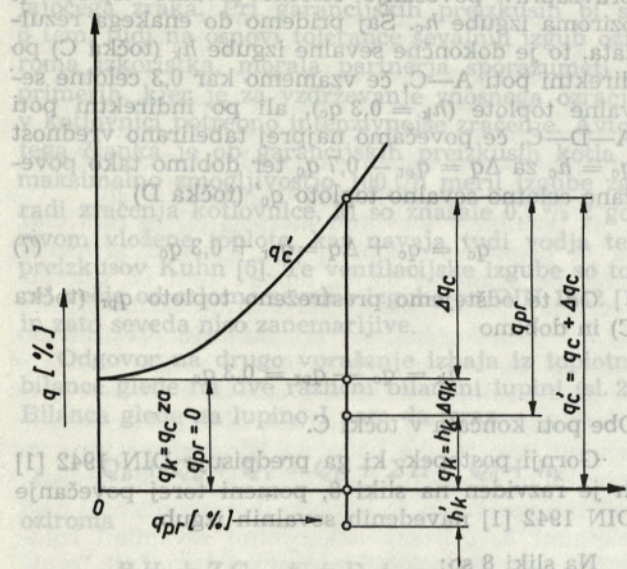
Na sliki 8 so:

$q_k = q_c, h_c$ — sevalna toplota oziroma izguba v primeru, če ima zgorevalni zrak ob vstopu v grelnik temperaturo okolice t_z ($q_{pr} = 0$ oziroma $q_k = q_c$)
 q_{pr} — prestrežena toplota



Sl. 7. K določanju sevalne izgube po DIN 1942 v primeru prestrežene toplote

- Δq_o — povečanje celotne sevalne toplote zaradi recirkulacije prestrežene toplote
- Δq_k — zmanjšanje končne sevalne izgube zaradi prestrežene toplote q_{pr} v primerjavi s kotli, ki vsesavajo zgorevalni zrak s temperaturo okolice t_z
- q_k, h_k — dokončna sevalna toplota oziroma izguba
- $q_c' = q_c + \Delta q_c$ — celotna (povečana) sevalna toplota pri prestreženi toploti q_{pr}



Sl. 8. Sevalna toplota oziroma izguba v odvisnosti od prestrežene (recirkulirane) toplote

Na sliki 8 je nazorno razvidno naslednje:

1. Če pri določanju dokončne sevalne izgube h_k po enačbah (1) in (2) ne upoštevamo povečanja celotne sevalne toplote q_c' oziroma izgube h_k za vrednost Δq_c , ki ustreza prestreženi toploti q_{pr} , dobimo negativno sevalno izgubo h_k' , brž ko postane

$$q_{pr} > q_c$$

2. Resnično zmanjšanje dokončne izgube h_k , doseženo z recirkulacijo, ni celotna prestrežena toplota q_{pr} , ampak samo njen del Δq_k , za katerega se zmanjša izguba h_k pri $q_{pr} = 0$ (vsesavanje zgorevalnega zraka temperature okolice t_z). Ves preostali del prestrežene toplote Δq_c gre namreč na račun povečanja celotne sevalne toplote.

Z vsesavanjem zgorevalnega zraka nad kotlom smo sicer prestregli del celotne sevalne toplote, hkrati pa smo to z intenzivnejšim zračnim tokom ob stenah kotla tudi povečali (ojačena konvekcija). Rezultati meritev [4] definitivnih sevalnih izgub kotlov na črni premog se s 30-odstotnimi vrednostmi celotnih izgub, tabeliranih v DIN 1942, dokaj dobro ujemajo, čeprav so tam predlagane vrednosti celotnih sevalnih izgub za kotle te vrste (vse-

savanje zgorevalnega zraka s temperaturo t_z' nad kotlom) premajhne. Tak, sicer nepričakovan rezultat je v skladu z analizo na sliki 8. Kotli na rjavi premog, lignit, olje ali plin pa imajo drugačne površine in drugačne količine dimnih plinov. Zato je veljavnost tam navedenih vrednosti za sevalne izgube in upravičenost uporabe zgornjega postopka za določanje dokončne sevalne izgube vprašljiva.

Določanje sevalnih izgub po nemških navodilih [1], je treba torej v tem smislu preveriti z meritvami in za omenjena goriva ustrezno korigirati oziroma modificirati. Ker so površine kotlov na rjavi premog znatno večje od onih na črni premog, je najbrž tudi celotna toplota (izguba) večja. Po neobjavljenih virih je treba računati pri rjavih premogih oziroma lignitih z 1,6-krat večjimi vrednostmi, kakor so v tabeli DIN 1942 [1]. Nasprotno pa lahko na osnovi omenjene predpostavke o različnih površinah in količinah dimnih plinov pričakujemo manjše končne sevalne izgube h_k pri olju in zemeljskem plinu. Orientacijske vrednosti za korekcijo te vrste lahko dajo le neposredne ali posredne meritve končne oziroma celotne sevalne izgube takih parnih kotlov. Pri tem moramo upoštevati odvisnost sevalnih izgub od zunanjega zraka, kar narekuje omejitev veljavnosti podatkov za sevalne izgube s temperaturo zunanjega zraka (praviloma referenčna temperatura izkoristka) oziroma ustrezen korekcijski postopek.

Meritve [5], po katerih je odvisnost med temperaturo zunanjega zraka in končno sevalno izgubo h_k približno linearna, kažejo približno 5-kratno povečanje končne sevalne izgube, če se temperatura okolice t_z zniža od $+40$ na -30 °C, kar seveda pomeni — lahko rečemo — skrajni meji. Ne glede na razmeroma majhno vrednost sevalnih izgub pri normalno izoliranih kotlih bi bilo treba zaradi teženj po zmanjšanju tolerance indirektno dobljenega izkoristka kotla dodati tabelam ali diagramom za sevalne izgube njihovo referenčno temperaturo zunanjega zraka za dano konstrukcijo (izolacijo) kotla in odvisnost med njimi in temperaturo zunanjega zraka.

LITERATURA

- [1] DIN 1942: Abnahmeversuche an Dampferzeugern (VDI Dampferzeugerregeln). Sept. 1957 (S. 7).
- [2] Babcock — Handbuch »Dampf« 3. Auflage 1952, (Tafel 23).
- [3] Babcock — Handbuch »Dampf« 4. Auflage 1965 (Tafel 15).
- [4] Kuhn H.: Strahlungsverluste neuzeitlicher Dampferzeuger. Techn. Überwach. 3 (1962) Nr. 7 (S. 269/71).
- [5] Kuhn H.: Strahlungsverluste steinkohlengefeuerter Dampferzeuger. Techn. Überwach. 4 (1963) Nr. 11 (S. 403/6).

Avtorjev naslov: doc. dr. Dušan Poljak,
Fakulteta za strojništvo
Univerze v Ljubljani