

vrlo složen i kad se provodi eksperimentalno i kad se proračunava na elektroničkom računalu.

Kad se, međutim, žele samo grubo svrstati uređaji u nekoliko grupa radi usporedbe kvalitete, moguće je primijeniti približni postupak. Uz današnje stanje razvoja tehnologije poznata je donja i gornja granica svakog od parametara uređaja koji se uzimaju u obzir pri ometanju. Svaki se parametar budi brojem  $B$  od 0...100. Budući da parametri različito utječu na broj ometanih kanala, treba bodove svakog parametra vrednovati pomoću koeficijenata vrijednosti  $a$ . Ukupan broj bodova za prijemnik ( $B_p$ ), za odašiljač ( $B_o$ ) i cijeli sustav ( $B$ ) određuje se iz izraza:

$$B_p = a_{SS} B_{SS} + a_{NO} B_{NO} + a_{PIM} B_{PIM}, \quad (113)$$

$$B_o = a_{SN} B_{SN} + a_{NZ} B_{NZ} + a_{OIM} B_{OIM}, \quad (114)$$

$$B = a_p B_p + a_o B_o, \quad (115)$$

dok je

$$a_{SS} + a_{NO} + a_{PIM} = 1, \quad (116)$$

$$a_{SN} + a_{NZ} + a_{OIM} = 1, \quad (117)$$

$$a_p + a_o = 1, \quad (118)$$

gdje je  $B$  s pripadnim indeksom parametra broj bodova za prijemnik, odnosno odašiljač, a  $a$  koeficijent vrijednosti za pojedini parametar. Iz podataka na sl. 37 vidi se, bez obzira da li se radi o lošem ili dobrom uređaju, da su koeficijenti vrijednosti

$$a_{SS} = 0,3, \quad a_{NO} = 0,1, \quad a_{PIM} = 0,6.$$

Analogno se mogu odrediti i ostali koeficijenti vrijednosti.

Tako određeni broj bodova omogućuje određivanje redoslijeda uređaja s obzirom na elektroenergetsku kompatibilnost.

LIT.: W. C. Hart, E. W. Malone, Lightning and Lightning Protection. Encyclopedia Series, Vol. IV, Don White Consultants, Inc., Gainesville 1979. — J. R. Herman, Electromagnetic Ambients and Man-made Noise. Don White Consultants, Inc., Gainesville 1979. — D. R. J. White, Electromagnetic Shielding Materials and Performance. Don White Consultants, Inc., Gainesville 1979. — D. M. Jansky, Spectrum Management Techniques. Don White Consultants, Inc., Gainesville 1980. — D. R. J. White, EMI Control in the Design of Printed Circuit Boards and Backplanes. Don White Consultants, Inc., Gainesville 1980. — R. V. Carstensen, EMI Control in Boats and Ships. Don White Consultants, Inc., Gainesville 1981. — B. E. Keiser, EMI Control in Aerospace Systems. Don White Consultants, Inc., Gainesville 1981. — E. R. Freeman, Interference Suppression Techniques for Microwave Antennas and Transmitters. Artech House, Inc., 1982. — M. F. Gord, Electromagnetic Interference Control in Medical Electronics. Don White Consultants, Inc., Gainesville 1982. — H. M. Schlicke, Electromagnetic Compossibility. Marcel Dekker AG Verlag, Basel 1982. — M. Mardiguan, Interference Control in Computers and Microprocessor-based Equipment. Don White Consultants, Inc., Gainesville 1984.

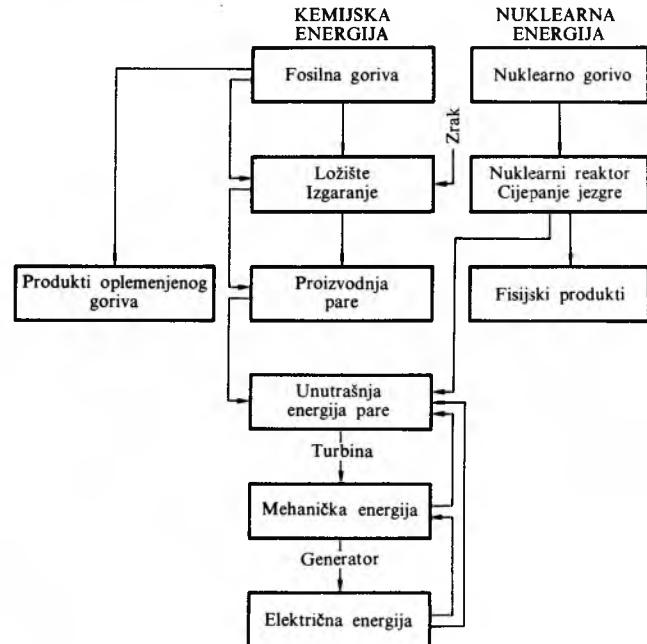
E. Zentner

**PARNI KOTAO (GENERATOR PARE)**, dio energetskog, industrijskog ili toplinskog postrojenja u kojemu se toplina oslobođena izgaranjem goriva predaje vodi te je pretvara u vodenu paru koja na izlazu iz parnog kotla ima određeni tlak i temperaturu. Riječ je, dakle, o izmjenjivaču topline koji je u početku razviti bio grijana posuda djelomično napunjena vodom, pa odatle potječe naziv *parni kotao*. Danas se sve više upotrebljava ispravniji naziv: *generator pare*.

Problemi i zadaci parnog kotla u sklopu energetskih, industrijskih i toplinskih postrojenja čine potpuno određeno i odvojeno područje. Još uvjek ne postoje sve potrebne i provjene teorijske osnove na području strujanja, prolaza topline, čvrstoće specijalnih materijala, poznavanja goriva itd., pa se parni kotlovi grade na temelju mnogih iskustvenih podataka. Zbog toga su se razvili brojni tipovi različitih parnih kotlova, različitih učina (kapaciteta) i različitih karakteristika pare (parametara pare).

Brzi razvoj parnog kotla posljednjih desetljeća dao je mnoga rješenja koja nisu do kraja ispitana. Ta rješenja stvaraju niz novih pitanja na području prolaza topline, strujanja itd.

Povećane potrebe za električnom energijom i težnje za što ekonomičnijim energetskim postrojenjem uvjetuju gradnju parnog kotla većih i velikih učina s istodobnim povećanjem karakteristika proizvedene vodene pare. U osnovnoj shemi (sl. 1) vidi se koje mjesto zauzima parni kotao pri pretvorbi energije goriva u električnu energiju.



Sl. 1. Prikaz pretvorbe energije goriva u električnu energiju

Osnovne karakteristike parnog kotla dane su sa tri glavna parametra koji se pokušavaju normirati, odnosno ukloniti u određene granice. Ti su parametri: učin (kapacitet)  $D$  parnog kotla, tlak  $p$  u parnom kotlu i temperatura pregrijane pare  $t_{pr}$ . Osim tih veličina bitna je karakteristika korisnost parnog kotla  $\eta_{gp}$ .

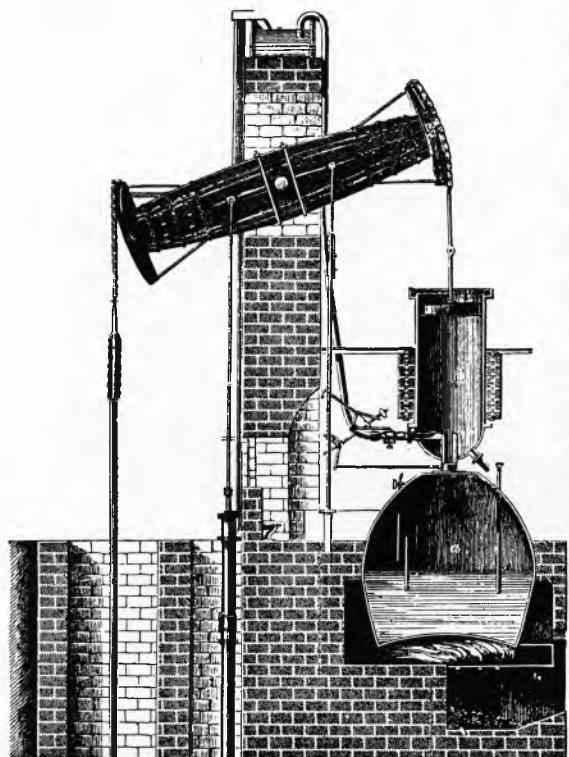
Pisani radovi Herona iz Aleksandrije (oko → 150. god.) pokazuju da su ljudi već u starom vijeku iskoristavali vodenu paru da pokreće mehaničke igračke i slične male naprave, kao što je npr. bila Heronova kugla. Upotrebljavala se zasićena niskotlačna para proizvedena u običnim zatvorenim posudama, koje se, dakle, mogu smatrati pretečama parnog kotla.

Tokom čitavog srednjeg vijeka nitko se nije bavio parom kao radnim medijem, pa su se tek za vrijeme renesanse ponovo pokušali pronaći na koje bi se ekspanzijom pare obavljao koristan rad. Talijanski graditelj G. Branca (1571–1640) opisao je malu apotekarsku miješalnicu pogonjenu parom; francuski arhitekt Salomon de Claus (1576–1626) radio je na razvoju orgulja na paru; u Engleskoj se Edward Somerset, markiz od Worcester-a (1601–1667), među ostalim pronalascima, bavio i nekom vrstom jednostavnog parnog stroja itd., ali svi su se ti prijedlozi i pronalasci zasnovali na niskotlačnoj pari proizvedenoj u običnim tlačnim posudama i nisu imali zapaženijega praktičnog uspjeha.

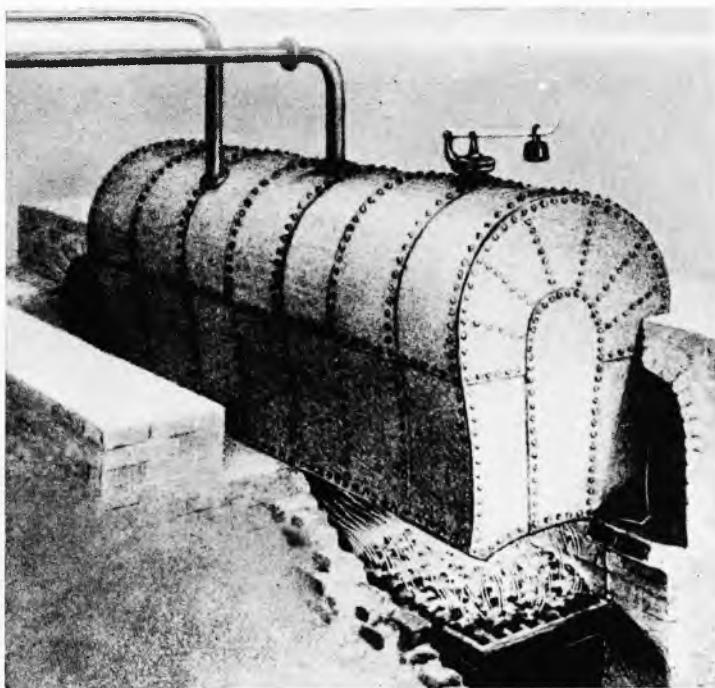
Francuski fizičar D. Papin (1647–1714) prvi je konstruirao veću tlačnu posudu, sličnu parnom kotlu, koja je proizvodila paru nešto višeg tlaka, a bila je dio Papinova parnog stroja namijenjenog za pogon broda. Iako je imao sigurnosni ventil, taj je kotao pri ispitivanju eksplodirao, pa je Papin napustio dalji rad na razvoju parnih postrojenja. U isto je vrijeme u Engleskoj mehaničar T. Savery (1650–1715) sagradio rudničku pumpu na pogon parom proizvedenom u jednostavnom parnom kotlu. Savaryjeva pumpa imala je dostu nedostatak, pa ju je usavršio T. Newcomen (1663–1729), a za proizvodnju pere izgradio je kotao s rešetkom (sl. 2).

Prvi pravi parni kotao konstruirao je 1769. god. engleski inženjer J. Watt (1736–1819). Za razliku od ranijih tlačnih posuda i parnih kotlova koji su bili neprikladna oblika i građeni od neprikladnih materijala, s parnim cilindrom postavljenim neposredno na kotao, Watt je svoj parni kotao napravio od kovanog željeza sa željeznom plamenom cijevi i potpuno ga odijelio od parnog stroja (sl. 3). Prvi Wattov parni kotao proizvodio je paru tlaka od ~0,035 MPa, koja je služila za pogon parnog stroja.

S razvojem parnih strojeva razvijali su se i parni kotlovi, pa su prvi godina XIX st. već proizvodili paru tlaka do 0,175 MPa. U Engleskoj je 1800. god. graditelj lokomotive R. Trevithick (1771–1833) konstruirao vrlo ekonomičan visokotlačni plamenocijevni kotao, a 1804. god. Amerikanac J. Stevens (1749–1838) izumio je vodocijevni kotao s tankim cijevima koje su jednim krajem bile spojene sa spremnikom vode. Oko 1820. god. pojavio se



Sl. 2. Newcomenov parni stroj



Sl. 3. Parni kotao J. Watta (1769. god.)

u Engleskoj cilindrični kotao s plamenom cijevi (sl. 4). Taj se kotao kroz sljedećih pedesetak godina stalno razvijao, povećavajući broj plamenih cijevi, da bi potkraj XIX st. postao najrašireniji tip horizontalnog plamenocijevnog kotla. Prvi sekcijski vodocijevni kotao s potpuno određenom cirkulacijom patentirao je 1825. god. J. Eve. Prvi vodocijevni kotao s kosim cijevima konstruirao je 1856. god. američki inženjer S. Wilcox, a 1877. god. izgradili su G. Babcock i S. Wilcox prvi sekcijski vodocijevni kotao s kosim cijevima. Tako su potkraj XIX st. već postojali brojni tipovi plamenocijevnih, vodocijevnih i kombiniranih parnih kotlova; konstruirana su i ložista za tekuća goriva i ugljen pršinu, ali se kao goriva ipak još uvek najviše upotrebljavao ugljen s ručnim loženjem na nepomičnu rešetku. Sve su to uglavnom bili parni kotlovi s velikim sadržajem vode, a proizvodili su paru do  $\sim 1,5$  MPa tlaka i do  $250^{\circ}\text{C}$  temperature. Za veće učine gradili su se nizovi ili baterije parnih kotlova.

U razdoblju 1900—1925. razvili su se sekcijski i strmocijevni kotlovi, pretežno na čvrsto gorivo koje je izgaralo u sloju na mehanički pokretanoj rešetki. Ti su kotlovi proizvodili paru tlaka do  $\sim 4$  MPa i temperature pregrijanja do  $450^{\circ}\text{C}$ .

U sljedećoj etapi razvoja parnih kotlova od 1925. do 1950. god. uvedeno je, osim izgaranja čvrstih goriva u sloju, i izgaranje ugljene pršine u prostoru što je smanjilo volumensko opterećenje ložista. Tlak proizvedene pare porastao je do 12,5 MPa, a temperatura pregrijane pare do  $525^{\circ}\text{C}$ .

Nakon 1950. god. grade se veliki parni kotlovi u bloku, tj. parni kotao i turbina čine jednu pogonsku jedinicu. Tlakovi pare penju se iznad  $22,1$  MPa, a temperatura pregrijane pare iznad  $525^{\circ}\text{C}$ .

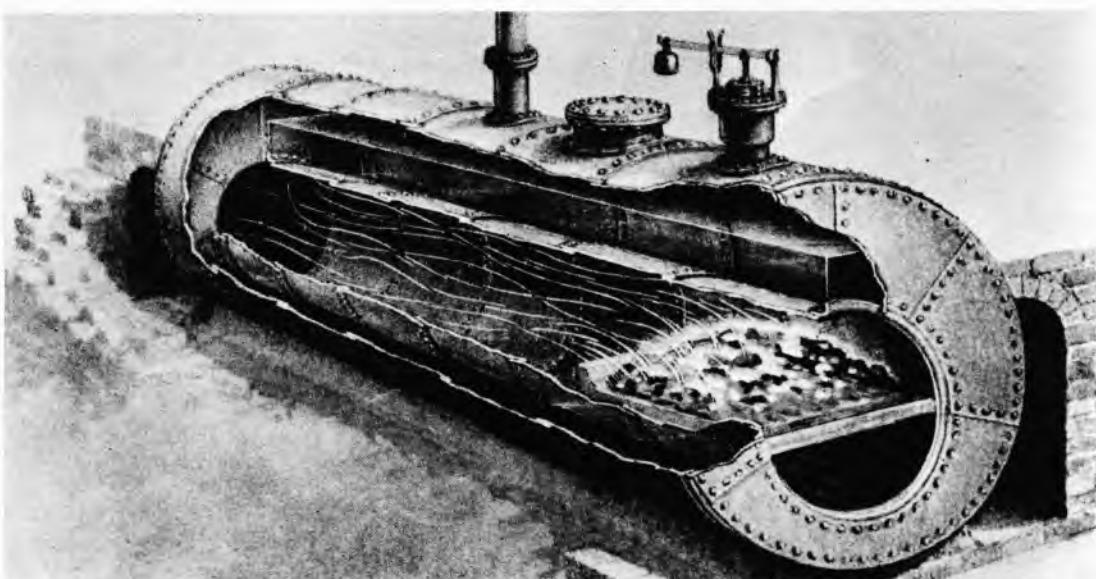
Potpuno nova etapa u razvoju parnog kotla počinje s primjenom nuklearnih reaktora u nuklearnim elektranama i u brodskim pogonskim postrojenjima. Više se ne može govoriti o klasičnom parnom kotlu ili generatoru pare, jer je parni kotao postao samo izmjenjivač topline na koji se posredno prenosi toplina dobivena u reaktoru. Nuklearni reaktor sa sustavom izmjenjivača topline dolazi namjesto klasičnog oblika parnog kotla i čini primarni krug nuklearne elektrane ili nuklearnog brodskog pogonskog postrojenja, dok ostali dio nuklearnih termopostrojenja, kao turbina, cjevovodi i ostalo, ostaje u osnovi nepromijenjen.

Razvoj parnih kotlova u posljednjih 60 godina prikazan je razvojem osnovnih parametara na sl. 5. Treba naglasiti da taj razvoj još nije dovršen.

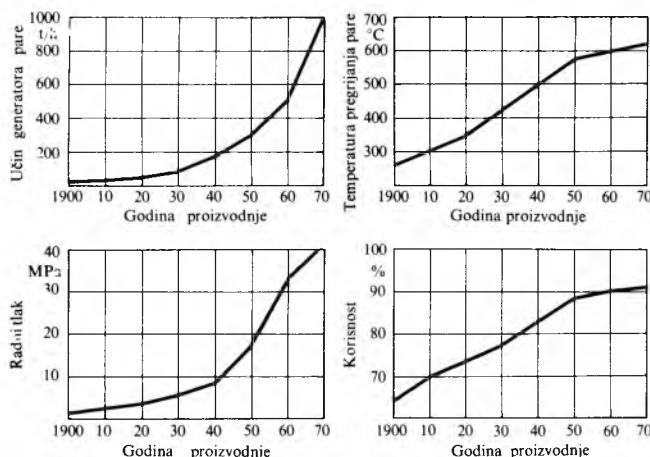
**Standardizacija parametara parnog kotla.** Osnovna standardizacija obuhvaća standarde o tlaku i učinu parnog kotla, te o temperaturi pregrijane pare.

*Tlak parnog kotla*, izražen u paskalima ili barima, definiran je s nekoliko veličina:

*Dopušteni koncesijski tlak*  $p_d$  najviši je tlak pri kojemu je dopušteno da parni kotao radi. Kad u kotlu tlak postane



Sl. 4. Cilindrični kotao s plamenom cijevi (~1820. god.)



Sl. 5. Razvoj parnih kotlova prema osnovnim parametrima

veći od toga tlaka, djeluje sigurnosni ventil, odnosno sigurnosni ventil automatski se otvara kad je dopušteni tlak prekoračen. Dopolušteni tlak je osnova za proračun čvrstoće stijenki cijevi, komora, bubenja itd.

*Radni, pogonski ili nazivni tlak* (tlak u bubenju)  $p_r$ , najčešće je 5% manji od dopuštenog tlaka, pa se pri manjim oscilacijama radnog tlaka ne otvara sigurnosni ventil. Radni je tlak osnova za proračun cjevovoda izvan parnog kotla u sklopu termoenergetskog postrojenja.

*Izlazni tlak*  $p_i$  iz pregrijivača pare jednak je radnom (pogonskom) tlaku umanjenom za iznos pada tlaka zbog trenja u sustavu pregrijivača pare i spojnog cjevovoda u sklopu parnog kotla. Izlazni tlak je najčešće 10–15% manji od dopuštenog tlaka.

Ostali karakteristični tlakovi parnog kotla jesu: pokusni tlak  $p_p$ , tlak napojne vode  $p_v$ , tlak dimnih plinova  $p_{pl}$  i tlak zraka na ulazu u ložište  $p_L$ .

*Temperatura pregrijanja pare*  $t_{pr}$  prema standardu počinje sa  $150^\circ\text{C}$  i povećava se po  $25^\circ\text{C}$ . Današnja granica temperature pregrijanja iznosi  $540^\circ\text{C}$ , a izuzetno  $675^\circ\text{C}$ . Ograničena je čvrstoćom i sastavom materijala za gradnju pregrijivača pare. Temperatura pregrijanja pare mjeri se na izlazu iz pregrijivača i odnosi se, prema propisima, na maksimalni trajni učin parnog kotla. Ako nisu određeni posebni uvjeti, temperatura pregrijanja mora biti ostvarena i pri normalnom učinu parnog kotla.

*Učin parnog kotla* (kapacitet, proizvodnja), izražen u  $\text{kg/s}$  ili  $\text{kg/h}$ , definiraju sljedeće karakteristične veličine: *normalni učin*  $D_N$ , koji služi kao osnova za projektiranje cijelog postrojenja, i *maksimalni trajni učin*  $D_{max}$ , koji služi projektantu za proračun ogrjevnih i ostalih dijelova kotla, te određuje granice garantiranog učina. Nadalje su karakteristični i *maksimalni učin u 30 minuta*  $D_{max,30}$  i *tehnički minimalni učin*  $D_{min}$ . Kao karakteristična veličina većih parnih kotlova upotrebljava se *maksimalni trenutni učin*, koji je za  $\sim 10\%$  veći od maksimalnog trajnog učina, ali s dopuštenim trajanjem samo 30 minuta.

**Osnovna razdioba parnih kotlova.** Činioci koji uvjetuju različnost u konstrukciji i tipu parnih kotlova jesu: učin parnog kotla, temperatura pregrijanja pare, zahtjevi prostornog smještaja kotla, zahtjevi higijensko-tehničkih propisa (čišćenje dimnih plinova), zahtjevi regulacije i automatike parnog kotla, zahtjevi zaštite okoliša, te eventualno neki posebni zahtjevi.

Parni kotlovi mogu se razvrstati na određene tipove prema namjeni, prema optoku ili cirkulaciji vode i pare (otpocni ciklus u parnom kotlu), te prema konstrukciji ložišta, tj. načinu izgaraanja goriva.

Prema namjeni razlikuju se *stabilni parni kotlovi* i *brodske parne kotlove*. Veliki brodske parni kotlovi moraju zadovoljiti mnoge specifične pogonske uvjete, pa se razlikuju od velikih stabilnih parnih kotlova (v. *Brod, pogonska postrojenja*, TE 2, str. 329).

Prema ciklusu strujanja voda-pare, odnosno cirkulaciji vode i pare, parni kotlovi mogu se razvrstati na tri osnovne skupine.

U prvoj su skupini *parni kotlovi s prirodnim optokom (cirkulacijom) vode*. Vodena i parna faza odvajaju se u isparivaču, u spojnim cjevovodima i u bubenju kotla. U drugoj su skupini *parni kotlovi s prisilnim optokom vode*, pomoću cirkulacijske pumpe ugrađene između bubenja i isparivača. Taj tip parnog kotla poznat je pod imenom kotao La Mont. U trećoj su skupini *parni kotlovi bez bubenja* s prisilnim protjecanjem vode i pare uz isparivačke ogrjevne površine. U tu skupinu spadaju parni kotlovi tipa Benson, Sulzer, Ramzin i još neki drugi.

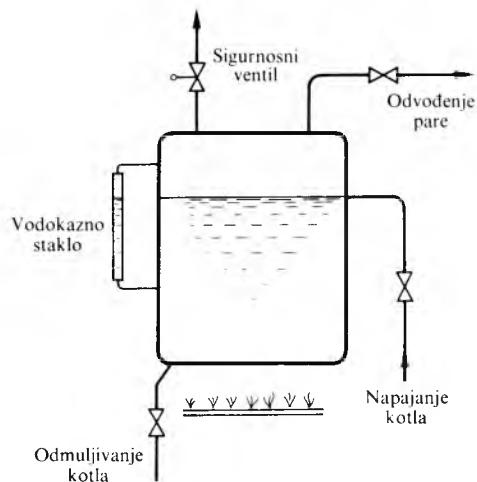
Prema izvedbi ložišta, odnosno prema vrsti i načinu izgaranja goriva, mogu se parni kotlovi razvrstati na sljedeće osnovne tipove: a) kotao s ložištem za izgaranje čvrstih goriva na različitim vrstama nepomičnih rešetki ili manjih rešetki na mehanički pogon; b) kotao s ložištem za izgaranje čvrstih goriva u sloju s mehaničkom putujućom rešetkom i s raspodjelom zraka za izgaranje po pojedinim dijelovima rešetke, ili sa stepenastom rešetkom i reguliranim dovodom zraka po pojedini redovima rešetke; c) kotao s ložištem za izgaranje industrijskih i gradskih otpadaka, s različitim vrstama rešetki (taj se tip ložišta razvij u posljednje vrijeme radi spaljivanja vrlo velikih količina otpadaka u industrijskim i gradskim središtima); d) kotao s ložištem za izgaranje čvrstih goriva u prostoru, odnosno s ložištem za izgaranje ugljene prašine; e) kotao s ložištem za izgaranje tekućih goriva, s mnogo različitih tipova gorionika; f) kotao s ložištem za izgaranje plinovitih goriva, s različitim tipovima gorionika; g) kotao s ložištem za istodobno izgaranje više vrsta goriva, s odvojenim gorionicima za svaku vrstu goriva i kombiniranim gorionicima za više vrsta goriva (plinski, uljni gorionici); h) kotao s ložištem za iskorištanje otpadne topline, npr. topline plinova iz visokih peći, konvertora itd.

Navedena razdioba parnih kotlova na određene tipove nije jedina i nije konačna, jer bi se razdioba mogla učiniti i prema mnogim drugim činiocima koji uvjetuju razlike izvedbe parnih kotlova.

#### OSNOVNI SKLOPOVI PARNOG KOTLA

Principijelna shema parnog kotla prikazana je na sl. 6. Para proizvedena u kotlu odvodi se do potrošača, npr. u parnu turbinu, preko odvodnog ventila. Dovodni uređaj na turbinu pruža otpor strujanju pare i tako se podsjeća da kroz njega struji potrebna količina pare koja je primjerena snazi što je razvija parna turbina. Tlak pare održat će se na konstantnoj vrijednosti samo ako je proizvodnja pare u kotlu upravo jednaka količini pare koja iz njega izlazi. Pri povećanju potrošnji pare tlak će u kotlu postati manji. Da bi tlak ponovno porastao, treba povećati isparivanje u kotlu, a to je moguće samo ako se poveća dovođenje topline, odnosno dovod goriva.

Isparivanjem i odvođenjem pare smanjuje se količina vode u kotlu, pa se mora povremeno ili konstantno kotao napajati novom vodom. Napajanje se regulira tako da se razina vode



Sl. 6. Osnovna shema parnog kotla

u kotlu održava u određenim granicama. Razina se vode u kotlu nadzire pomoću vodokaznog stakla koje djeluje na principu spojenih posuda. Cijev za napajanje dovodi vodu u kotao ili u razini ili iznad razine vode, da bi se spriječilo njezino otjecanje iz kotla ako zakaže sustav za napajanje. Ako bi, naime, kotao ostao bez vode, oštitele bi se njegove stijenke zbog njihova porasta temperature, jer ih više ne hladi voda. S istom svrhom u dovod za napajanje kotla ugrađuje se povratni ventil koji sprečava istjecanje vode iz kotla.

Osim toga, potrebna su još dva sigurnosna uređaja. Sigurnosni ventil služi za ispuštanje pare iz kotla u okoliš ako tlak premaši dopuštenu granicu. Taj ventil mora biti tako dimenzioniran da može propustiti i maksimalnu količinu pare što ju može proizvesti kotao. Na dnu kotla postavlja se ventil za odmuljivanje, jer voda u kotao donosi nečistoće, najčešće soli otopljene u vodi, koje se skupljaju na dnu jer ih para ne nosi sa sobom. Taj se ventil povremeno otvara da se ispušti sakupljeni mulj kako bi gustoća vode u kotlu ostala u dopuštenim granicama.

U parnim se kotlovima razlikuju četiri vrste ogrjevnih površina: ogrjevna površina isparivanja, pregrijач pare, zagrijaće vode i zagrijaće zraka. Ogrjevna površina isparivanja nalazi se u području najviših temperatura plinova izgaranja. Pregrijaće pare smješten je neposredno uz ogrjevne površine isparivanja, pa se para pregrijava plinovima izgaranja koji su već dio topline predali vodi preko ogrjevne površine isparivanja. Već djelomično ohlađeni plinovi dodiruju se s ogrjevnim površinama zagrijaće vode u kojemu se voda zagrijava prije ulaska u prostor isparivanja. Konačno, plinovi izgaranja prolaze kroz zagrijaće zraka u kojemu se prije ulaska u ložište zagrijava zrak potreban za izgaranje goriva.

Prema tome, parni se kotao sastoji od sljedećih triju osnovnih skupina dijelova i opreme: a) ložišta, tj. prostora za izgaranje goriva s potrebnom opremom za pretvorbu kemijske energije goriva u unutrašnju energiju dimnih plinova; b) sklopova izmjenjivača topline, odnosno ogrjevne površine na kojima se unutrašnja energija dimnih plinova prenosi na vodu i vodenu paru (zagrijaće vode, isparivači vode, pregrijaći pare i zagrijaći zraka); c) pomoćnih uređaja koji čine sklop strojeva i opreme potrebnih za proizvodnju vodene pare, odnosno potrebnih za rad parnog kotla kao pogonske cjeline.

Pregled osnovnih dijelova parnog kotla prikazan je u tabl. 1.

Tablica 1  
PREGLED OSNOVNIH DIJELOVA PARNOG KOTLA

1. Prostor za izgaranje goriva (ložišna komora) parnog kotla sa svim uređajima za dovod goriva i zraka i odvod dimnih plinova
2. Sustav izmjenjivača topline (tlačni dio parnog kotla i zagrijaći zraka)
2.1. Isparivač
2.2. Pregrijaći pare
2.3. Zagrijaći vode (predisparivač)
2.4. Zagrijaći zraka
3. Pomoći uređaji u parnom kotlu
3.1. Armatura parnog kotla (fina i gruba)
3.2. Nosiva čelična konstrukcija
3.3. Ozid i izolacija
4. Postrojenje ili uređaji izvan parnog kotla
4.1. Postrojenje ili uređaji za dovod goriva do parnog kotla
4.2. Postrojenje ili uređaji za pripremu vode
4.3. Postrojenje ili uređaji za napajanje vodom
4.4. Postrojenje ili uređaji za opskrbu zrakom
4.5. Postrojenje ili uređaji za odvod i čišćenje dimnih plinova
4.6. Postrojenje ili uređaji za odvod pepela i troske
4.7. Postrojenje ili uređaji instrumentacije, regulacije i automatike

**Tlačni dio parnog kotla.** U tlačni dio parnog kotla dovodi se napojna voda pod tlakom mnogo višim od atmosferskoga. Tu se voda zagrijava, predisparuje i isparuje, a proizvedena se vodena para pregrijava na zahtijevanu temperaturu. Prema tome, tlačni dio obuhvaća sve ogrjevne površine izmjenjivača topline (zagrijaći, predisparivači i isparivači vode, te pregrijaći pare), spojne cjevovode, komore i bubanj parnog kotla (ako je kotao s prirodnim optokom vode).

Ogrjevna površina isparivača vode osnovni je dio parnog kotla. Ta je površina s jedne strane u dodiru s dimnim plinovima, a s druge strane s vodom i mješavinom vode i vodene pare. Za stabilne parne kotlove računa se veličina ogrjevne površine prema strani koja je u dodiru s dimnim plinovima, a za brodske kotlove prema strani koja je u dodiru s vodom. Isparivači su cijevi povezane s vodnim komorama i bubnjem tako da se odvija normalni optok vode i pare. U parnim kotlovima s prirodnim optokom moraju biti do određene visine bubnja (50...70% visine) bubanji i cijevni sustav isparivača i zagrijaća vode ispunjeni vodom (voden prostor), a iznad toga dijela bubnja nalazi se parni prostor. U parnim kotlovima s prisilnim optokom voda i para često se izravno odvajaju u cijevnom sustavu isparivača bez bubnja. Ta vrsta parnih kotlova ima malu količinu vode, a brze promjene opterećenja postiže se dobrom regulacijom dovoda goriva, odnosno izgaranja.

Najniži i najviši vodostaj u parnom kotlu mora biti jasno određen, jer je to oznaka stanja vode i pare u kotlu. Time se sprečava izravan dodir dimnih plinova visoke temperature s ogrjevnim površinama isparivača koje nisu s druge strane hladene mješavinom vode i vodene pare.

Ogrjevne površine pregrijaća pare. Pregrijaći pare sklop je ogrjevnih površina izmjenjivača topline u kojemu se pregrijava zasićena vodena para do određene temperature pregrijavanja. U pregrijaću se, osim toga, suši para koja na ulazu u pregrijać sadrži određeni postotak vodenih čestica (1...5%). Ogrjevne površine pregrijaća pare izrađuju se u obliku snopova čeličnih bešavnih cijevi, prema potrebi i od legiranog čelika, smještenih u ložištu ili u vodovima dimnih plinova. Suvremeni veliki parni kotlovi visokog pregrijavanja pare imaju ogrjevne površine pregrijaća podijeljene na više dijelova. Toplina se konvekcijom i zračenjem prenosi od dimnih plinova na vodenu paru koja struji u cijevima pregrijaća.

Ogrjevne površine zagrijaća i predisparivača vode. Zagrijać, odnosno predisparivač vode, sklop je ogrjevnih površina izmjenjivača topline u kojemu se voda zagrijava ili djelomično predisparuje. Ogrjevne površine zagrijaća vode za niže pogonske tlakove (4...5 MPa) izrađene su često od rebrastih lijevanih cijevi, a za visoke tlakove od čeličnih bešavnih cijevi savijenih poput zmija. Temperatura zagrijavanja vode u zagrijaćima niže je od 25...50 °C od temperature zasićene pare. Često se u zagrijaću voda zagrijava i do temperature isparivanja, a može se i predispariti do 25%.

Ogrjevne površine zagrijaća zraka za izgaranje mogu biti u obliku limenih pločastih zagrijaća, cijevnih zagrijaća, lijevanih rebrastih cijevi ili su specijalne izvedbe (Ljungström). Zrakom, koji se zagrijava prijenosom topline od dimnih plinova, suši se i zagrijava gorivo i stvaraju povoljniji uvjeti izgaranja (povišenje temperature izgaranja) u ložištu parnog kotla.

**Pomoći uređaji, nosiva konstrukcija i ozid parnog kotla.** Dio pomoći uređaja smješten je u parnom kotlu, kao npr. gruba i fina armatura, a uređaji koji služe za dovod vode, goriva i zraka, uređaji za odvod dimnih plinova, pepela i troske, te uređaji za regulaciju i automatizaciju pogona nalaze se izvan kotla.

Armatura parnog kotla dijeli se na grubu i finu. Gruba armatura obuhvaća pomoćne uređaje ložišta, kontrolna vrata, zaklopke, otvore za nadgledanje itd. Fina armatura obuhvaća dijelove bitne za sigurnost pogona i rada kotla, a to su: vodokazni uređaji, vodokazna stakla, probni pipci, manometri i termometri, sigurnosni, zaporni i povratni (napojni) ventili, glavni parni ventil, odzračni ventili, ventili za puštanje u pogon, ventili za pražnjenje, te senzori instrumenata i uređaja za regulaciju i automatiku.

Nosiva čelična konstrukcija parnog kotla povezuje njegove pojedine dijelove u jedinstvenu cjelinu i preuzima opterećenja što nastaju ugradnjom svih dijelova parnog kotla (ložište sa svojim uređajima, ogrjevne površine izmjenjivača topline kao što su isparivač vode, pregrijaći pare, zagrijaći vode, armatura i ostali dijelovi). Najčešće je nosiva konstrukcija izrađena od normalnih valjanih profila ili od zavarenih čeličnih lamela. U posljednje vrijeme izgrađeni su i parni kotlovi s ogrjevnim

površinama ili optočnim cijevima (kutnocijevni parni kotlovi) koje ujedno služe i kao nosiva konstrukcija. Kao nosiva konstrukcija parnih kotlova s velikim sadržajem vode služi tijelo kotla.

*Ozid i izolacija parnog kotla* sprečavaju prođor vanjskog zraka u ložište i kanale kotla te osiguravaju minimalne toplinske gubitke. Vatrostalni i izolacijski materijal odabire se na osnovi toplinskih i mehaničkih naprezanja što nastaju zbog temperaturnih stanja u pojedinim područjima kotla. Kotao može imati normalnu (tešku) ili laku izolaciju.

*Normalna izolacija* je ozid sastavljen od vatrostalnih (šamotnih) opeka normalnih i fazonskih oblika te vatrostalnih (šamotnih) svodova. Između sloja vatrostalne opeke i vanjskog ozida od strojne građevne opeke često se nalazi izolacijski međusloj. U suvremenim parnim kotlovima većeg učina, gdje su stijenke ložišta potpuno pokrivene ogrjevnim površinama od cijevi zavarenih u jednom bloku (*membranske stijenke*), smješten je sloj izolacijskog materijala (staklena ili mineralna vuna) iza takvih cijevnih stijenki. S vanjske je strane čitav parni kotao pokriven limenom oplatom.

*Postrojenje za pripremu napojne vode* služi za termičku i kemijsku pripremu vode. U *kemijskoj pripremi vode* odstrane se štetne tvari kao što su soli, anorganske i organske kiseline, mehanička nečistoća itd. Uvjeti koje napojna voda mora zadovoljavati određeni su temperaturom pregrijanja, radnjim tlakom, toplinskim opterećenjem ogrjevnih površina, vrstom parnog kotla itd. Proizvođač parnog kotla propisuje čistoću i kvalitetu napojne vode.

U *termičkoj pripremi vode* predgrijava se napojna voda u predgrijačima (visoko i niskotlačni predgrijači vode) i otpisuju se iz vode štetni plinovi ( $O_2$  i  $CO_2$ ).

*Uredaji za napajanje parnog kotla* sastoje se od napojnih pumpi, napojnih cjevovoda, sigurnosne i pogonske armature te zavješenja cjevovoda. Napajanje se regulira u sklopu cijekupne regulacije parnog kotla. Sigurna opskrba kotla napojnom vodom najbitniji je uvjet sigurnosti pogona. Zato su mnoge zemlje odredile vrlo stroge propise o gradnji i veličini napojnih pumpi. U Jugoslaviji zasad postoje *Propisi za izvedbu i korištenje parnih kotlova* prema Službenom listu SFRJ br. 7 iz 1957. god. i prema dodatku tim propisima u Službenom listu SFRJ br. 56 iz 1972. god. Zbog brzog razvoja parnog kotla ti propisi više ne zadovoljavaju u svim slučajevima, pa se u našoj zemlji upotrebljavaju i propisi SR Njemačke.

*Postrojenje za transport i pripremu goriva* sastoje se od niza transportnih uređaja, već prema vrsti goriva (čvrsto, tekuće ili plinovito gorivo), prema zahtjevima za sigurnost pogona (potrebne rezerve goriva) i prema konkretnim smještajnim uvjetima parnog kotla, njegovih pomoćnih uređaja i čitavog termoenergetskog postrojenja. Uredaji za transport i pripremu goriva

čine u termoenergetskim postrojenjima, a osobito kad se loži čvrstim gorivom, složeno i veliko postrojenje.

*Uredaji za čišćenje dimnih plinova* (filtr) rade na osnovi mehaničkog odvajanja čestica pepela i balastnih tvari, tj. djelovanjem centrifugalne sile na čestice pepela u dimnim plinovima, ili kao elektrofiltri na osnovi djelovanja elektrostatickog elektriciteta. Ti se uređaji mogu razvrstati na četiri skupine: mehanički suhi filtri, mehanički vlažni filtri, elektrosuhi filtri i elektrovlažni filtri.

Izvedba i upotreba pojedinih vrsta filtera moraju biti primjerene propisanoj kvaliteti čišćenja dimnih plinova od pepela i balastnih tvari.

*Uredaji za odvod troske i pepela* odstranjuju iz ložišta parnog kotla trosku, pepeo i ostale balastne tvari. Ti uređaji mogu biti mehanički, hidraulički ili pneumatski.

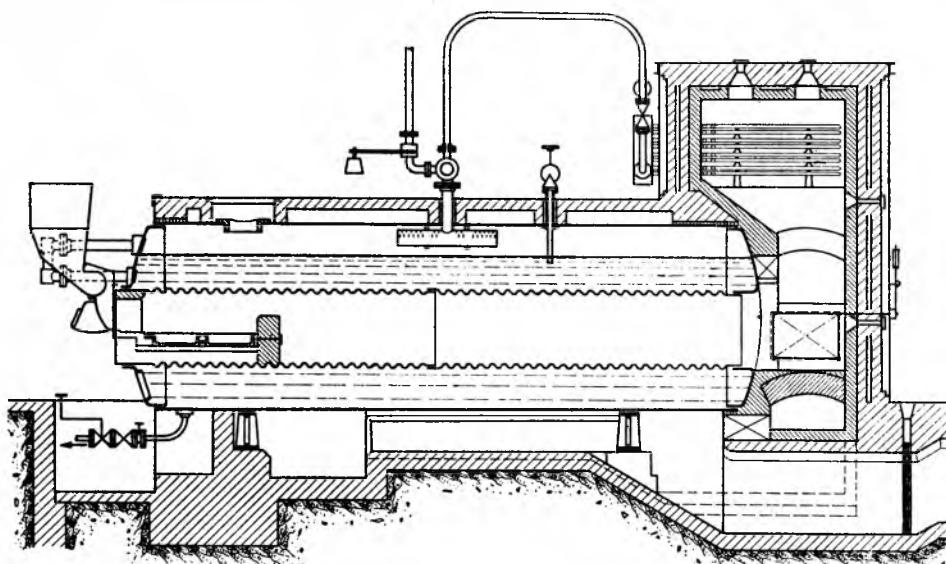
*Oprema za instrumentaciju, regulaciju i automatiku parnog kotla*. Za ispravan rad i pogon parnog kotla ugrađuje se oprema i uređaji koji treba da usklade dovedenu energiju goriva s potrebnom toplinskom energijom koju proizvodi parni kotao, da usklade odnose goriva i zraka kako bi izgaranje u ložištu bilo najpovoljnije, da održavaju u svim pogonskim uvjetima konstantan tlak u ložištu (podtlak ili pretlak), da održavaju konstantnu temperaturu pregrijanja pare i da održavaju napajanje kotla vodom.

#### IZVEDBE PARNIH KOTLOVA

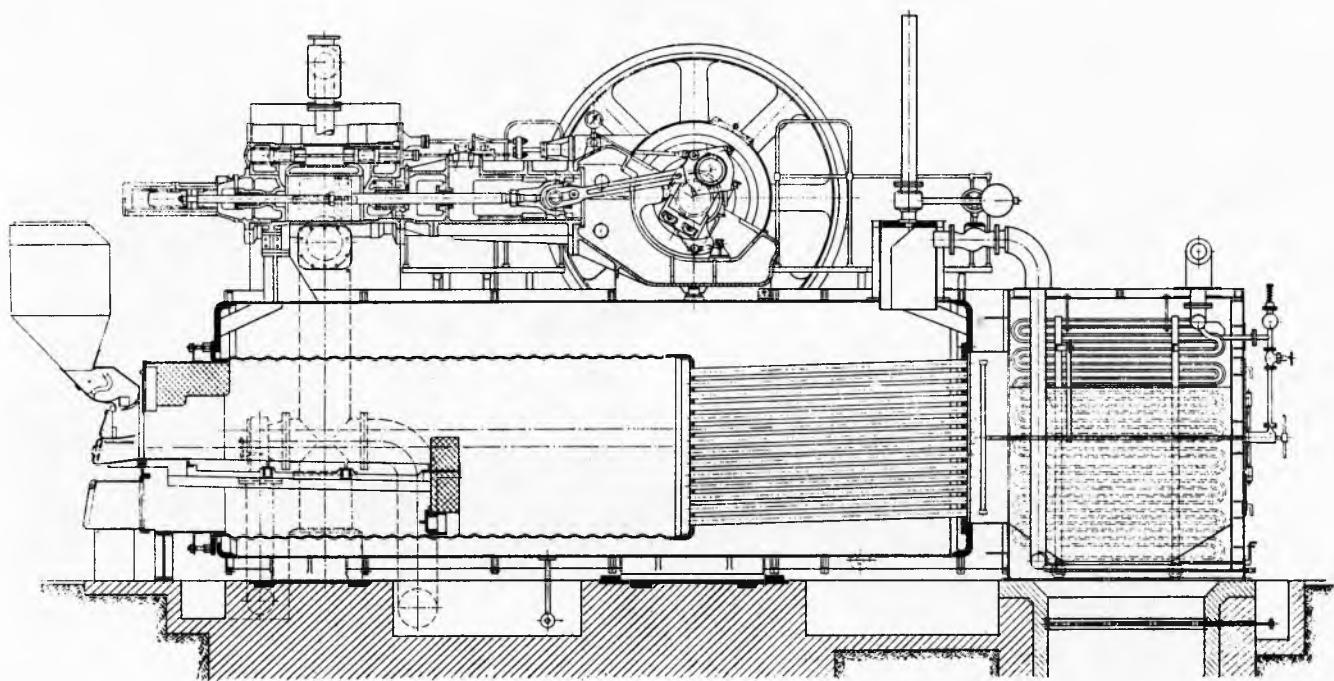
Osnovna razlika u izvedbi parnih kotlova sastoji se u načinu prolaza plinova izgaranja kroz kotao, tj. da li plinovi prolaze kroz cijevi okružene vodom ili oko cijevi u kojima je voda. Prema tome, postoje sljedeće osnovne konstrukcije parnih kotlova: *plamenocijeve kotlovi*, gdje plinovi izgaranja struje kroz cijevi oko kojih je voda, *vodocijeve kotlovi*, gdje plinovi izgaranja struje oko cijevi u kojima je voda, i *kombinirani kotlovi*, gdje plinovi prolaze dijelom kroz plamene cijevi, a dijelom oko cijevi ispunjenih vodom.

#### Plamenocijevi kotao

Plamenocijevi kotao sastoje se od cilindričnog bubnja napunjeno vodom, u kojemu se paralelno s osi cilindra nalazi jedna (sl. 7), dvije ili tri plamene cijevi velikog promjera i valovitog uzdužnog presjeka, tzv. *plamenice*. Rešetka ložišta ugrađena je u plamenicu, a plinovi izgaranja predaju toplinu vodi kroz stijenke plamenice. Kad je potrebna pregrijana para, plinovi izgaranja odlaze iz plamenice u pregrijač pare i zagrijavaju cijevi kroz koje strui para iz cilindričnog bubnja. Prije nego se ispuste u atmosferu, plinovi izgaranja dovode se u dodir s ogrjevnom površinom zagrijača zraka.



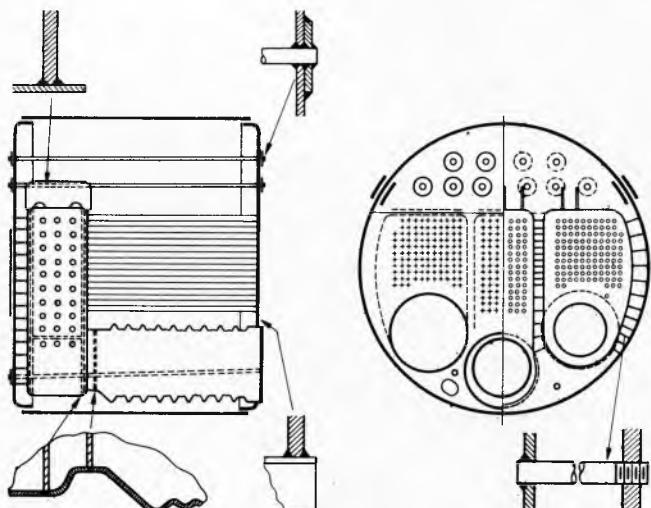
Sl. 7. Uzdužni presjek kroz plamenocijevi kotao



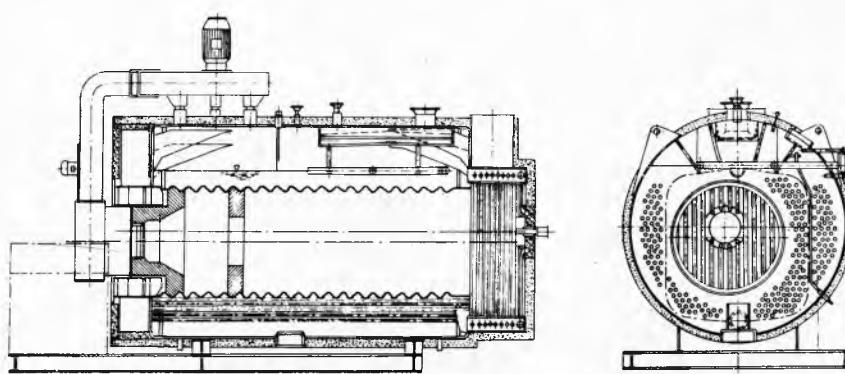
Sl. 8. Uzdužni presjek kroz kotao s plamenicom i plamenim cjevima; na kotao je postavljen parni stroj

Da bi se povećala ogrjevna površina isparivanja, dio plamenice velikog promjera zamjenjuje se s više plamenih cjevi malog promjera kroz koje struje plinovi izgaranja. Plamene cijevi se mogu nalaziti u produženju plamenice (sl. 8), ili su smještene iznad plamenice kao u brodskom škotskom kotlu (sl. 9). Postoje i izvedbe kotla koje uopće nemaju plamenicu, nego samo snop plamenih cjevi malog promjera neposredno iza ložišta. Tzv. *dvostruki kotlovi* sastavljeni su od donjeg kotla s plamenicom i gornjeg kotla s plamenim cjevima (kotao tipa Tischbein).

Moderna izvedba plamenocijevnog kotla prikazana je na sl. 10. U ložištu, koje je konstruirano kao plamenica (plamena cijev promjera 600–1200 mm), izgara tekuće gorivo, a tri su vodoravna toka dimnih plinova. Taj se tip kotla često naziva *trohodnim plamenocijevnim kotлом*. Njegov učin iznosi do 8,4 kg/s (30 t/h) pare s dopuštenim tlakom do 24,6 bar i temperaturom pregrijavanja pare do 360 °C. Takvi se tipovi mnogo grade i često upotrebljavaju jer je cijeli parni kotao s napojnim uređajem (napojne pumpe), armaturom, instrumentima i opremom za automatiku rada jedan blok koji se kao cjelina ugrađuje u industrijsko ili energetsko postrojenje.



Sl. 9. Škotski kotao sa zavarenim dijelovima



Sl. 10. Plamenocijevni kotao s ložištem pod pretlakom i sa tri ravna prolaza dimnih plinova

Plamenocijevni kotlovi jednostavne su konstrukcije, nisu veoma osjetljivi na kvalitetu vode, a u pogonu su vrlo elastični jer zbog velikog sadržaja vode mogu kompenzirati nagle promjene opterećenja pomoći topline akumulirane u vodi. Nedostatak im je velika težina i velike dimenzije po jedinici proizvedene

pare. Zato se grade za manje učine i tlakove do ~20 bar, jer bi za veće učine i veće tlakove postali suviše glomazni i preteški. Zbog velikog sadržaja vode trebaju dugo vremena da se zagrijuju, a postoji i opasnost da eksplodiraju kad se pokvare.

Upotrebljavaju se za pogon lokomobila i parnih lokomotiva, za centralna grijanja i manje industrijske potrošače pare, te kao pomoći kotovi na motornim brodovima.

### Vodocijевни kotao

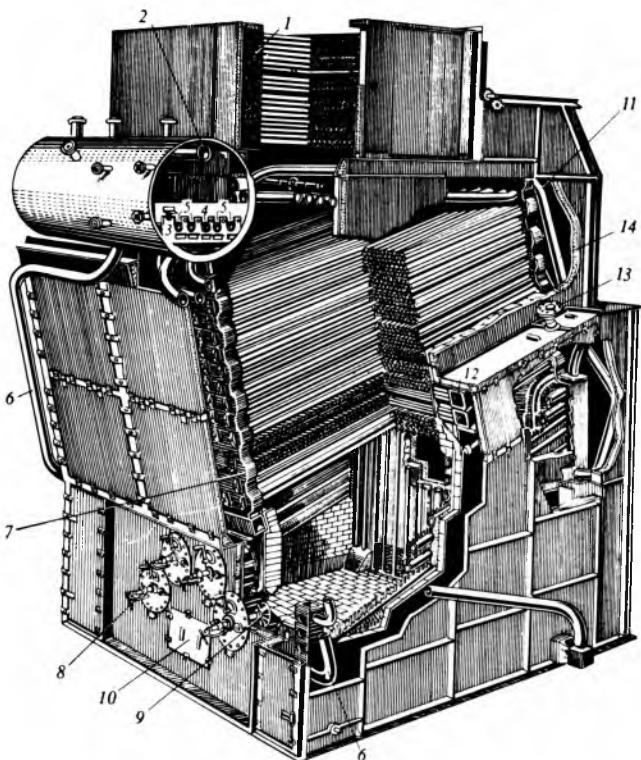
Nastojanja da se povećaju ogrjevne površine, a time i učin kotola, dovela su do različitih konstrukcija vodocijevnih kotlova.

Prvi su se razvili sekcijski kotovi, u kojima voda isparuje u koso položenim cijevima (sl. 11). Voda iz bubenja dotjeće u niže postavljene sekcije iz kojih izlazi po jedan red koso položenih ravnih cijevi. U cijevima voda isparuje i prirodnim se uzgonom smjesa vode i pare diže prema više postavljenim sekcijama i zatim struji u bubanj. Iz gornjeg dijela bubenja odvodi se praktički suha para u pregrijač pare. S vanjske strane sekcija u smjeru cijevi nalaze se otvori koji su za vrijeme pogona zatvoreni čvrsto pritegnutim poklopциma. Kad se poklopci skinu, mogu se ravne i lako dostupne cijevi za isparivanje očistiti od kotovca nataloženog na unutrašnjosti stijenke. Kotlovac se stvara zbog rastopljenih soli što ih voda donosi u kotao. Za skidanje kotovca služe posebne mehaničke naprave. Sekcijski kotovi imaju mnogo poklopaca (dvostruko više od kosi cijevi), što može uzrokovati propuštanje pare, pa se zato grade za tlakove do najviše 40 bar. Maksimalni učin sekcijskih kotlova iznosi do 50 t/h.

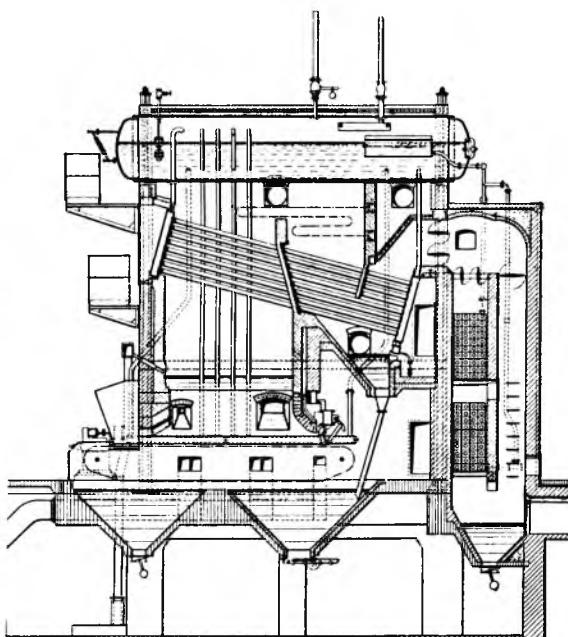
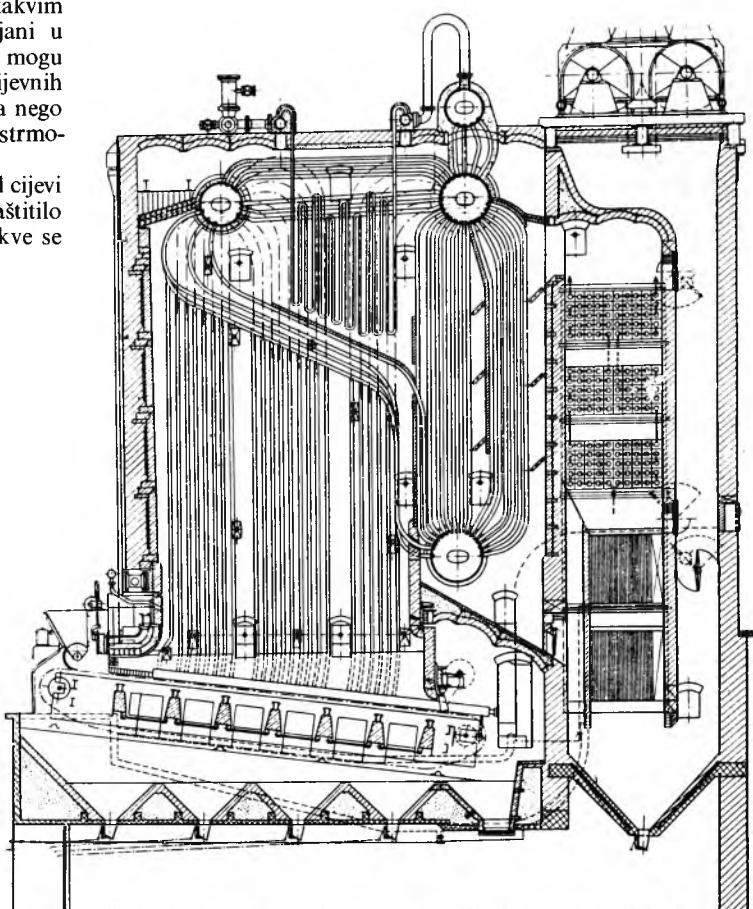
Najpoznatiji proizvođač vodocijevnih sekcijskih kotlova jest tvrtka Babcock & Wilcox. Za manje učine ta tvrtka gradi kotove s nešto širim vodnim cijevima, a posebne pregrade usmjeruju plinove izgaranja tako da moraju dva ili tri puta prelaziti preko cijevi. Kotovi tvrtke Babcock & Wilcox većeg učina imaju uske vodne cijevi, dakle veću ogrjevnu površinu, i jednostruki prolaz plinova preko cijevi (sl. 12).

Obično se svi vodocijevni kotovi koji nemaju sekcije nazivaju strmcijevnim kotovima. Postoji vrlo mnogo različitih izvedbi strmcijevnih kotlova koji imaju dva ili više bubenjeva (sl. 13) i različiti raspored cijevi za isparivanje da bi se postiglo što povoljnije strujanje vode i što veće ogrjevne površine. U takvim su kotovima cijevi zakriviljene, a njihovi krajevi uvaljani u stijenke bubenjeva, pa se unutrašnje površine cijevi više ne mogu mehanički čistiti. Zbog toga se za napajanje strmcijevnih kotlova mora upotrijebiti mnogo bolje pripremljena voda nego za sekcijske kotove. U usporedbi sa sekcijskim kotovima strmcijevni su kotovi nešto lakši.

U sekcijskim i strmcijevnim kotovima postavlja se red cijevi za isparivanje uz zid komore izgaranja da bi se zide zaštitili od djelovanja visokih temperatura plinova izgaranja. Takve se



Sl. 12. Kotao Babcock & Wilcox s jednostrukim prolazom plinova izgaranja.  
1 zagrijač zraka, 2 odvod pare, 3 cijev za otpreživanje, 4 cijev napojne vode,  
5 cijevi reduktora pregrijavanja, 6 silazne cijevi, 7 prednje sekcije, 8 plamenici,  
9 sapnica, 10 ulaz u ložiste, 11 stražnje sekcije, 12 komore pregrijavača, 13 dovod pare iz pregrijavača, 14 užlasne cijevi

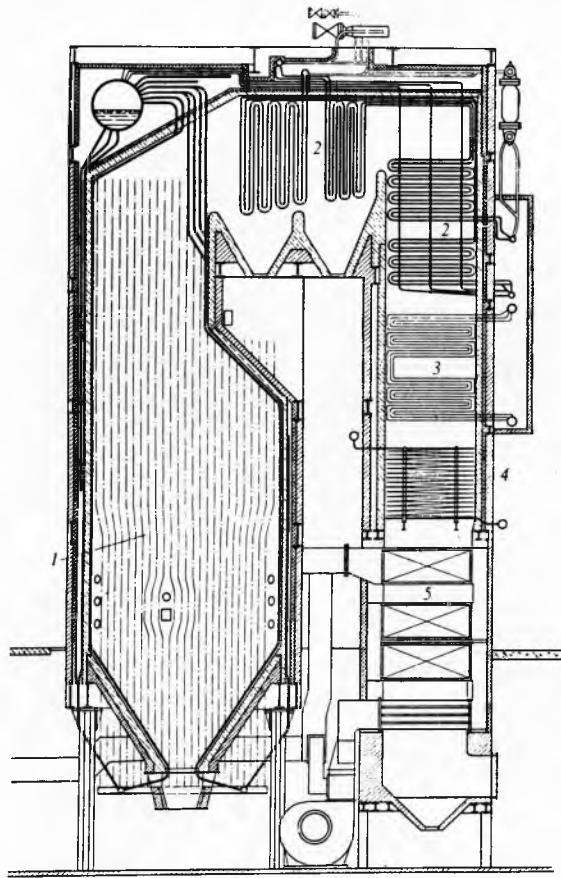


Sl. 11. Skica sekcijskoga vodocijevnog kotla

Sl. 13. Skica strmcijevnog kotla sa tri bubenja

ogrjevne površine, ugrađene u ložištu, nazivaju *ekranima*. Ekrana se ostvaruje i prijelaz topline zračenjem, pa se plinovi dodiruju s ostalim ogrjevnim površinama tek kad im je temperatura mnogo niža od temperature izgaranja. Tako se sprečava da se čestice pepela, koje se tale već pri temperaturi izgaranja, ne zalijepe na vanjske stijenke cijevi.

Prijelazom na sve više tlakove, toplina isparivanja postaje sve manja prema ukupnoj toplini što se u kotlu predaje vodi i pari, pa se smanjuje i potrebna ogrjevna površina isparivanja, te se može čitava izvesti u obliku jednog reda cijevi smještenih uz zide komore izgaranja (sl. 14). Takav se kotao zove *radiacijski kotao*, a stijenke ložišta kotla, koje su ujedno i ogrjevne površine isparivanja jer imaju ugrađene cijevi za isparivanje, zovu se *membranske stijenke*. Membranske stijenke izgrađene su od vodnih cijevi koje imaju po čitavoj duljini na dvije suprotne strane privarenu ili zajedno sa cijevi izvaljanu čeličnu traku. Trake susjednih cijevi međusobno su zavarene, pa se tako dobiva nepropusna membranska stijenka na koju toplina prelazi zračenjem. Za vrlo visoke tlakove potrebna ogrjevna površina isparivanja postaje još manja, pa se i pregrijači pare stavljuju u komoru izgaranja.



Sl. 14. Skica radiacijskog kotla. 1 komora izgaranja, 2 pregrijač pare, 3 međupregrijač pare, 4 zagrijac vode, 5 zagrijac zraka

Prirodno strujanje vode i pare u kotlu nastaje zbog razlike između njihovih gustoća, što se postiže prikladnim rasporedom ogrjevnih površina. Pri višim tlakovima, međutim, razlika između gustoće pare i vode postaje sve manja, pa je prirodno strujanje sve slabije. Osim toga, kad se naglo poveća odvođenje pare te se naglo smanji tlak u kotlu, može prestati strujanje kao posljedica naglog isparivanja. Zato se smatra da se za tlakove više od 160 bar ne mogu upotrijebiti kotlovi s prirodnim strujanjem, već oni s prisilnim strujanjem i protočni kotlovi, koji su s obzirom na smještaj ogrjevnih površina također radiacijski kotlovi.

U kotlovima s prisilnim strujanjem voda iz bubenja dotječe u cirkulacijsku pumpu koja vodu tlači kroz sustav cijevi za isparivanje ponovno do bubenja gdje se odjeljuje para od vode.

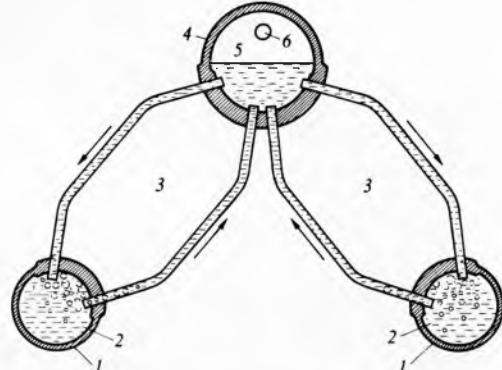
Para prirodnim uzgonom odlazi u pregrijač, a voda se vraća u cirkulacijsku pumpu.

U protočnim se kotlovima voda jednim prolaskom kroz kotao zagrijava, isparuje i pregrijava. Ogrjevna površina za isparivanje sastoji se od više paralelno spojenih cijevi, koje se na jednom kraju napajaju vodom, pa se u istoj cijevi voda zagrijava i isparuje, da bi na drugom kraju cijevi izlazila u obliku pregrijane pare.

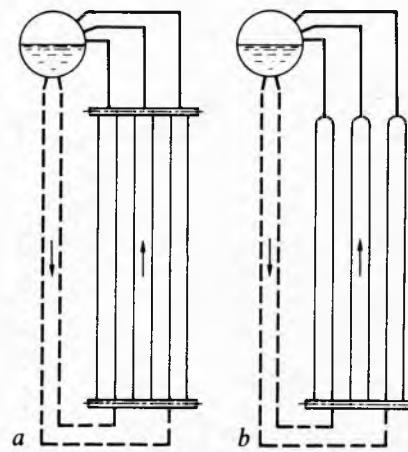
Danas se u termoelektranama upotrebljavaju samo radiacijski kotlovi, i to s prirodnim strujanjem za niže tlakove, a za više tlakove kotlovi s prisilnim strujanjem i protočni kotlovi. Moderni brodski glavni kotlovi rade s nižim temperaturama pregrijavanja pare i s nižim tlakovima (obično ~60 bar, a rijetko do 100 bar) nego veliki stacionarni kotlovi, pa zato većinom imaju prirodno strujanje vode i pare.

**Kotlovi s prirodnim strujanjem vode i pare.** Dio za isparivanje u vodocijevnim kotlima s prirodnim strujanjem sastoji se od dviju *vodnih komora* (*sabirnik vode*) smještenih na dnu kotla i povezanih snopovima cijevi s bubnjem na vrhu kotla (sl. 15). Jedan dio snopova cijevi izložen je vatri i plinovima izgaranja, pa se u njima stvara laka smjesa vode i pare koja struji prema gore u bubenj (*uzlazne cijevi*). Drugi dio snopova cijevi udaljen je od plinova izgaranja, ili je postavljen izvan komore izgaranja između dvostrukih plaštova kotla, pa su zato te cijevi hladne i kroz njih struji voda iz bubenja natrag u vodne komore (*silazne cijevi*). Intenzivnost strujanja ovisi o omjeru presjeka grijanih i negrijanih cijevi, o visinskoj razlici između bubenja i vodnih komora, o otporima strujanja i o tlaku u kotlu. Danas se grade kotlovi s malo negrijanih cijevi promjera dosta većeg nego što ga imaju grijane cijevi.

Smjesa vode i pare može se u bubenj dovesti ili iznad, ili ispod razine vode u bubenju. Pri malim opterećenjima smjesa se teže dovodi iznad razine vode jer treba svladati pretlak zbog



Sl. 15. Prirodno strujanje vode i pare u vodocijevnom kotlu.  
1 vodna komora, 2 voda, 3 snopovi cijevi, 4 bubenj, 5 para,  
6 odvod pare



Sl. 16. Način spajanja grijanih cijevi s bubenjem. a grijane cijevi završavaju u sabirniku, b spoj grijanih cijevi račvama

## PARNI KOTAO

višeg položaja ulaznog otvora cijevi. Prednost je ipak u tome što je strujanje vode uvek jednoznačno jer nema međusobnog utjecaja pojedinih grijanih cijevi.

U bubenj se može dovesti samo ograničeni broj cijevi, pa zato grijane cijevi završavaju u sabirnicima, od kojih se smjesa vode i pare odvodi s manje cijevi u bubenj, ili se po dvije grijane cijevi povežu račvama u obliku slova Y u jednu cijev koja ulazi u bubenj (sl. 16).

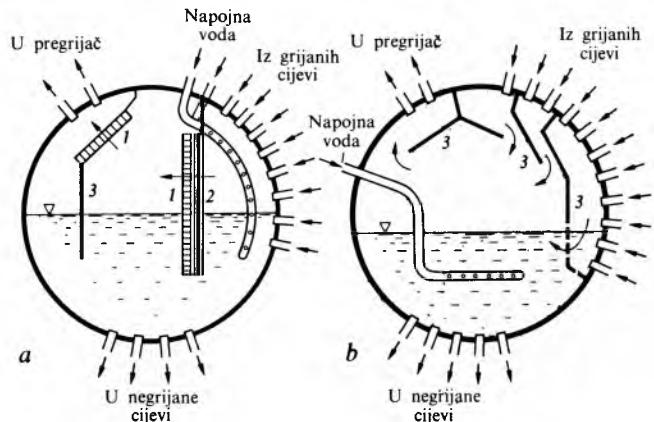
Jedan od osnovnih uvjeta za siguran pogon kotla s prirodnim strujanjem jest dovoljno jako strujanje vode. To će se postići ako su cijevi u komori izgaranja na svim mjestima dovoljno hlađene, tako da sadržaj pare u cijevima ne premaši neku dopuštenu granicu. Para, naime, ima mnogo slabiji koeficijent prijelaza topline od vode, pa ako se stvore veliki mjehuri pare koji ispunje cijeli presjek cijevi, nastaju velika lokalna pregrijavanja cijevi, a zbog disocijacije pare korodira stijenka cijevi. Zato se zahtijeva da sadržaj pare na izlazu grijanih cijevi ne bude veći od 70...80%.

Naglo smanjenje tlaka u kotlu može poremetiti cirkulaciju vode, pa voda može početi isparivati u negrijanim cijevima, jer i u njima ona ima temperaturu koja je blizu temperature isparivanja. Zbog toga se tlak ne smije smanjivati brže od 1...3 bara na minutu. Da bi se smanjila osjetljivost na sniženje tlaka, negrijane cijevi imaju veliki promjer i postavljaju se okomito da bi brzina strujanja bila što veća i da bi voda sa sobom ponijela paru koja se može pojaviti u cijevima.

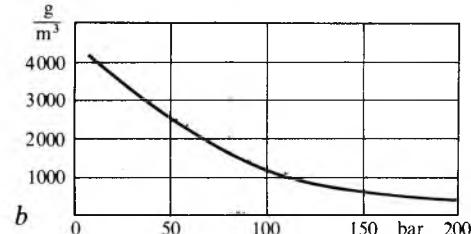
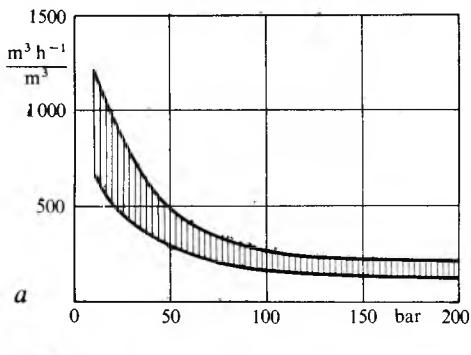
Osim što treba osigurati dobro strujanje vode i pare, potrebno je da se para u bubenju besprijekorno odvaja od vode, tj. para na izlazu iz bubenja ne smije sadržati sitne kapljice vode. Naime, kapljice vode sa sobom odnose sol, pa kad voda ispari, sol se istaloži u pregrijaču ili parnoj turbini. Zbog toga volumen bubnja ( $m^3$ ) ispunjen parom mora biti u nekom odnosu s

volumenom proizvedene zasićene pare ( $m^3/h$ ). Taj odnos (sl. 17a) ovisi i o dopuštenom sadržaju soli u kotlovske vodi (sl. 17b).

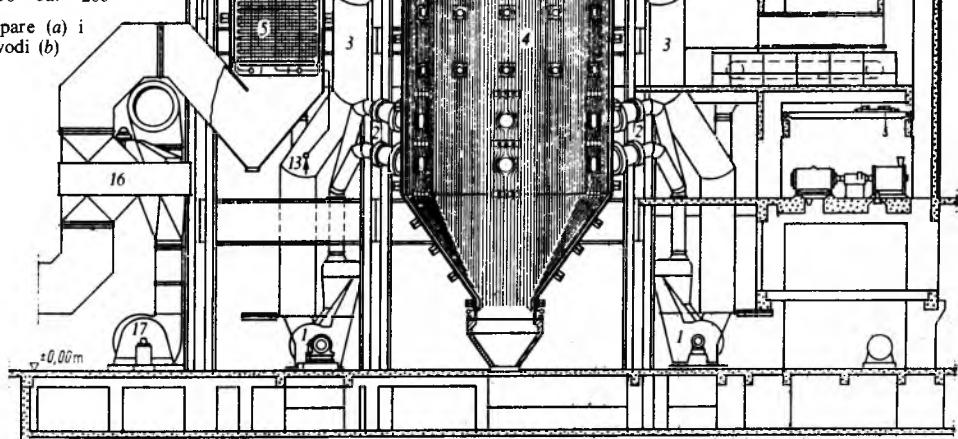
Dopušteno opterećenje bubenja, izraženo u  $m^3$  pare na sat, ovisi također o konstrukciji bubenja, odnosno o načinu na koji su cijevi uvedene u bubenj. Pri nižim tlakovima para se odvaja od vode zbog razlike u njihovim gustoćama, a pri višim tlakovima odvajanje se postiže naglom promjenom smjera strujanja pare, centrifugalnom silom u ciklonskim separatorima, sudarom mlaza pare s pločama postavljenim u smjeru strujanja, prolazom pare kroz limena sita itd. Postoji mnogo praktičnih rješenja da se para u bubenju odvoji od vode, a na sl. 18 prikazana su dva primjera.



Sl. 18. Uredaj za odjeljivanje pare i vode u bubenju kotla. a izvedba s perforiranim limovima, b izvedba sa skretnim limovima; 1 perforirani limovi, 2 dvostruka stijenka, 3 limovi za promjenu smjera strujanja



Sl. 17. Dijagrami dopuštene proizvodnje pare (a) i dopuštenog sadržaja soli u kotlovske vodi (b)

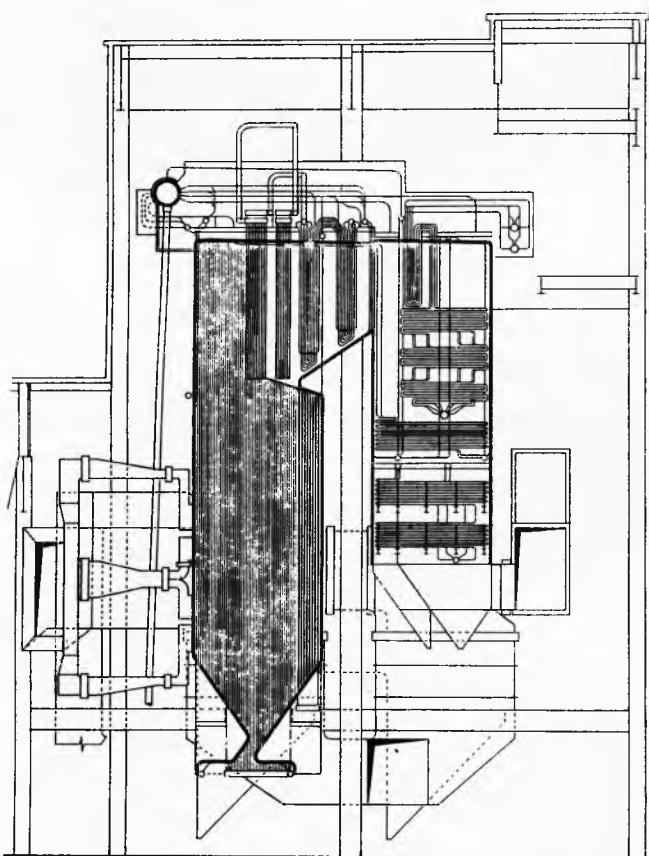


U izvedbi na sl. 18a gotovo sve grijane cijevi ulaze u bubanj iznad razine vode. Vlažna para prisiljena je da prođe kroz dvostruku stijenku, sastavljenu od međusobno razmaknutih željeznih U-profila, i kroz tri sloja perforiranog lima. Po cijeloj duljini bubnja dovodi se pojna voda kroz cijevi s mnogo-brojnim sapnicama, pa se tako odmah grije do temperature isparivanja. Prije ulaska u cijevi koje vode u pregrijač para prolazi kroz sito načinjeno od perforiranih limova.

Konstrukcija na sl. 18b ima skretne limove tako postavljene da veći dio smjese pare i vode što dolazi iz grijanih cijevi mora proći kroz vodu u bubnju prije nego što stigne u gornji dio bubnja. Pred cijevima koje vode u pregrijač nalazi se limena pregrada da bi se iz pare odstranile i posljednje kapljice vode.

Kotlovi s tlakom do ~120 bar trebaju tako veliku ogrjevnu površinu isparivanja da je sve ziđe komore izgaranja prekriveno cijevima u kojima voda isparuje. Tada se pregrijač pare nalazi djelomično u spajnom prostoru između dva dijela kotla (sl. 19). U kotlovima još višeg tlaka može se dio pregrijača pare postaviti u gornji dio komore izgaranja (sl. 20).

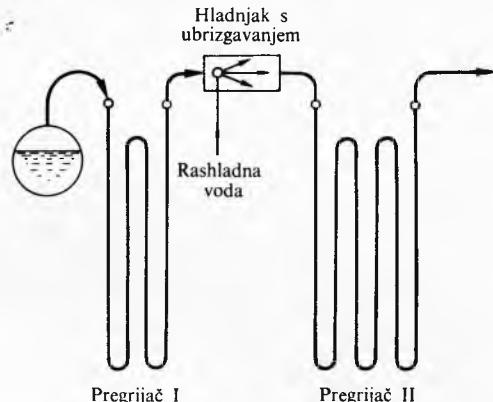
Temperatura pregrijane pare na izlazu iz kotla ovisi o opterećenju kotla. Ako je prijelaz topline u pregrijaču pare pretežno konvekcijom, izlazna temperatura pregrijane pare raste s povećanjem proizvodnje pare u kotlu, jer tada raste i količina plinova izgaranja. Kad se pregrijač nalazi u ložištu, on preuzima najveći dio topline zračenjem. Dozračena toplina ovisi o temperaturi u ložištu, a praktički je neovisna o opterećenju kotla. Zbog toga temperatura pare na izlazu iz tako smještenog pregrijača opada s opterećenjem, jer s povećanjem opterećenja raste količina pare koja struji kroz pregrijač.



Sl. 20. Skica parnog kotla višeg radnog tlaka s prirodnim strujanjem: učin 1700 t/h, tlak 165 bar, temperatura izmjerena u pregrijaču 568 °C, međupregrijavanje 568 °C, temperatura napojne vode 257 °C

Ako temperatura pregrijane pare ovisi o opterećenju kotla, u pregrijaču mora postojati regulacija koja održava određenu izlaznu temperaturu pare. Regulacija se uglavnom provodi hlađenjem pare između dva dijela pregrijača (sl. 21) ili na izlazu

iz pregrijača. Vrlo čista rashladna voda (kondenzat) ubrizgava se u paru kroz sapnice smještene u cijevi duljine ~3 m. Cijev je iznutra obložena zaštitnim slojem da bi se smanjio utjecaj temperaturnog udara. Dovod rashladne vode regulira se pomoću termoelementa ugrađenog na kraju cijevi. Da bi se poboljšala regulacija temperature pregrijane pare, pregrijač se gradi u tri dijela između kojih su umetnuti hladnjaci. Takva se izvedba pregrijača pogotovo preporučuje kad je temperatura pare viša od 565 °C.



Sl. 21. Shema uređaja za hlađenje pregrijane pare

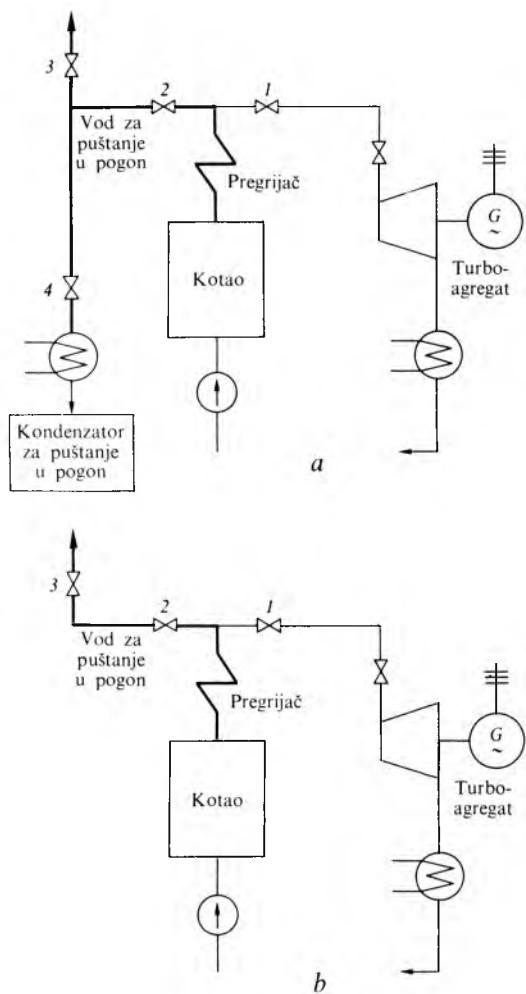
Obično se ogrjevna površina pregrijača odabere tako da pri 70%-tnom opterećenju kotla para ima nazivnu temperaturu i bez ubrizgavanja rashladne vode. Za manja opterećenja, prema tome, treba računati s nižom temperaturom pare od nazivne.

Svaki je kotao građen za određene pogonske uvjete, pa su sve ogrjevne površine primjerene učinu kotla, temperaturi u komori izgaranja i temperaturama plinova izgaranja. Za vrijeme stavljanja u pogon pogonski uvjeti bitno se razlikuju od onih u normalnom pogonu. Kotao i dovedeni zrak su hladni, a izgara malo goriva, pa je zbog toga temperatura u komori izgaranja niža nego u normalnom pogonu. Zbog niže temperature u komori toplina predana isparivaču, a prema tome i proizvodnja pare, relativno je manja nego na ogrjevnim površinama koje su izvan komore izgaranja. Zbog toga nastaje neželjeni brzi porast temperature pregrijane pare. Zato se pri stavljanju kotla u pogon mora posebno zaštititi pregrijač.

Jedan od načina da se zaštiti pregrijač pri stavljanju kotla u pogon jest da se u početku zagrijavanja kotla sva proizvedena para odvodi u okoliš ili u kondenzator, a ne u parnu turbinu (sl. 22). Kad se kotao napuni vodom i potpalni uz djelomično otvorene ventile 2 i 4 (sl. 22a), odnosno 2 i 3 (sl. 22b), u kotlu počne postepeno rasti tlak. Brzinu porasta tlaka obično propisuje proizvođač. Do tlaka od ~5 bar otvoreni su svi ventili za odzračivanje da bi se ispušto zrak koji se nakupio u kotlu dok je kotao bio izvan pogona. Temperatura u pregrijaču počinje polako rasti, pa loženje i odvodnje pare u kondenzator (preko ventila 2 i 4 na sl. 22a) ili u okoliš (preko ventila 2 i 3 na sl. 22a i 22b) treba tako podešiti da se ne prekoraci dopuštena temperatura. Ogrjevne se površine hlađe odvodenom parom. Da bi se spriječili gubici kondenzata, para se odvodi u posebni kondenzator, a kondenzat se ponovno uvodi u kružni proces. Kad se postigne tlak od 10...20 bar (to ovisi o konstrukciji kotla), potpuno se otvoreni ventili 2 i 4, odnosno 2 i 3 da bi se ispuhao pregrijač i iz njega uklonila voda. Postupak se provodi sve dok se ne postigne ista temperatura na izlazu iz prvog i na izlazu iz drugog dijela pregrijača (sl. 21). Nakon ispuhanja ponovno se djelomično zatvori ventil 2 (sl. 22), pa temperatura u pregrijaču počne brzo rasti, a da se održi u dopuštenim granicama, dodaje se rashladna voda prema shemi na sl. 21.

Kad su tlak i temperatura u kotlu stabilizirani i kad više nema opasnosti od naglog porasta temperature i prodora vode kroz pregrijač, započinje zagrijavanje cjevovoda između kotla i turbine, a zatim i zagrijavanje turbine. Tada se ventil postepeno zatvara sve dok se konačno potpuno ne zatvori.

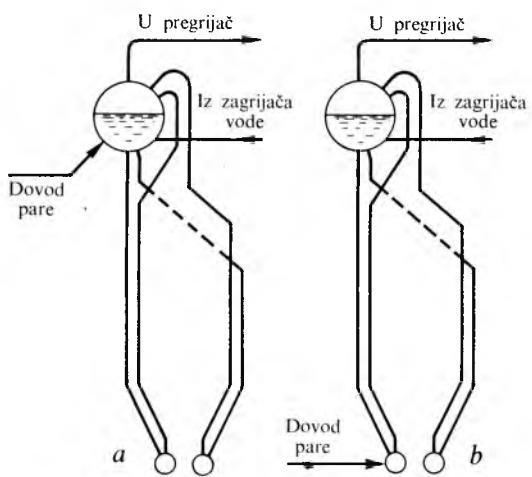
## PARNI KOTAO



Sl. 22. Shema spoja za stavljanje u pogon kotla s prirodnim strujanjem postupkom odvođenja pare, a) odvod pare u kondenzator i okoliš, b) odvod pare samo u okoliš

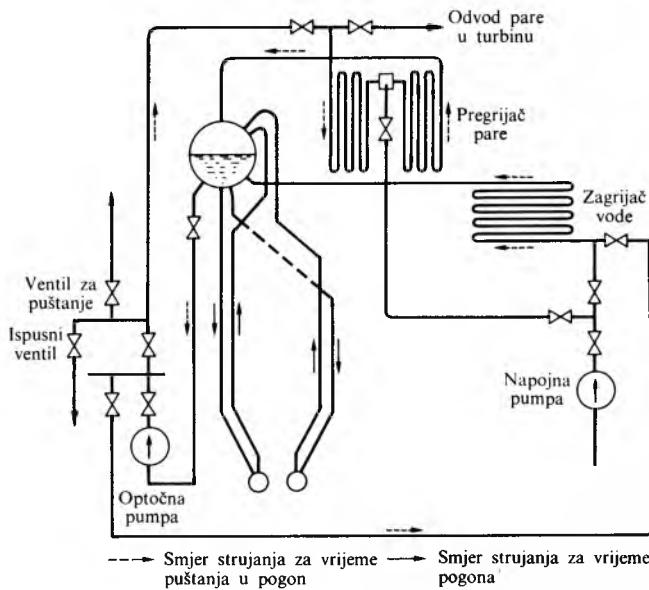
U prvoj fazi stavljanja kotla u pogon teško se održava temperatura jer je proizvodnja pare vrlo malena. Stavljanje u pogon bit će olakšano ako se u kotao uvede zasićena para iz susjednog kotla ili iz posebno u tu svrhu izgrađenog kotla. Tlak uvedene pare treba iznositi 20 bar. Para se može dovoditi u bubenj (sl. 23a) ili u sabirnike cijevi za isparivanje (sl. 23b).

Dруги и бржи начин да се котао стави у погон јест *postupak s kružnim hlađenjem*. За тај су поступак потребне посебне опточне пумпе и спојни водови (sl. 24).



Sl. 23. Shema dovoda pare u kotao za vrijeme stavljanja u pogon. a) dovod pare u bubenj, b) dovod pare u sabirnike cijevi za isparivanje

Nakon što je kotao napunjen vodom, a prije nego što se potpalji, pokrene se optočna pumpa. Uz zatvoreni ispusni ventil voda tjerana optočnom pumpom prolazi kroz pregrijač pare i kroz zagrijac vode, vraća se u bubenj i otuda ponovno dotječe optočnoj pumpi. Tako su u prvoj fazi stavljanja kotla u pogon i pregrijač i zagrijac stalno napunjeni vodom. Zbog toga se razina vode u bubenju spusti, pa u kotao treba pojnom pumpom dovoditi vodu sve dok se razina vode u bubenju ne ustali na najnižoj dopuštenoj razini. Tek tada se kotao može potpaliti. Za vrijeme punjenja otvoreni su svi ventili za odzračivanje i oni ostaju otvoreni sve dok se ne postigne tlak od 5 bar. Kad tlak u kotlu poraste na 50–60 bar, zatvori se ventil za dovod vode iz optočne pumpe u pregrijač i otvori se ispusni ventil, pa se voda ispuhuje iz pregrijača. Nakon kratkog vremena temperatura u pregrijaču premaši temperaturu isparivanja, što znači da u pregrijaču više nema vode, pa se može zatvoriti ispusni ventil i otvoriti ventil za stavljanje u pogon kroz koji para struji u okoliš ili u kondenzator za stavljanje u pogon. Pomoću tog ventila regulira se odvod pare, a temperatura pare održava se u dopuštenim granicama.

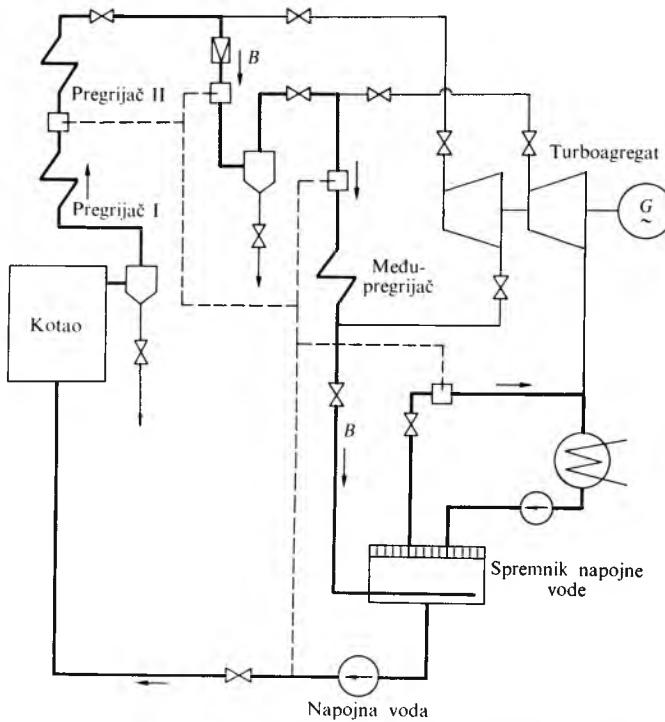


Sl. 24. Shema spoja za stavljanje u pogon kotla s prirodnim strujanjem postupkom kružnog hlađenja

Već za vrijeme ispuhanja pregrijača većinom se mora između dva dijela pregrijača dodavati voda za hlađenje da bi se sprječio brzi rast temperature nakon ispuhanja, a često se smanjuje i loženje kotla. Na početku proizvodnje pare treba započeti i napajanje kotla vodom. Ako su temperatura i razina vode u bubenju stabilizirani, može se dopuštenom brzinom povećavati tlak, ali pri tom treba odvoditi manju količinu pare da se ne bi prekoračila dopuštena temperatura. Kad je proizvodnja pare tolika da zahtijeva kontinuirano napajanje kotla vodom, obustavi se pogon optočne pumpe.

Zbog visokih tlakova kotlovi se danas grade s *međupregrijavanjem*. To znači da se para koja je djelomično ekspandirala u turbinu ponovno dovodi u kotao i tu se ponovno pregrijava, najčešće do temperature svježe pare. Budući da su za međupregrijavanje potrebne visoke temperature, međupregrijači su obično smješteni u dijelu kotla gdje plinovi izgaranja imaju visoke temperature. Zbog toga je potrebno da se za vrijeme stavljanja kotla u pogon međupregrijači hlađe. Za hlađenje služi para koja se preko reduksijskog ventila dovodi iz visokotlačnog dijela kotla u međupregrijač, ili se uzima para iz međupregrijača susjednog kotla koji je već u pogonu.

Prije stavljanja kotla u pogon mora se iz međupregrijača potpuno odstraniti voda, jer bi inače voda mogla sprječiti strujanje pare kroz međupregrijač, što bi dovelo do nedopuštenog zagrijavanja. Shema spoja za stavljanje u pogon kotla s međupregrijačem prikazana je na sl. 25. U početku se para iz



Sl. 25. Shema spoja za stavljanje u pogon kotla s prirodnim strujanjem i međupregrijачem pomoću dovodenja pare iz susjednog kotla

pregrijaća ispušta u okoliš kroz visokotlačni ventil za stavljanje kotla u pogon, a međupregrijач se hlađi parom iz susjednog kotla. Nakon što se pregrijач ispuše, para se iz kotla dovodi preko reduksijskog ventila u međupregrijач, a obustavi se dovod pare iz susjednog kotla. Temperatura pare za međupregrijач regulira se hladionikom smještenim iza reduksijskog ventila.

Umjesto da se para ispušta u okoliš, ona se može dovoditi u posebni kondenzator za stavljanje u pogon ili u turbineski kondenzator, tako da se ona prije ulaska u kondenzator ohladi ubrizgavanjem napojne vode.

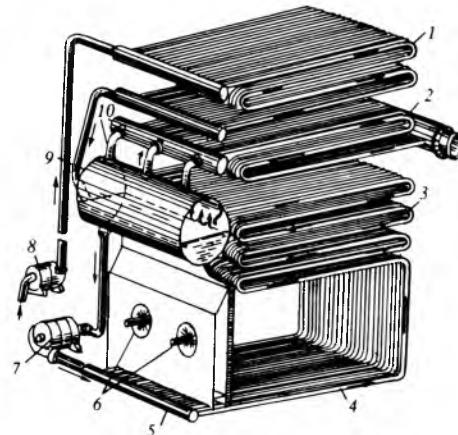
**Kotlovi s prisilnim strujanjem vode.** U kotlu s prisilnim strujanjem vode posebna cirkulacijska pumpa tjeru vodu kroz cijevi za isparivanje. Dok u kotlu s prirodnim strujanjem raspored cijevi za isparivanje mora omogućiti prirodnu cirkulaciju vode, u kotlu s prisilnim strujanjem mogu se cijevi za isparivanje postaviti prema raspoloživom prostoru, što znači da se i vanjski oblik kotla, tj. njegova duljina, širina i visina mogu odabratи već kako je najpovoljnije. Nadalje, cijevi za isparivanje mogu biti malog promjera i savijene s malim polumjerom savijanja, jer povećani otpor strujanju vode lako svlada cirkulacijska pumpa. To je važno zbog toga što se s gusto savijenim cijevima malog promjera mogu postići velike ogrjevne površine isparivanja, a male težine. Radi sigurnosti pogona, kotlovi s prisilnim strujanjem vode imaju jednu ili dvije glavne i rezervne cirkulacijske pumpe.

**Kotao tipa La Mont** (sl. 26) s višekružnom cirkulacijom vode najpoznatiji je i danas najviše upotrebljavani tip kotla s prisilnim strujanjem. Iz stojećeg ili ležećeg bubnja voda dotječe u cirkulacijsku pumpu (sl. 27). Cirkulacijska pumpa tlači vodu u cijevi za isparivanje koje se u ložištu zagrijavaju zračenjem, a u gornjim dijelovima kotla konvekcijom. Da bi se osigurala ravnomjerna podjela vode u paralelno spojene cijevi, one imaju na početku ugrađenu sapnicu s podešivim otvorom za reguliranje protoka vode. Da bi se svaldali otpori strujanja u cijevima i postigla potrebna brzina protoka vode, tlak vode iz cirkulacijske pumpe viši je 2...2,5 bar od tlaka u bubnju.

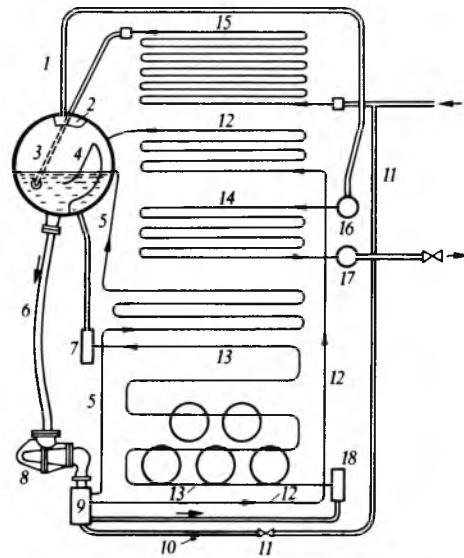
Smjesa vode i pare odlazi neposredno ili preko sabirnih komora u bubnje, gdje se para odjeljuje, a voda ponovno dotjeće u cirkulacijsku pumpu i nastavlja optočno strujanje. Optočni omjer, tj. broj optoka kroz cirkulacijsku pumpu, isparivača i bubnja, koji je potreban da određena količina vode

potpuno ispari, iznosi 4...10. Za kotlove većeg učina vrijedi manji optočni omjer. Zasićena para odvodi se iz bubnja u pregrijać, a zatim preko sabirne komore i zapornog ventila odlazi u parnu turbinu.

Napoja pumpa tlači preko zagrijaća napojnu vodu u bubanj kotla. Budući da se cijevi za isparivanje ne mogu mehanički čistiti, napojna voda mora biti vrlo dobro pripremljena. Sustav s automatskim pretlačnim ventilima osigurava, kad se naglo smanji opterećenje kotla a time i dobava napojne vode, da cirkulacijska pumpa šalje vodu i u napojni vod pa tako sprečava da pregore cijevi zagrijaća napojne vode.



Sl. 26. Brodski kotao La Mont s prirodnom cirkulacijom vode. 1 zagrijać napojne vode, 2 pregrijać pare, 3 konvektivna ogrevna površina, 4 ozračena ogrevna površina, 5 razdjeljna komora isparivača, 6 plamenici, 7 cirkulacijska pumpa, 8 napojna pumpa, 9 parni bubanj, 10 razdjeljna komora pregrijaća

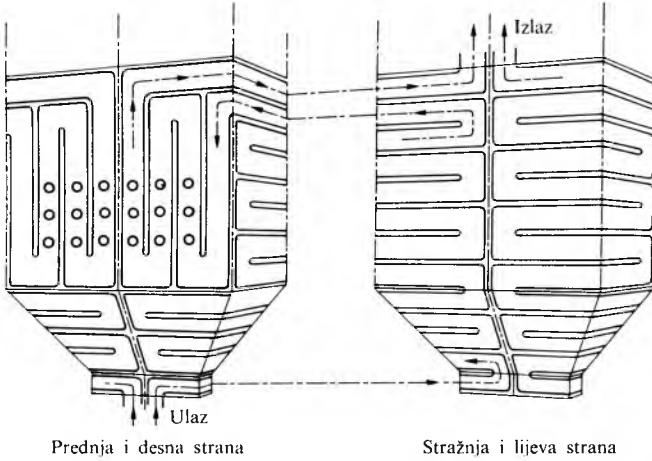


Sl. 27. Shema kotla La Mont s kružnim prisilnim strujanjem vode. 1 odvod zasićene pare, 2 košara odvoda zasićene pare, 3 parni bubanj, 4 pregradni lim, 5 konvektivni isparivač I, 6 usisni vod, 7 sabirna komora stražnje ekranске stijene, 8 cirkulacijska pumpa, 9 glavna razdjeljna komora, 10 spojna cijev s napojnim vodom, 11 automatski pretlačni ventil, 12 konvektivni isparivač II, 13 cijevi stražnje ekranске stijene, 14 pregrijać pare, 15 zagrijać napojne vode, 16 razdjeljna komora pregrijača, 17 sabirna komora i izlaz iz pregrijaća, 18 razdjeljna komora stražnje ekranске stijene

Kotao s prisilnim strujanjem pogodan je za pogon s malim opterećenjima jer je strujanje vode u njemu jednoznačno određeno, što se pri malim opterećenjima ne postiže u kotlovima s prirodnim strujanjem.

U Evropi se kotlovi tipa La Mont upotrebljavaju najviše kao brodski kotlovi, a u SAD i Velikoj Britaniji izgrađeno je poslije drugoga svjetskog rata mnogo takvih kotlova u termoelektranama za tlakove od 130...180 bar i za temperature pare do 575 °C.

**Protočni kotlovi.** Posebna vrsta kotlova s prisilnim strujanjem jesu protočni kotlovi u kojima se tokom samo jednog optoka zagrije i ispari voda i pregrije para (jednostruki prolaz vode). Ti kotlovi nemaju parnog bubnja, jer sva voda pređe u zasićenu paru u ekranima ložišta kotla, pa se para neposredno ili preko sabirnika odvodi u pregrijač i zatim u parnu turbinu. Ekrani ložišta sastoje se od vrlo dugačkih cijevi položenih u

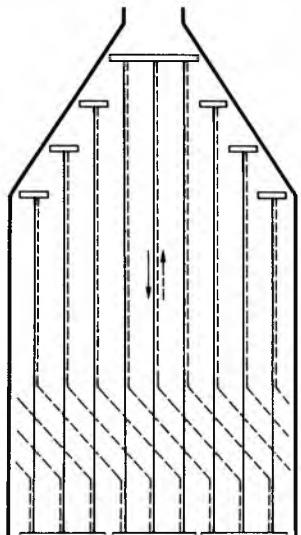


Sl. 28. Ekransko ložište sastavljeno od cijevnih traka

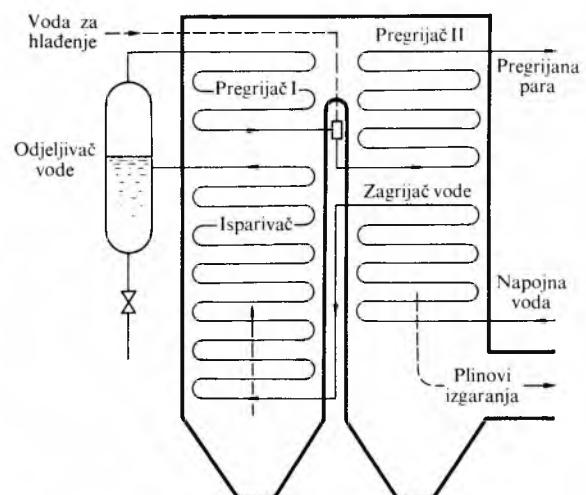
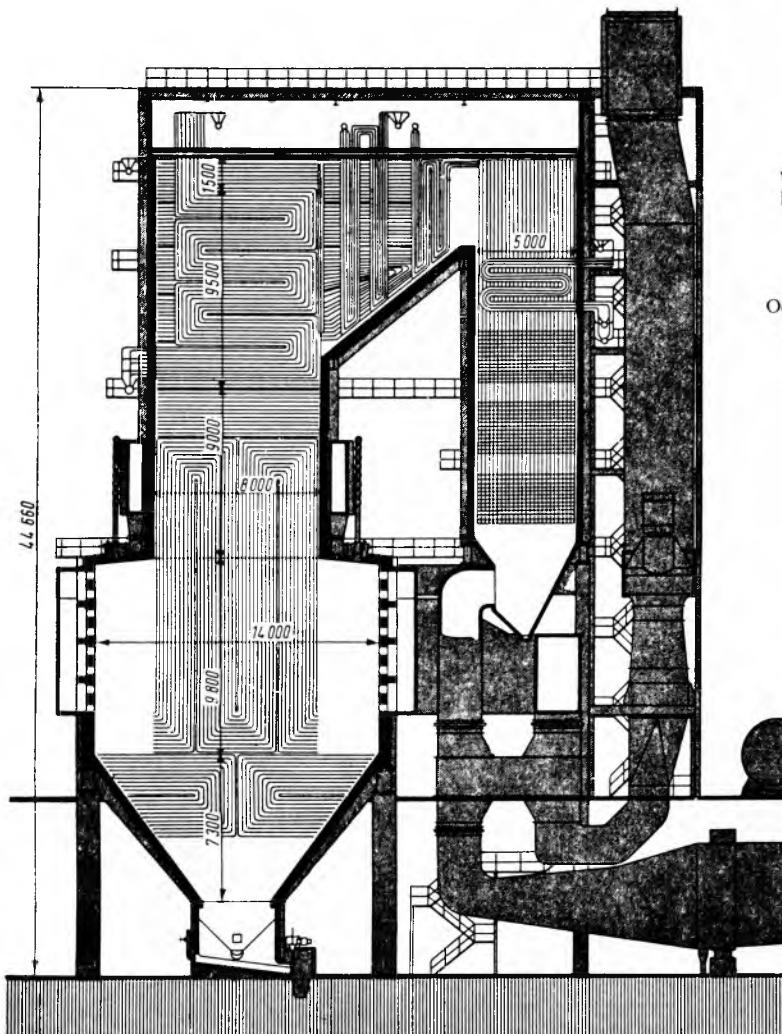
obliku traka (sl. 28) ili od sustava uzlaznih i silaznih cijevi (sl. 29) gdje se toplina dovodi samo uzlaznim cijevima, dok silazne cijevi služe kao spoj među trakama uzlaznih cijevi. Budući da voda i smjesa vode i pare struji kroz cijevi uvijek samo u jednom smjeru, ti se kotlovi nazivaju i jednosmjernima. Prisilno strujanje vode i smjese vode i pare proizvodi napojna pumpa.

Među najpoznatije tipove protočnih kotlova spadaju Sulzerov jednocijevni kotao i Bensonov kotao.

**Sulzerov kotao** u principu se sastoji od jedne cijevi u kojoj se, prolazeći kroz kotao, voda zagrijava i isparuje, a para se pregrijava (sl. 30). Budući da su to kotlovi većeg učina, najčešće se više takvih cijevi spaja paralelno u cijevne trake ili u sustav uzlaznih i silaznih cijevi (sl. 31). Na početku svake takve cijevi, a na izlazu iz zagrijivača vode, ugrađen je prigušni ventil koji



Sl. 29. Ekransko ložište sastavljeno od uzlaznih i silaznih cijevi

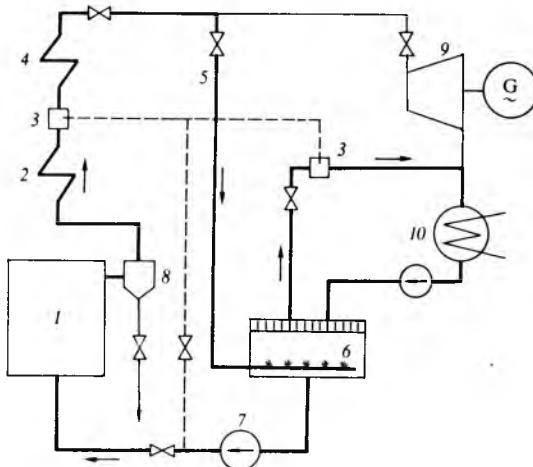


Sl. 31. Sulzerov kotao: učin 510 t/h, tlak 176 bar, temperatura iza pregrijača 570 °C, međupregrijavanje 545 °C

osigurava jednoliku raspodjelu vode u paralelno spojenim grana-  
ma. Uz to se u jednoj od grana nešto više priguši dovod  
vode, pa se na kraju cijevi postiže  $\sim 20^{\circ}\text{C}$  viša temperatura  
pare. Promjene temperature u toj grani služe kao impulsi za  
regulaciju napajanja kotla. Osim toga, svaka cijev ima na kraju  
termostat za kontrolu temperature, pa se svaka grana može  
odabrati kao vodeća za regulaciju napajanja. Da ne bi bilo  
previše prigušnih ventila i termostata, ugrađuje se manje cijevi  
većeg promjera. Međutim, za visoke je tlakove ograničeno po-  
većanje promjera cijevi, jer bi im stijenke postale sviše debele.  
Zato se za visoke tlakove i velike učine spaja po 4...5 cijevi  
manjeg promjera u grupe sa zajedničkim prigušnim ventilom i  
termostatom.

Na izlazu iz isparivača para sadrži 2...4% vlage i prije  
ulaska u pregrijać prolazi kroz odjeljivač vode, koji je karakterističan dio Sulzerova kotla. U odjeljivaču se s vodom odstranjuju i preostale soli. Regulacijom napajanja, već prema opterećenju kotla, održava se konstantan tlak u odjeljivaču vode,  
što omogućuje povoljno polazno stanje za regulaciju temperature  
pregrijane pare. Međutim, pri tom su potrebne relativno velike  
količine vode za ubrizgavanje u pregrijanu paru ako se želi  
održati konstantna temperatura pregrijane pare za cijeli raspon  
mogućih opterećenja kotla. Odjeljivač vode sprečava da voda  
prodre u cijevi pregrijaća, a time i naglu promjenu temperatu-  
re materijala pregrijaća kad se kotao stavlja u pogon ili kad  
se prestane ložiti.

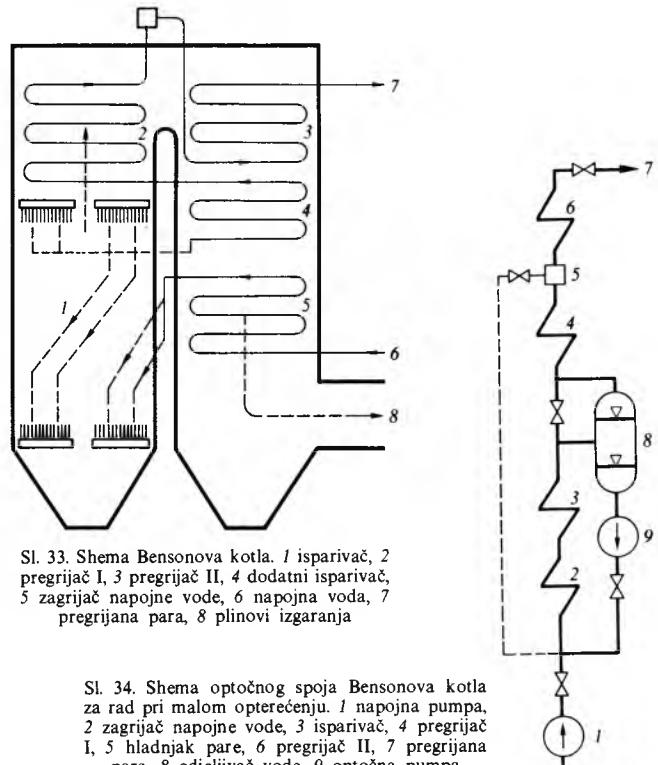
Kotao se stavlja u pogon stalnim protokom neke minimalne  
količine vode, koja osigurava hlađenje svih paralelno spojenih  
cijevi i stabilno strujanje. U početku grijanja izlazi iz kotla  
samo voda, zatim smjesa vode i pare, pa zasićena i, konačno,  
pregrijana para. Prije stavljanja u pogon cijeli se kotao odzrači  
otvaranjem ventila za odzračivanje, a prije potpaljivanja na-  
pojnom se pumpom osigura strujanje vode kroz zagrijaće vode,  
isparivač i pregrijać (sl. 32), da bi se nakon potpaljivanja sigurno  
hladile sve ogrjevne površine. Ventil je pred turbinom zatvoren,  
a voda, smjesa vode i pare te para prolaze kroz obilazni vod  
u spremniku napojne vode, a para se iz tog spremnika odvodi  
u turbinski kondenzator. Kad para dostigne nazivni tlak i nazivnu  
temperaturu, otvara se turbinski ventil. S povećanim dovođenjem  
pare turbinu zatvara se postepeno ventil za obilazni vod.



Sl. 32. Shema spoja za stavljanje u pogon Sulzerova kotla bez međupregrijavanja. 1 kotao, 2 pregrijač I, 3 hladionik pare, 4 pregrijač II, 5 obilazni vod (by-pass), 6 spremnik napojne vode, 7 naporna pumpa, 8 odjeljivač vode, 9 turboagregat, 10 turbinski kondenzator

*Bensonov kotao* pravi je protočni kotao; sve su cijevi međusobno neposredno spojene jer nema odjeljivača vode na pri-  
jelazu iz isparivača u pregrijač pare (sl. 33). Treba naglasiti da  
pri pogonskom tlaku od 200 bar na izlazu iz kotla voda nepo-  
sredno prelazi u paru, jer u kotlu zbog gubitaka tlaka vlada  
natkritični tlak, pa je tada odjeljivač vode sasvim nepo-  
treban. Dugo vremena je dodatni isparivač ispred pregrijača  
bio karakteristika Bensonova kotla. Taj se dodatni isparivač

postavlja da se u njemu istaloži ostatak soli, tj. da se spriječi  
nakupljanje soli u pregrijajuću. S poboljšanjem postupka za  
pripremu vode sadržaj soli u napojnoj vodi opao je na manje  
od  $2 \text{ g/m}^3$ , a tolike su količine topljive i u pari, osobito pri  
tlakovima višim od 160 bar. Zato moderni Bensonovi kotlovi  
više nemaju dodatni isparivač.



Sl. 33. Shema Bensonova kotla. 1 isparivač, 2 pregrijač I, 3 pregrijač II, 4 dodatni isparivač, 5 zagrijać napojne vode, 6 napojna voda, 7 pregrijana para, 8 plinovi izgaranja

Sl. 34. Shema optičnog spoja Bensonova kotla za rad pri malom opterećenju. 1 naporna pumpa, 2 zagrijać napojne vode, 3 isparivač, 4 pregrijač I, 5 hladnjak pare, 6 pregrijač II, 7 pregrijana para, 8 odjeljivač vode, 9 optična pumpa

Pri malim opterećenjima kotla nastaje problem hlađenja  
cijevi isparivača jer kroz njih struji relativno mala količina vode.  
Protok vode može se povećati ugradnjom dodatnih silaznih  
cijevi većeg promjera, ali je ta mogućnost ograničena kon-  
strukcijskim razlozima. Zato se u kotlove velikih učina (više  
od  $500 \text{ t/h}$ ), koji se moraju osposobiti za pogon s malim  
opterećenjima, postavljaju posebne optične pumpe s odjeljiva-  
čem vode (sl. 34). Optična pumpa radi za vrijeme malih  
opterećenja, pa se tako povećava protok vode kroz isparivač.

## GORIVO

Za parne kotlove upotrebljavaju se prirodna, oplemenjena ili umjetna goriva, koja pri normalnoj temperaturi mogu biti u čvrstom, tekućem ili plinovitom stanju. Sva se ta goriva međusobno razlikuju prema ogrjevnoj moći i prema karakteristikama izgaranja.

*Prirodna goriva* se dobivaju neposredno iz prirodnih nala-  
zišta, kao npr. različite vrste ugljena, lignit, sirova nafta, zemni  
plin itd. Različitim postupcima mogu se iz prirodnih goriva  
odstraniti štetni sastojci i primjese, pa se tako dobiju *opleme-  
njena goriva*. *Umjetna goriva* su bilo primarni proizvod, bilo  
nusproizvod određenih tehnoloških procesa, kao npr. koks, sintetska  
tekuća goriva, generatorski plin itd.

*Ogrjevna moć* goriva jest količina topline koju odaje jedinica  
mase ili volumena goriva potpunim izgaranjem pod normalnim  
uvjetima. Za čvrsta i tekuća goriva izražava se u  $\text{J/kg}$ , a za  
plinovita goriva u  $\text{J/m}^3$ . Ogrjevna moć mnogo ovisi o sastavu  
goriva i uvjetima izgaranja, pa za istu vrstu goriva može varirati  
u širokim granicama. U parnom kotlu sva voda i vлага  
sadržana u gorivu ispari i nekondenzirana odlazi s dimnim  
plinovima u atmosferu. Zato se za goriva parnih kotlova uvijek  
računa s donjom ogrjevnom moći goriva  $H_d$ , za razliku od  
gornje ogrjevne moći  $H_g$ , koja je nešto veća jer uključuje i  
topljinu oslobođenu kondenzacijom vodene pare.

Najvažnije karakteristike izgaranja goriva jesu zapaljivost, brzina izgaranja, temperatura plamena i svjetlosna jakost plamena.

Način izvedbe ložišta kotla ovisi o ogrjevnoj moći i karakteristikama izgaranja goriva, pa se i konstrukcija kotla mora prilagoditi tim svojstvima goriva.

### Čvrsta goriva

Najvažnija čvrsta goriva za parne kotlove jesu ugljen i lignit, ali se ponegdje kao gorivo upotrebljava i treset, a u posljednje vrijeme industrijski i gradski otpad.

**Ugljen.** Osnovni sastav svih vrsta ugljena jest čista goriva tvar i suvišne tvari. Iz rudnika se dobiva ugljen koji sadrži vlagu i pepeo kao balastne tvari. Sušenjem ugljena na normalnoj temperaturi od  $15\text{--}25^{\circ}\text{C}$  i grijanjem na temperaturi od  $106\pm 2^{\circ}\text{C}$  dobiva se suhi ugljen. Za parne se kotlove u svakodnevnoj primjeni ugljen potpuno ne suši, nego samo do nekog određenog postotka vlage. Otklone li se iz ugljena suvišne tvari, tj. pepeo i voda, ostane čista goriva tvar koja sadrži čvrsti (fiksni) ugljik i ostale sastojke koji se sastoje od spojeva ugljika, kisika, sumpora i dušika koji pri izgaranju prelaze u plinove (plinoviti sastojci). Vodena para nije uključena u te sastojke.

Prema standardima JUS B.H0.001 jugoslavenski su ugljeni razvrstani u tri skupine:

*1. Kameni ugljen* sadrži malo vlage, sadržaj pepela mu je različit u širokim granicama, a potječe iz starijih geoloških formacija. Prema plinovitom sadržaju razlikuju se podskupine kamenog ugljena: a) *plinski ugljen* s plinovitim sadržajem od 35...50%; b) *masni* (srednji) ili *koknski ugljen* s plinovitim sadržajem od 19...35%; c) *mršavi ugljen* s plinovitim sadržajem od 10...19%.

*2. Mrki ugljen* ima različit sadržaj vlage i pepela, a potječe iz novijih tercijarnih geoloških formacija. Plinoviti mu je sadržaj 50...60%, mrke je strukture i sjajne površine loma.

*3. Lignite* ima veliki sadržaj vlage i pepela. Najmlađa je vrsta ugljena sa 50...70% plinovita sadržaja i s vlaknastom drvenom strukturon.

U tabl. 2 prikazane su osnovne karakteristike i sastav jugoslavenskih ugljena i lignita.

*Otpadna goriva.* U posljednje se vrijeme kao gorivo za parne kotlove sve češće upotrebljavaju otpadne tvari, a osobito gradski otpad. Glavni razlog tome je zaštita čovjekova okoliša od onečišćenja, ali nakon golemog poskupljenja nafte 1970-ih godina i ekonomski je faktor postao važan.

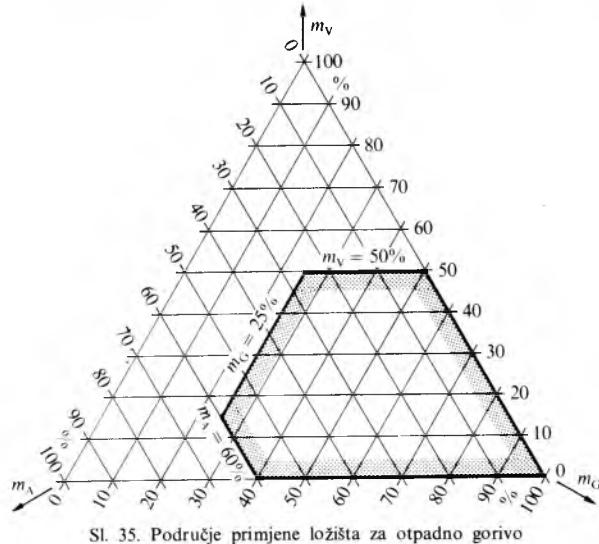
Ogrjevna moć  $H_d$  otpadnih goriva ovisi o mnogo faktora, a iznosi 3,3...6,3 MJ/kg. Na osnovi ispitivanja izgaranja otpadnih goriva postavljene su osnovne granice koje moraju zadržavati sastav tih goriva da bi ona mogla izgarati bez dodatka loživog ulja ili nekog gorivog plina. Te su granice:

Tablica 2  
SASTAV I OSNOVNE KARAKTERISTIKE UGLJENA I LIGNITA

Oznaka vrste i rudnika ugljena	Karakteristike ugljena								Karakteristike pepela			
	Ukupna vлага $m_V$ %	Gruba vлага $m_V$ g %	Pepeo $m_A$ %	Plinoviti sastojci $m_{\text{pls}}$ %	Udio C $m_C$ %	Udio H $m_H$ %	Udio O + N $m_{O+N}$ %	Udio S (ukupni) $m_S$ %	Donja ogrevna moć $H_d$ kJ/kg	Temperatura omešanja °C	Temperatura taljenja °C	Temperatura tečenja °C
<i>Kameni ugljeni</i>												
Aleksinac	6,47		22,80	53,39	53,10	3,50	5,4	8,72	22130			
Crnotimočki bazen												
Rtanj	0,42	30,57	19,45		53,4	2,92	2,53	10,18	22360	1250	1360	1380
Ibarski bazen	1,92	20,81	31,10		62,95	4,55	2,66	7,39	27200	1170	1280	1310
Knjaževački bazen												
Dobra Sreća												
Raša	5,86		20,15	26,50	55,11	3,61	6,65	8,62	22940			
	5,20		12,20	44,10	65,10	4,90	5,70	8,90	27995			
<i>Mrki ugljeni</i>												
Banovići	19,40	11,40	21,05	30,65	42,10	3,50	12,4	1,35	17000	1075	1230	1245
Breza	18,40		19,83	31,32	44,14	3,29	11,87	2,47	17000	1150	1215	1235
Golubovečki bazen	17,20	11,00	25,10	29,10	41,60	3,60	9,50	3,60	15600			
Kakanj	12,10	7,10	24,20	29,90	43,6	4,30	9,0	1,75	17800	1150	1215	1333
Kanižarica	25,98		25,38	30,0	31,40	2,50	13,5	1,24	11840			
Kočevje	24,05		16,69	37,45	39,10	2,90	16,0	1,26	14250			
Mezograja	27,10		18,46	32,95	38,75	3,19	10,10	2,39	14200	1170	1340	1360
Mostar	12,21		23,80	31,26	42,92	3,25	14,24	3,58	16420			
Senjsko-resavski bazen (Resava)	18,86		6,30	59,16	54,26	3,41	16,79	0,38	19550			
Siverić	30,0		20,0	37,0	35,21	3,17	9,18	2,24	13980			
Trbovlje	24,02		18,72	33,20	39,70	3,00	12,20	2,36	14620			
Vrdnik	18,24		23,88	26,96	41,78	3,07	12,47	0,39	15600			
Zagorje	25,11		14,76	33,10	42,50	3,50	13,30	0,83	15620			
Ugljevik	32,20		9,21	39,32	3,78	12,03	3,46	12,65	14860	1170	1340	
Zenica	15,60		17,80	36,12	47,44	3,83			18000			
<i>Ligniti</i>												
Ivanec	36,6	25,60	22,8		24,0	2,10	13,3	1,20	8780			
Kočevje	26,02		13,65		29,50	3,0	16,2	1,53	14580			
Kolubara	30,40		12,55	33,78	39,25	2,82	14,34	0,6	13920			
Konjčinski bazen	46,55	39,0	18,18		22,35	1,90	9,40	1,0	7080			
Kosovski bazen I vrste	50,0		19,34	20,04	18,29	1,57	10,67		5240			
II vrste	48,7		12,05	23,14	26,94	1,95	10,23		8430			
Kostolac	46,62		12,82		27,95	2,39	13,48		9480	1030	1370	1420
Krapinski bazen	42,80	36,70	17,75	26,10	27,40	2,40	8,65	1,0	8360			
Kreka	39,20		17,24	43,56	30,18	2,43	10,24	0,21	10300			
Stubica	44,60	40,0	20,70	22,20	21,9	1,90	9,70	1,30	7540			
Velenje I vrste	42,0		11,70	27,60	29,60	2,30	13,4	1,0	9740			
II vrste	43,28		7,36	33,9	32,10	2,40	14,10	0,76	11080			
Zenica	20,60		18,56	33,20	43,45	3,56	10,97		16320			

sadržaj vlage  $m_v \leq 50\%$ , sadržaj pepela  $m_A \leq 60\%$  i sadržaj gorive tvari  $m_G \geq 25\%$ .

Na sl. 35 prikazana su područja upotrebljivosti otpadnih goriva prema sadašnjim iskustvenim vrijednostima, odnosno prikazana je dopuštena količina vode i pepela te minimalna količina gorive tvari u otpadnom gorivu da bi se izgaranje moglo neprekinuto odvijati bez dodatka nekog boljeg goriva.



Sl. 35. Područje primjene ložišta za otpadno gorivo

### Tekuća goriva

Tekuća prirodna goriva dobivaju se frakcijskim destilacijama zemnog ulja i iz uljnih škriljavaca, a tekuća umjetna goriva preradbom ugljena. Teške frakcije dobivene destilacijom zemnog ulja, tj. ulja za loženje ili mazuti, upotrebljavaju se danas kao osnovno gorivo u parnim kotlovima. Za inicijalno (početno) loženje parnog kotla upotrebljavaju se dizelska goriva i ostala laka goriva.

Kvalitete ulja za loženje određene su propisima, a fizikalne i toplinske karakteristike te analize ulja prema standardima JUS i DIN prikazane su u tabl. 3 i 4.

Tablica 3  
FIZIKALNE I TOPLINSKE KARAKTERISTIKE ULJA ZA LOŽENJE  
PREMA PROPISIMA JUS

JUS	Vrsta ulja za loženje	Kinematicka viskoznost pri 50 °C $\text{m}^2/\text{s}$	Temperatura plamšta °C	Temperatura stinjšta °C	Maseni udio sumpora $m_S\ %$	Maseni udio vode $m_v\ %$	Maseni udio pepela $m_A\ %$
B.H2.430	specijal (LS5)	$45,2 \cdot 10^{-4}$	65	-5	2,0	0,5	0,2
B.H2.440	lako (L5)	$98,8 \cdot 10^{-4}$	56	+10	3,5	1,5	0,4
B.H2.441	srednje (L6B)	$235 \cdot 10^{-4}$	80	+30	3,5	2,0	1,0
B.H2.442	teško (L6)	$64,5 \cdot 10^{-4}$ pri 400 °C	80	-	-	2,5	1,1

### Plinovita goriva

Plin je idealno gorivo za parne kotlove, jer se vrlo lako dovede plinovodom do parnog kotla, plinovito gorivo ima visoku ogrjevnu moć, lako se stvara dobra mješavina plina i zraka za izgaranje uz gotovo teorijski pretičak zraka, uređaji za izgaranje (plinski gorionici) vrlo su jednostavnii, izgaranje je potpuno a temperature izgaranja su visoke, te plinovito gorivo ne sadrži suvišnih tvari.

Zemni plin ima 85...98% metana ( $\text{CH}_4$ ), ~5% teških ugljikovodika  $\text{C}_x\text{H}_y$  i donju ogrjevnu moć ~36 000 kJ/m<sup>3</sup>. Plin iz naftonosnih izvora ima visoku ogrjevnu moć od ~55 000 kJ/m<sup>3</sup> jer sadrži veći udio teških ugljikovodika.

Postoji mnogo umjetnih plinovitih goriva, npr. plin visokih peći, koksni plin, generatorski plin, voden plin i različite vrste

Tablica 4  
FIZIKALNE I TOPLINSKE KARAKTERISTIKE ULJA ZA LOŽENJE  
PREMA PROPISIMA DIN

Vrsta ulja (prema DIN 51603)	Gustoća kg/m <sup>3</sup>	Sastav, %				Donja ogrevna moć $H_d$ kJ/kg
		$m_C$	$m_H$	$m_{O+N}$	$m_S$	
Vrlo lako (EL)	840	85,9	13,0	0,4	0,7	42700
Lako (L)	880	85,5	12,5	0,8	1,2	42100
Srednje (M)	920	85,3	11,6	0,6	2,5	40700
Teško (S)	970	84,0	11,0	1,11...0,39	3,5	40200
Vrlo teško (ES)	970	—	—	—	—	38500
Katransko ulje (kameni ugljen)	1020...1100	89,8	6,5	1,7...1,2	0,8	37700
Katransko ulje (mrki ugljen)	925	84,0	11,0	4,3	0,7	40250

plinova dobivenih rasplinjavanjem ugljena. Ogrjevna moć plinovitih goriva određuje se kalorimetrom, ili računski ako je poznat kemijski sastav plina.

### IZGARANJE U LOŽIŠTU

Osnovni zakoni o kemijskim reakcijama izgaranja, o stehiometrijskim odnosima izgaranja, o količini zraka za izgaranje, o prijelazu topline, o proizvodima izgaranja itd. prikazani su u članku *Termodynamika*. U ovom je članku objašnjena samo primjena tih osnovnih zakona na toplinske procese u parnom kotlu i u njegovim glavnim sklopovima.

### Fizikalni uvjeti izgaranja

Za vrijeme izgaranja u ložištu parnog kotla gorivo prolazi kroz četiri faze: sušenje, isplinjivanje, rasplinjivanje i izgaranje čvrstog ugljika i plinovitih sastojaka.

Kad gorivo sadrži visok postotak vlage, za sušenje je potreban velik volumen ložišta. Zato se lignit i ostala otpadna biljna goriva suše ili prije unošenja u kotao (sušenje ugrij

janim zrakom ili plinovima izgaranja dovedenim iz kotla), ili u kotlu zračenjem topline u komori izgaranja.

Nakon sušenja gorivo isplinjuje i pri tom djelovanjem topline lako hlapljivi ugljikovodici prelaze u plinovito stanje. Početak isplinjavanja djelomično se vremenski preklapa sa sušenjem goriva, a svrsetak se isplinjivanja u nekim ložištima preklapa s izgaranjem dijela plinovitih sastojaka. Za isplinjivanje nije potreban zrak.

Za rasplinjivanje i izgaranje čvrstog ugljika mora se dovoditi dovoljna količina zraka. Da se u što kraćem vremenu osigura potpuno rasplinjivanje i izgaranje čvrstih dijelova goriva, treba postići veliku razliku između brzine strujanja zraka i čestica goriva.

U završnoj četvrtoj fazi izgaraju plinovi nastali isplinjivanjem i rasplinjivanjem. To je posljedica snažnog vrtloženja

smjese plinova i zraka, pobuđenog plamenom. Da bi se pojačalo vrtloženje, izvode se posebne konstrukcije ili se na poseban način dodaje zrak. Ako gorivo sadrži veću količinu hlapljivih sastojaka, korisno je dovoditi u ložište dodatne količine zraka (*sekundarni zrak*).

Konstrukcijom kotla nastoji se izgaranje svesti na najkraće moguće vrijeme i u što manjem prostoru, te što bolje iskoristiti plamen za prijelaz topline zračenjem na ogrjevne površine smještene u komori izgaranja. Plinovi izgaranja moraju se već u ložištu toliko ohladiti da čestice pepela koje plinovi nose sa sobom ne budu više ljepljive kad dođu u dodir s ogrjevnim površinama izvan komore izgaranja.

Najlakše je postići potpuno izgaranje plinovitih goriva, jer se prikladnim plamenicima ostvaruje brzo i intenzivno miješanje plina i zraka. Rasprskavanjem tekućih goriva dobivaju se velike površine za kemijske reakcije među sastojcima goriva i kisika, pa tako i brzo potpuno izgaranje bez stvaranja čađe.

Za razliku od čestica tekućih goriva, koje imaju određenu površinsku napetost, čestice ugljena su porozne, tako da se i unutrašnje površine pora mogu uračunati u površine na kojima nastaju reakcije. Temperatura paljenja ugljena ovisi o sadržaju plinovitih sastojaka i iznosi  $500\text{--}800^\circ\text{C}$  za ugljen sa  $10\text{--}60\%$  plinovitih sastojaka. Pri temperaturama nižim od  $700^\circ\text{C}$  paljenje nije stabilno, pa je uvjet za siguran tok izgaranja da temperature budu u području izgaranja stalno više od  $700^\circ\text{C}$ .

*Sadržaj pepela* također utječe na proces izgaranja. Njegovi sastojci dobro pomiješani s gorivima mogu znatno ometati kemijske reakcije. Pri visokom postotku pepela potrebeni su uređaji za odvođenje pepela i troske iz ložišta.

**Toplinsko opterećenje ložišta.** Osnovna jednadžba o održanju energije, primijenjena na ložište parnog kotla, u pojednostavnjenoj obliku glasi:

$$dQ_B = V_{pl,\lambda} dh + dQ_z \quad (1)$$

gdje je  $Q_B$  količina topline dovedena gorivom u ložište,  $V_{pl,\lambda}$  stvarni volumen dimnih plinova u ložištu proizведен u jedinicama vremena,  $h$  sadržaj topline (entalpija), a  $Q_z$  toplina odvedena zračenjem od volumena plamena i dimnih plinova u ložištu.

Za trajanje procesa od 0 do  $t$ , tj. od stanja 1 do stanja 2, integracija jednadžbe (1) daje

$$Q_B = V_{pl,\lambda}(h_2 - h_1) + Q_z \quad (2)$$

Taj izraz pokazuje da količina topline proizvedena u ložištu izgaranjem goriva služi za povećanje sadržaja topline dimnih plinova i za odavanje topline zračenjem ekranском cijevnom sustavu u ložištu.

U ložištu parnog kotla odvijaju se istodobno dva procesa: izgaranje goriva (pretvorba kemijske energije goriva u unutrašnju energiju dimnih plinova) i odavanje topline ekranском ogrevnjom sustavu (ogrjevnoj površini zračenja) u ložištu.

U osnovnom topinskem proračunu veličine (volumena) ložišta  $V_L$  primjenjuju se iskustveni faktori koje je teško računski odrediti. Intenzitet izgaranja određen je pojmom *toplinsko opterećenje ložišta*. Toplinsko opterećenje ložišta po jedinici volumena definirano je sa

$$q_L = \frac{Q_B}{V_L}, \quad (3)$$

a vrijednosti su prikazane u tabl. 5.

Tablica 5

VRIJEDNOSTI TOPLINSKOG OPTEREĆENJA VOLUMENA LOŽIŠTA  $q_L$

Ložište s izgaranjem u sloju (rešetke)	$(116\text{--}370) \cdot 10^3 \text{ W/m}^3$
Ložište s izgaranjem u prostoru (mlinsko ložište) s odvodom nerastaljene troske	$(104\text{--}487) \cdot 10^3 \text{ W/m}^3$
Ložište s izgaranjem u prostoru s odvodom rastaljene troske	$(508\text{--}1116) \cdot 10^3 \text{ W/m}^3$
Ciklonsko ložište	$(1740\text{--}5800) \cdot 10^3 \text{ W/m}^3$
Ložište za izgaranje tekućih goriva	$(348\text{--}2320) \cdot 10^3 \text{ W/m}^3$
Ložište za izgaranje plinovitih goriva	$(348\text{--}11600) \cdot 10^3 \text{ W/m}^3$

Osnovni faktori što utječu na vrijednosti toplinskog opterećenja ložišta i zbog kojih je raspon tih vrijednosti tako širok jesu: a) vrsta i sastav goriva (čvrsto, tekuće, plinovito), ogrjevna moć  $H_d$  i ostale karakteristike goriva; b) sadržaj plinovitih sastojaka u čvrstom gorivu; c) temperatura sinteriranja, omekšanja, taljenja, tečenja i isplinjivanja troske i pepela; d) geometrijski oblik ložišta, odnosno način izgaranja čvrstog goriva, tj. da li je izgaranje u sloju ili u prostoru i da li se pri izgaranju u prostoru odvodi rastaljena troska; e) aerodinamički uvjeti strujanja zraka i dimnih plinova u ložištu, te raspodjela primarnog, sekundarnog i tercijarnog zraka; f) raspodjela temperaturnih polja u ložištu, odnosno tok krivulja iste temperaturne razine u ložištu.

**Vrijeme izgaranja goriva** može se izračunati i prema pretpostavljenom ili iskustvenom toplinskom opterećenju ložišta  $q_L$ :

Ako se zanemari da tlak u ložištu može biti i veći od  $0,101 \text{ MPa}$ , stvarni volumen dimnih plinova proizvedenih u sekundi u ložištu iznosi

$$V_{pl,\lambda} = \frac{B(1 - q_G)v_{pl,\lambda}T}{273}, \quad (4)$$

gdje je  $B$  količina goriva dovedena u ložište,  $q_G$  toplinski gubici neizgorjele tvari u ložištu,  $v_{pl,\lambda}$  stvarni volumen dimnih plinova nastalih izgaranjem  $1 \text{ kg}$  goriva, a  $T$  apsolutna temperatura dimnih plinova. Uz pretpostavku da se dimni plinovi zadržavaju u ložištu samo tako dugo koliko je potrebno za potpuno izgaranje, vrijeme izgaranja (zadržavanja) dimnih plinova u ložištu, izraženo u sekundama, iznosi

$$\tau = \frac{V_L}{V_{pl,\lambda}}. \quad (5)$$

Ako se u (5) uvrsti izraz za volumen ložišta  $V_L$  koji proizlazi iz jednadžbe (3) i izraz za stvarni volumen dimnih plinova proizvedenih u sekundi  $V_{pl,\lambda}$  prema izrazu (4), dobiva se da je vrijeme izgaranja

$$\tau = \frac{273 Q_B}{q_L B(1 - q_G)v_{pl,\lambda} T}. \quad (6)$$

Jednadžba (6) pokazuje da je vrijeme izgaranja  $\tau$  to kraće što je jedinični volumen dimnih plinova  $v_{pl,\lambda}$  veći, što je temperatura dimnih plinova  $T$  viša i što je toplinsko opterećenje ložišta  $q_L$  veće.

Prema izvedbi ložišta dimni plinovi u ložištu struje ili prema gore, ili prema dolje, što utječe na vrijeme izgaranja  $\tau$ . Ako dimni plinovi struje prema gore, čestica goriva ima tendenciju relativno sporijeg gibanja prema dolje nego ako dimni plinovi struje prema dolje, pa je u prvom slučaju vrijeme izgaranja  $\tau$  duže, a u drugome kraće nego što to proizlazi iz jednadžbe (6). Zbog toga treba iznos vremena izgaranja  $\tau$ , dobiven iz (6), pomožiti s korekcijskim faktorom  $m$  koji je za strujanje plinova prema gore veći, a za strujanje prema dolje manji od 1.

Dalja je korektura potrebna zbog toga što dimni plinovi i plamen ne ispunjuju potpuno volumen ložišta. Faktor popune ložišta  $\varphi$  dan je omjerom volumena dimnih plinova  $V_{pl,\lambda}$  i volumena ložišta  $V_L$ . Za ložišta za čvrsto gorivo  $\varphi = 0,8\text{--}1,0$ ,

Tablica 6  
TEMPERATURE PALJENJA KRUTIH, TEKUĆIH I PLINOVITIH GORIVA

Gorivo	Temperatura paljenja °C	Gorivo	Temperatura paljenja °C
<i>Kruta goriva</i>		<i>Tekuća goriva</i>	
Drvo	220 .. 300	Benzin	330 .. 520
Treset	225 .. 280	Plinsko ulje	230 .. 250
Lignit	200 .. 240	Loživo ulje	210 .. 220
Mrki ugljen	200 .. 230	Umjetno ulje iz ugljena	260 .. 310
Kameni ugljen s velikim % plinovitih sastojina	210 .. 250	<i>Plinovita goriva</i>	
Kameni ugljen s malim % plinovitih sastojina	260 .. 340	CO	590
Antracit	480	$H_2$	450
Koks	420 .. 560	$CH_4$ (metan)	645

a za ložišta za tekuće gorivo  $\varphi = 0,5 \dots 1,0$ . U ložištima modernih parnih kotlova tehničko vrijeme izgaranja iznosi  $\tau = 0,1 \dots 1,6$  s.

Vrijeme paljenja goriva je kratko u usporedbi s vremenom izgaranja goriva i ovisi mnogo o temperaturi pri kojoj se gorivo upali. Zagrijavanjem zraka za izgaranje, koji se mijesha s gorivom, ubrzava se paljenje. Temperature paljenja čvrstih, tekućih i plinovitih goriva prikazane su u tabl. 6.

### Kontrola izgaranja

Proces izgaranja goriva u ložištu parnog kotla definira se proračunom stehiometrijskih odnosa izgaranja, utvrđivanjem potrebne količine zraka za izgaranje i faktora pretička zraka  $\lambda$  (tabl. 7), te određivanjem količine dimnih plinova. Kad se odredi toplinsko opterećenje ložišta  $q_L$  i vrijeme izgaranja  $\tau$ , određeni su i uvjeti za tok izgaranja u ložištu.

Tablica 7  
PREGLED VRIJEDNOSTI FAKTORA PRETİČKA ZRAKA ( $\lambda$ )

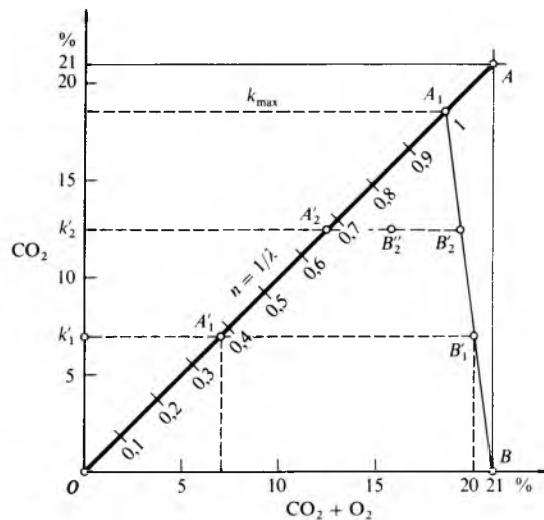
Vrsta ložišta (vrsta goriva)	Pretičak zraka $\lambda$
Ravna i kosa nepomična rešetka	1,7 - 1,8
Mehanička ravna rešetka za mrki i kameni ugljen (izgaranje u sloju)	1,3 - 1,6
Mehanička stepenasta (kosa) rešetka za mrki i ugljen i lignite (izgaranje u sloju)	1,3 - 1,7
Ložišta za ugljeni prah (izgaranje u prostoru)	1,25 - 1,35
— mrki ugljeni i ligniti	1,2 - 1,35
— kameni ugljeni (prema postotku plinovitih sastojina)	1,3 - 1,45
Ložišta za tekuća goriva	1,05 - 1,25
Ložišta za plinovita goriva	1,02 - 1,15
Ložišta za drveni otpad (stepenaste rešetke)	1,3 - 1,8
Ložišta za gradski otpad	1,8 - 2,2

S obzirom na stvarne pogonske uvjete rada parnog kotla, na velike i česte razlike u opterećenju, pa prema tome i na različite uvjete u kojima se odvija izgaranje, potrebno je stalno i neprekidno kontrolirati vrijednosti izgaranja. Neprekidnom kontrolom izgaranja utvrđuju se stvarni uvjeti rada parnog kotla, pa se oni regulacijom dovoda zraka i goriva uskladjuju s računski predviđenim vrijednostima. Tako se omjer zraka i goriva u procesu održava da bude optimalan, tj. da u dimnim plinovima ne bude ugljik-monoksida, a da sadržaj ugljik-dioksida i kisika bude primjeren optimalnoj količini zraka.

Sadržaj ugljik-dioksida u dimnim plinovima služi za provjeru i utvrđivanje vrijednosti izgaranja. Taj se sadržaj može jednostavno odrediti Orsatovim aparatom (v. Kemijska analiza, TE 7, str. 44), pa ako se znade elementarna analiza goriva, može se računski utvrditi pretičak zraka  $\lambda$ .

**Bunteov dijagram izgaranja** služi za približno ocjenjivanje kvalitete izgaranja (sl. 36). Ako izgara čisti ugljik, tada je za svaki pretičak zraka  $\lambda$  suma  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  konstantna veličina, tj. 21%, koliko i iznosi postotak kisika u zraku. Ako se na apsidi nanesu vrijednosti  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ , a na ordinati  $\text{CO}_2$ , pri izgaranju čistog ugljika dobije se točka  $A$  koja određuje  $k_{\max}$  (tj.  $\text{CO}_{2\max}$ ) pri potpunom stehiometrijskom izgaranju ugljika u ugljik-dioksid uz pretičak zraka  $\lambda = 1$ . Povuče li se pravac  $AO$ , točka  $A$  na tom pravcu označuje izgaranje s faktorom pretička zraka  $\lambda = 1$ , a točka  $O$  s pretičkom zraka  $\lambda = \infty$ . Ako se dužina  $OA$  podijeli na jednakе dijelove, dobije se mjerilo za različite pretičke zraka pri izgaranju čistog ugljika. Budući da se dužina 1 do  $\infty$  ne može podijeliti, uzeta je recipročna vrijednost  $n = 1/\lambda$  koja u točki  $A$  također iznosi 1, a u točki  $O$  jednaka je niščici. Za bilo koju točku na pravcu  $OA$  može se pri izgaranju čistog ugljika odrediti  $\lambda = 1/n$ . Udaljenost te točke od ordinate lijevo označuje postotak  $\text{CO}_2$ , a udaljenost od vertikale  $AB$  postotak  $\text{O}_2$  pri izgaranju sa  $\lambda > 1$ .

Za stvarna goriva u kojima osim ugljika ima još i vodika i sumporu vrijedi isti dijagram, ali svako gorivo prema svom sastavu ima drugi  $k_{\max}$ , koji je uvek manji od 21%, jer se kisik troši i na reakcije s vodikom i sumporom. Na sl. 36



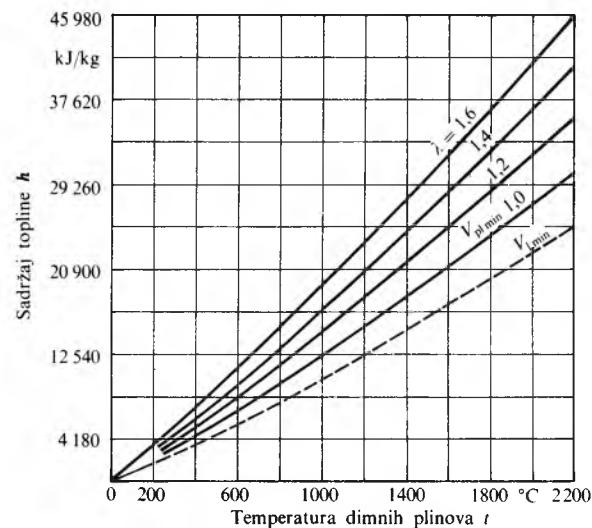
Sl. 36. Bunteov dijagram izgaranja

prikazano je gorivo sa  $k_{\max} = 18,6\%$  kojemu na pravcu  $AO$  pripada točka  $A_1$ . Ako je poznat maseni udio pojedinih elemenata sadržanih u gorivu,  $k_{\max}$  može se odrediti i računski.

### Proizvodi izgaranja

**Dimni plinovi.** Količina dimnih plinova ovisi o stehiometrijskim odnosima vezanja kisika s gorivom i o pretičku zraka kojim se regulira izgaranje u ložištu. Promjenom pretička zraka  $\lambda$  mijenja se i postotni udio pojedinih sastojaka dimnih plinova.

Za toplinske proračune parnih kotlova mnogo se primjenjuje  $h,t$ -dijagram dimnih plinova, koji se proračunava na osnovi sadržaja topline  $h$  dimnih plinova nastalih izgaranjem mase od 1 kg, odnosno 1 m<sup>3</sup> goriva za različite temperature, uz različite faktore pretička zraka od  $\lambda = 1$  do  $\lambda = 2$ , pa i više. Sadržaj topline (entalpija) dimnih plinova računa se kao zbroj sadržaja topline pojedinih udjela. Za svaki pretičak zraka  $\lambda$  dobije se određena krivulja. Na sl. 37 prikazan je  $h,t$ -dijagram određene vrste goriva za različite pretičke zraka  $\lambda$ .



Sl. 37.  $h,t$ -dijagram zraka i dimnih plinova

Stvarne temperature dimnih plinova u ložištu ovise o ogrjevnjoj moći goriva, o pretičku zraka, o zagrijanju goriva i zraka za izgaranje, te o prijenosu topline zračenjem na ekranse površine ložišta ako je ložište hlađeno.

Pri izračunavanju temperatura dimnih plinova u ložištu parnog kotla razlikuju se tri osnovna slučaja: a) teorijska temperatura dimnih plinova u nehladenom ložištu s dovodom nezagrijanog zraka za izgaranje; b) teorijska temperatura dimnih

plinova u nehlađenom ložištu s dovodom zagrijanog zraka za izgaranje; c) stvarna temperatura dimnih plinova u hlađenom ložištu (ekransi sustav) s dovodom hladnog ili zagrijanog zraka za izgaranje.

Ložišta suvremenih parnih kotlova gotovo su uvijek hlađena. Dimni plinovi u ložištu predaju velik dio topline rashladnim površinama u ložištu, odnosno cijevima koje su ugrađene u stjenke ložišta ili od kojih su stjenke sastavljene (membranske cijevne stijene). Zbog izmjene topline zračenjem, veoma se smanjuje temperatura dimnih plinova u ložištu. Takvo je ložište hlađeno, a cijevni sustav koji služi za hlađenje ložišta jest ekran ili ekranski sustav.

Toplina dimnih plinova koja se zračenjem prenosi na ekranske površine služi za zagrijavanje i isparivanje vode, a računa se prema jednadžbi

$$Q_z = A_z q_{12} \quad (7)$$

gdje je  $A_z$  površina zračenja ogrevnog sustava u ložištu, a  $q_{12}$  intenzitet zračenja definiran sa

$$q_{12} = C_{12} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (8)$$

gdje je  $C_{12}$  konstanta zračenja između volumena plamena i plinova i ekranskog sustava u ložištu,  $T_1$  apsolutna temperatura dimnih plinova u ložištu, a  $T_2$  apsolutna temperatura ekranskog sustava.

Stvarna temperatura dimnih plinova u ložištu  $t_s$  srednja je temperatura dimnih plinova, a uzima se u proračunima kao temperatura na kraju ložišta. Proračun stvarne temperature dimnih plinova zasniva se na činjenici da se u ložištu dovodi energija goriva i energija zagrijanog zraka, a odvodi toplina zračenja  $Q_z$ .

**Pepeo i troska.** Iz sastava pepela i troske mogu se odrediti njihove fizikalne i kemijske karakteristike te ovisnost viskoznosti troske i pepela o temperaturi.

Gradnja ložišta parnog kotla vrlo je usko povezana s karakteristikama pepela i troske, jer o tim karakteristikama ovise veličina, oblik, toplinsko opterećenje i ostali parametri ložišta. Zato za pravilno projektiranje i izvedbu ložišta moraju biti poznate temperature sinteriranja, omekšavanja i tečenja troske te temperature isplinjivanja (sublimiranja) troske. Te se temperature utvrđuju prije projektiranja ložišta.

Tablica 8  
SASTAV PEPELA I TROSKE

$\text{SiO}_2$ %	$\text{Al}_2\text{O}_3$ %	$\text{Fe}_2\text{O}_3$ %	$\text{FeO}$ %	$\text{CaO}$ %	$\text{MgO}$ %	$\text{SO}_3$ %	$\text{P}_2\text{O}_5$ %	$\text{K}_2\text{O}$ %	$\text{Na}_2\text{O}$ %
30...50	15...30	2...20	2...20	1,5...15	1...3	1...5	0,2...1,5	1...5	1...5

Rezrađeno je više metoda za određivanje viskoznosti pepela i troske pri različitim temperaturama. Te se metode zasnivaju na promatranju kako se ponaša pokušni uzorak tokom zagrijavanja, odnosno na određenim temperaturama, od točke sintetiranja i omekšanja do točke tečenja. Za ispitivanja se upotrebljavaju različiti oblici i veličine pokušnih uzoraka izrađenih od određene vrste ugljena, različite brzine zagrijavanja uzorka, različite atmosfere u kojima se uzorak ispituje, tj. oksidacijska (zrak) i reduksijska atmosfera ( $\text{CO} + \text{CO}_2$ ). Općenito vrijedi pravilo da se različite vrste troske i pepela pri zagrijavanju na više temperature približno jednakom vladaju ako im je sastav jednak.

U osnovi se može utvrditi pet bitnih stanja troske i pepela prema temperaturi, odnosno utvrditi pet karakterističnih točaka troske i pepela. To su: točka sinteriranja (početak deformacije) troske i pepela pri temperaturi  $t_1$ , točka omekšavanja troske i pepela pri temperaturi  $t_2$ , točka taljenja troske i pepela pri temperaturi  $t_3$ , točka tečenja (razljevanja) troske i pepela pri temperaturi  $t_4$  i točka isplinjivanja (sublimiranja) troske i pepela pri temperaturi  $t_5$ .

Viskoznost pepela i troske može se odrediti i iz odnosa pojedinih udjela kemijskih spojeva u pepelu i troski. Taj se

postupak zasniva na činjenici da neki spojevi u pepelu i troski snizuju temperaturu omekšanja troske, odnosno snizuju viskoznost, npr.  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ , dok drugi spojevi povišuju temperaturu omekšanja i taljenja troske, tj. povišuju viskoznost, npr.  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ .

Granice u kojima se kreću udjeli kemijskih spojeva u pepelu i troski različitih vrsta ugljena prikazane su u tabl. 8.

#### Toplinska bilanca i korisnost parnog kotla

Toplina koja se gorivom dovodi u parni kotao služi za proizvodnju vodene pare zahtijevanih karakteristika i za pokrivanje toplinskih gubitaka u kotlu. Prema tome, toplinska je bilanca parnog kotla

$$Q_B = Q_D + Q_{hi}, \quad (9)$$

gdje je  $Q_B$  energija dovedena gorivom,  $Q_D$  energija utrošena za proizvodnju vodene pare, a  $Q_{hi}$  gubici energije u parnom kotlu.

Cjelokupna količina goriva  $B$  koja se unosi u parni kotao ne sudjeluje pri izgaranju jer nastaju gubici goriva zbog neizgorjele gorive tvari u troski i pepelu u ložištu  $F_r$ , gubitka gorive tvari u pepelu izvan ložišta  $F_a$  i količine gorive tvari u dimnim plinovima izvan parnog kotla  $F_s$ . Prema tome, u stvaranju dimnih plinova sudjeluje količina goriva

$$B_0 = B - (F_r + F_a + F_s), \quad (10)$$

odnosno stvarna je količina goriva koja sudjeluje u procesu

$$B_0 = B(1 - q_G). \quad (11)$$

Ukupni gubici  $q_G$ , izraženi u postocima, iznose

$$q_G = q_{F_r} + q_{F_a} + q_{F_s}, \quad (12)$$

gdje je  $q_{F_r}$  gubitak u neizgorjeloj gorivoj tvari u troski i pepelu u ložištu,  $q_{F_a}$  gubitak gorive tvari u pepelu izvan ložišta, a  $q_{F_s}$  gubitak neizgorjelje gorive tvari u dimnim plinovima izvan parnog kotla.

Za proračun korisnosti ložišta treba uzeti sve gubitke koji nastaju u ložištu, što znači da se uz spomenute gubitke u račun uzmaju i gubici:  $q_{CO}$  gubitak zbog nepotpunog izgaranja ugljika u ugljik-monoksid,  $q_\epsilon$  gubitak zbog stvaranja čade (amorfni ugljak),  $q_w$  gubitak zbog osjetne topline troske i pepela, te  $q_{stL}$  gubitak zračenja ložišta.

Prema tome, korisnost ložišta parnog kotla iznosi

$$\eta_L = 100 - (q_{F_r} + q_{F_a} + q_{F_s} + q_{stL} + q_{CO} + q_\epsilon + q_w). \quad (13)$$

Ukupna korisnost parnog kotla računa se prema gubicima u ložištu i gubicima u ostalim dijelovima kotla. Izvan ložišta nastaju gubici:  $q_{st}$  gubitak zbog prolaza i zračenja topline parnog kotla u okoliš i  $q_A$  gubitak zbog unutrašnje energije sadržane u dimnim plinovima na izlazu iz parnog kotla. Prema tome je ukupna korisnost parnog kotla

$$\eta_{GP} = 100 - (q_A + q_{st} + q_{F_r} + q_{F_a} + q_{F_s} + q_{CO} + q_\epsilon + q_w + q_{pr}), \quad (14)$$

gdje je uzet u obzir i gubitak zbog propada gorive tvari kroz raspore na rešetki ložišta, označen sa  $q_{pr}$ .

#### TIPOVI LOŽIŠTA I NAČINI IZGARANJA GORIVA U LOŽIŠTU

Tip ložišta ovisi o karakteristikama goriva koje će se upotrebjavati za loženje parnog kotla. Te su karakteristike: ogrjevna moć goriva, veličina čestica (zrnatost) čvrstog goriva, udio vlage u gorivu, količina plinovitih sastojaka, količina i sastav pepela i

suvišnih tvari, temperatura paljenja i sposobnost brze ili spore reakcije pri izgaranju. Zbog velikih razlika u osnovnim karakteristikama goriva razvilo se mnogo različitih tipova ložišta, a taj se razvoj i dalje nastavlja jer još nisu potpuno ispitani svi aerodinamički i termodinamički uvjeti izgaranja, a ni mogućnosti konstrukcijskih rješenja nisu iscrpljene.

Konstrukcija ložišta treba osigurati sljedeće: izgaranje goriva treba da bude potpuno i pravilno; pripremu i izgaranje goriva treba postići sa što manje utroška energije za pogon strojeva u sklopu ložišta; izgaranje treba da se odvija sa što manjim pretičkom zraka; ložište treba da zauzima što manji prostor i da bude izgrađeno sa što manjim utroškom materijala; ako se upotrebljava čvrsto gorivo, odvod pepela i troske mora biti što jednostavniji.

### Ložišta za čvrsta goriva

U ložištu parnog kotla čvrsto gorivo može izgarati na dva načina; u sloju na rešetki ili raspršeno u prostoru (ugljena prašina). Parni kotlovi s ložištem u kojem na rešetki izgara čvrsto gorivo u sloju imaju maksimalni učin ograničen na 100 t/h, ali im je minimalni učin praktički neograničen, tj. mogu raditi i u praznom hodu. Parni kotlovi s ložištem u kojem raspršena ugljena prašina izgara u prostoru grade se za velike učine, nikad manje od 30 t/h. U takvu se ložištu ne može postići sigurno paljenje ugljene prašine ako opterećenje kotla padne ispod neke donje granice. Ta se donja granica opterećenja zove *tehnički minimum kotla*, a ovisi o svojstvima ugljena.

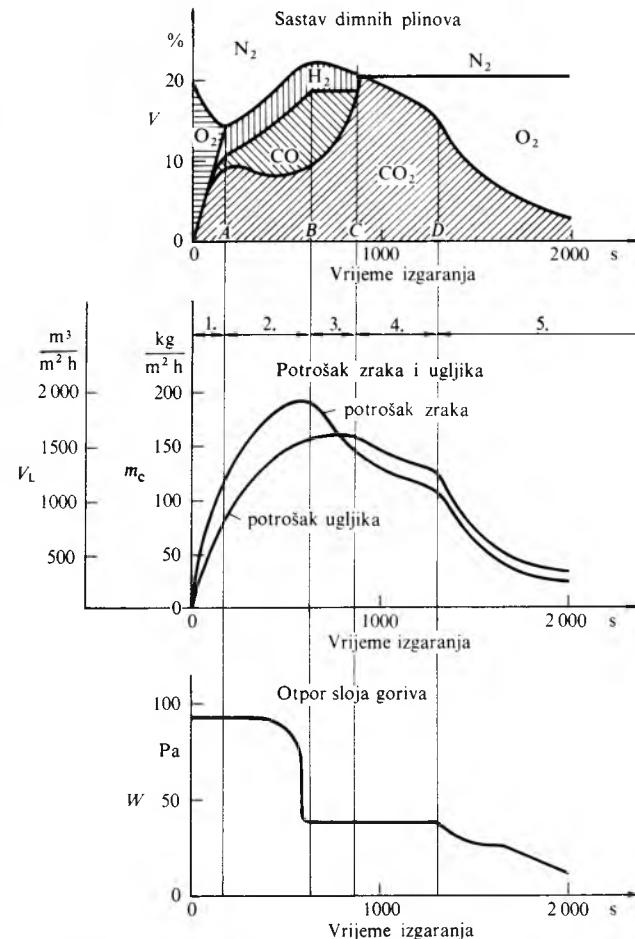
**Ložišta za izgaranje čvrstog goriva u sloju** imaju rešetku koja može biti nepomična ili je pokretana mehanički.

Najjednostavnija je *ravna nepomična rešetka* sastavljena od nepomičnih šipki između kojih su uži ili širi razmaci za dovod zraka. Gorivo se na ravnu nepomičnu rešetku nabacuje ručno. Ložišta s takvom rešetkom danas imaju samo pari kotlovi vrlo malih učina, npr. kotlovi centralnog grijanja malih zgrada.

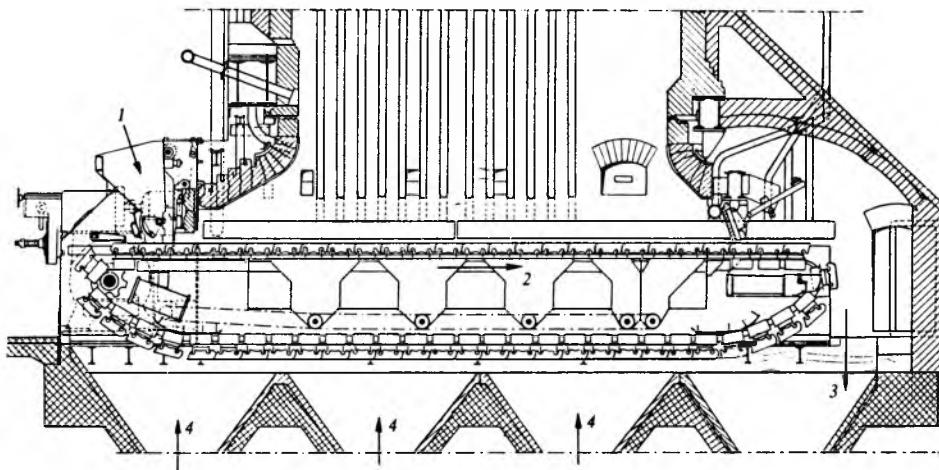
*Mehanička pomična rešetka* može biti rvana, kosa ili stepeničasta. Sloj goriva, izgarajući na rešetki, polagano putuje prema kraju rešetke, a zrak za izgaranje dovodi se kroz raspore između šipki. Poseban mehanički uređaj dozira, ubacuje i regulira debljinu sloja goriva na rešetki.

Postoje različite konstrukcije mehaničkih rešetki, a najčešći je tip *lančana rešetka* koja radi kao transportna traka (sl. 38). Lančana se rešetka može upotrijebiti gotovo za sva čvrsta goriva. Na početku rešetke pada ugljen iz posebnog lijevka, a debljina se sloja može regulirati. S rešetkom putuje ugljen kroz komoru izgaranja i na kraju ostaju pepeo i troska koji padaju s rešetke u lijevak za pepeo.

ili stepenastim rešetkama. Ispitivanjima dobivene krivulje (sl. 39) pokazuju da se tok izgaranja može podjeliti na pet karakterističnih vremenskih intervala. U prvom intervalu postoji pretičak zraka, a površinu zapaljenog goriva još nije potpuno obuhvatio plamen. U drugom vremenskom intervalu nestaje pretičak zraka, gornji slojevi goriva potpuno se rasplinjuju, a zbog izgaranja



Sl. 39. Rezultati Werkmeisterovih ispitivanja izgaranja kamenog ugljena sa  $H_d = 27,2 \text{ MJ/kg}$ , udio plinovitih sastojaka  $0,20 \dots 0,30 \text{ kg/kg}$ , udio pepela  $\sim 0,12 \text{ kg/kg}$ , udio vode  $\sim 0,6 \text{ kg/kg}$



Sl. 38. Lančana rešetka. 1 dovod ugljena, 2 smjer kretanja rešetke, 3 odvod pepela, 4 dovod zraka

Iscrpna ispitivanja izgaranja kamenog ugljena na ravnoj pomičnoj rešetki obavio je 1931. god. H. Werkmeister. Rezultati Werkmeisterovih ispitivanja još i danas služe kao osnovni podaci o uvjetima izgaranja u sloju, a uz određene korekture vrijede i za izgaranje goriva drugačijih karakteristika na kosim

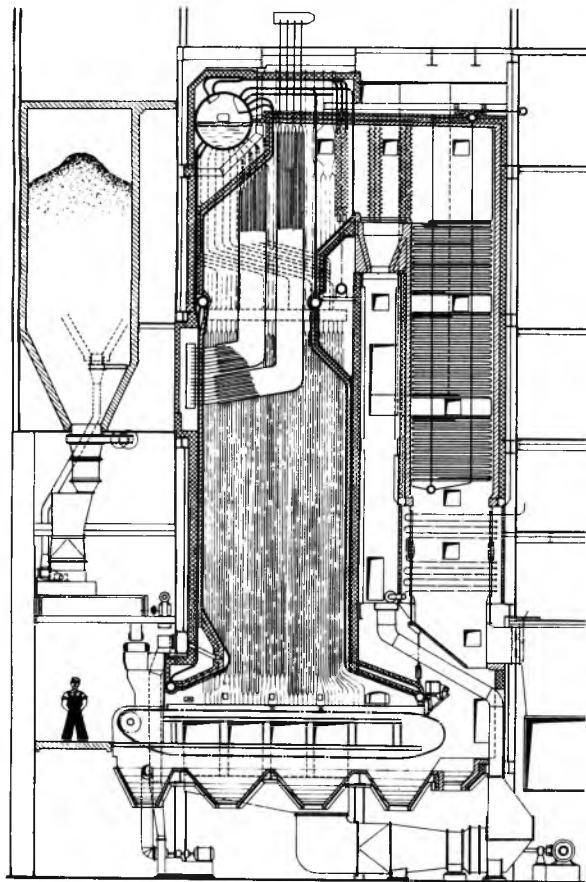
goriva smanjuje se otpor strujanja zraka kroz sloj goriva na rešetki. U trećem intervalu rasplinjuje se ostatak krutih čestica goriva, a udio ugljik-dioksida u dimnim plinovima naglo se povećava. U četvrtom se intervalu ostatak goriva u krutim česticama potpuno rasplinio te izgara kao koks s plavičastim

## PARNI KOTAO

plamenom, udio ugljik-dioksida u dimnim plinovima pada, a dovod zraka je veći nego što je teorijski potrebno, pa nastaje pretičak zraka. Peti interval obuhvaća konačno dogorijevanje goriva uz dalje smanjenje udjela ugljika i smanjenje dovoda zraka.

Primjer parnog kotla s ravnom rešetkom na kojoj izgara gorivo u sloju prikazan je na sl. 40.

Za razliku od ravne pomicne rešetke, gdje se gorivo ne giba relativno prema rešetki, na *pomicnoj stepenastoj rešetki* gorivo se stalno prevrće i miješa, pa se tako pospješuje izgaranje.



Sl. 40. Parni kotao s ravnim mehaničkom rešetkom i velikim površinama zračenja u ložištu

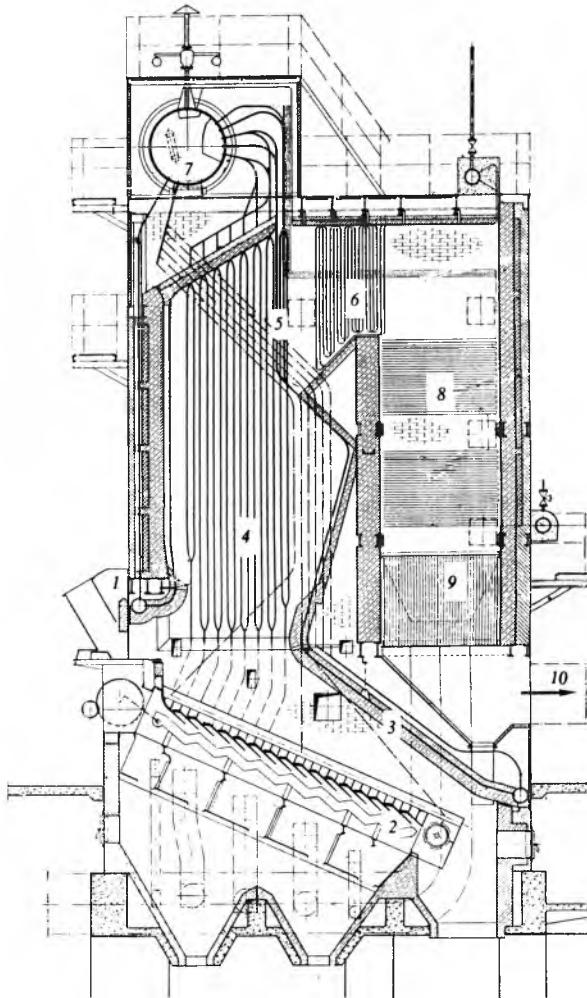
Primjer parnog kotla s ložištem u koje je ugrađena stepenasta mehanička rešetka prikazan je na sl. 41. Taj je kotao projektiran za ugljen manje ogrjevne moći i većeg postotka pepela i vlage (mrki ugljen i lignit). Ložište ima vrlo izdužen stražnji svod (3) radi boljeg paljenja i izgaranja ugljena, odnosno prijenosa topline s užarenog sloja goriva na svod i povratnog zračenja svoda na prednji dio rešetke gdje se ugljen zagrijava, suši i pali. U ložištu je ugrađena ogrjevna površina isparivača (5) na koju se zračenjem prenosi toplina dimnih plinova. Drugi je dio površine isparivača u obliku snopa cijevi (6) u kojemu se toplina prenosi djelomično strujanjem dimnih plinova (konvektivni prijenos), a djelomično zračenjem. Rešetka (2) izvedena je s raspodjelom dovoda zraka.

*Ložišta za otpadna goriva* redovito imaju rešetke na kojima izgara u sloju gradski ili industrijski otpad. Mala postrojenja služe samo za uništavanje otpada, a proizvedena se toplina ne upotrebljava, dok u većim postrojenjima toplina izgaranja služi za dobivanje vodene pare ili tople vode.

S obzirom na raznolike ogrjevne moći, različite karakteristike i nehomogenost otpadnog goriva (organiski otpaci voća i povrća, otpaci papira, kartona, tekstila, ambalaže od aluminija, željeznog lima, otpaci od celuloida, umjetne mase od PVC, pepeo i suvišne tvari izgaranja u kućanstvima, životinjski otpaci, kosti itd.)

potrebno je ložište i parni kotao za izgaranje takva goriva pojedinačno projektirati. Zbog toga se i razlikuju ložišta za izgaranje tehnološko-industrijskih otpadaka (drvni, tekstilni, kožni, papirni otpaci i sl.) i za izgaranje gradskog smeća.

Da bi izgaranje otpadnog goriva bilo pravilno i potpuno, ložište mora zadovoljiti nekoliko osnovnih zahtjeva. Konstrukcija ložišta mora biti takva da bi otpadno gorivo ekstremno ne-povoljna sastava i ogrjevne moći moglo potpuno izgorjeti. Mora postojati mogućnost mjerjenja količine otpadnog goriva različita sastava i izgaranja mješavine otpadnih goriva različite toplinske vrijednosti. Da bi se izgaranje moglo održavati, treba da postoji regulacija temperature ložišta, odnosno mogućnost održavanja potrebne temperature ložišta za veliki raspon ogrjevne moći goriva. Konstrukcija i površina rešetke moraju biti usklađeni s učinom parnog kotla prema ogrjevnoj moći otpadnog goriva koje se mijenja u širokim granicama. Projektom cijelog parnog kotla mora se postići da se ogrjevne površine što manje onečišćuju, tako da trajanje neprekidnog pogona između dva čišćenja bude što duže.



Sl. 41. Parni kotao sa stepenastom rešetkom. 1 dovod ugljena, 2 stepenasta rešetka, 3 stražnji svod ložišta, 4 ozračena ogrjevna površina isparivača, 5 konvektivna ogrjevna površina isparivača, 6 pregrijat pare, 7 parni bubanj, 8 zagrijat vode, 9 pločasti zagrijat zraka, 10 odvod dimnih plinova

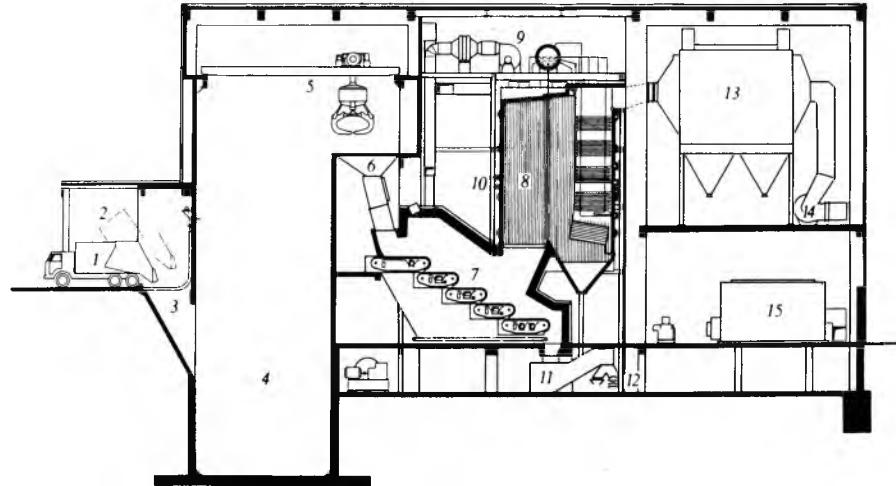
Na sl. 42 prikazan je parni kotao s ložištem za izgaranje otpadnog goriva. Otpadno gorivo izgara na sustavu od pet puzačišta rešetki sa samostalnim neovisnim pogonima. Dimni se plinovi čiste elektrofiltrom, pa sadržaj pepela u dimu nakon filtriranja iznosi samo  $0,4 \text{ mg/m}^3$ .

**Ložišta za izgaranje čvrstog goriva u prostoru.** Smjesa sitno samljevene ugljene prašine i zagrijanog zraka ubacuje se u komoru izgaranja gdje se zapali zračenjem plamena i dimnih

plinova koji zagriju zrak za izgaranje na visoku temperaturu (do 450 °C). Ako gorivo sadrži mnogo vlage i pepela, odnosno ako ima nisku ogrjevnu moć, dimni plinovi recirkuliraju. Ugljeni se prah mora zadržati u ložištu bar tako dugo koliko je potrebno da izgori njegova osnovna masa.

Sveže samljenevi ugljen prolazi poput vode i kroz najmanje raspore i otvore, ali se već nakon kratkog vremena lijevi za stijenke bunkera, što sprečava jednolični odvod ugljene prašine. Ugljena prašina s visokim postotkom hlapljivih sastojaka ugrijava se u bunkeru zbog lokalnoga polaganog izgaranja, sinterira se i

Sl. 42. Parni kotao s ložištem za izgaranje otpadnih goriva: učin kotla 20 t/h, potrošak otpadnog goriva 8 t/h, tlak 25 bar, temperatura pregrijane pare 250 °C, ogrevna moć otpadnog goriva  $H_d = 3,4 \dots 8,4 \text{ MJ/kg}$ . 1 dovoz gradskog otpada, 2 istovar otpada, 3 dovod u spremnik otpada, 4 spremnik otpada, 5 prijenosna dizalica s grabilicom, 6 dovod otpada u ložište, 7 pomicne ravne rešetke, 8 ložište, 9 ventilator i dovod zraka za izgaranje, 10 plamenici za ulje (dodatano gorivo), 11 odvod troske i pepela, 12 transport troske i pepela, 13 filter dimnih plinova, 14 ventilator dimnih plinova, 15 dodatni generator topline



Veličina čestica ugljenog praha iznosi između 0 i neke određene najveće vrijednosti  $d_{\max}$ . Bitno je da najveću veličinu čestice  $d_{\max}$  ima samo dopušteni mali maseni postotak goriva. Mljevenjem je površina čestica goriva s obzirom na volumen postala vrlo velika, pa je brzina izgaranja mnogo veća nego pri izgaranju u sloju na rešetki. Zbog toga se učin parnog kotla loženog ugljenom prašinom može brzo mijenjati i lako prilagoditi opterećenju kotla.

*Načini ubrizgavanja ugljene prašine.* Ugljena se prašina može ubrizgavati u komoru izgaranja posredno ili neposredno. Pri neposrednom se ubrizgavanju ugljena prašina dovodi u komoru izgaranja izravno iz mlinova. To je konstrukcijski i pogonski najjednostavnije rješenje, a s obzirom na investicije ujedno je i najjeftinije, ako sadržaj vlage u ugljenu nije visok i ako se troska odvodi u suhom stanju.

U toku mljevenja ugljen se istodobno suši. Zrak iz zagrijivača zraka ili smjesa zraka i plinova izgaranja dovode se u mlin, odakle sa sobom odnose ugljenu prašinu kroz plamenike u komoru izgaranja. Potreben pretlak za taj transport proizvode mlinovi ili posebni ventilatori.

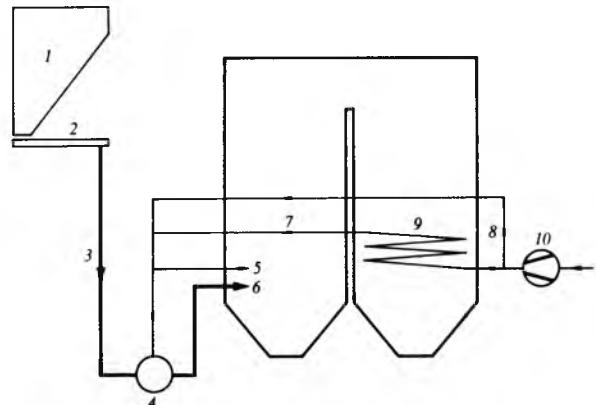
S obzirom na izgaranje povoljnije je u mlinove dovoditi samo zrak, jer se postižu bolji uvjeti paljenja, ali to je moguće jedino kad ugljen sadrži manji postotak hlapljivih sastojaka. Naime, postoji opasnost eksplozije smjesi ugljene prašine i zraka, pogotovo ako je postotak hlapljivih sastojaka velik. Da bi se uklonila ta opasnost, potrebno je zraku za sušenje ugljena dodati plinove izgaranja, tako da se u mlinu postigne određeni sadržaj ugljik-dioksida i time dobije inertan sastav plina. Takav postupak, međutim, ne samo da komplicira izvedbu i stvara pogonske teškoće nego pogoršava i uvjete izgaranja zbog dovoda inertnih plinova u komoru izgaranja, pa se zrak potreban za izgaranje mora intenzivnim vrtloženjem što brže dovesti u dodir s gorivom.

Na sl. 43 prikazana je shema za neposredno ubrizgavanje ugljene prašine kad se za sušenje ugljena može upotrijebiti samo zrak. Postoji li opasnost eksplozije zraka i ugljene prašine, dovode se u mlin plinovi izgaranja i zrak prema shemi na sl. 44.

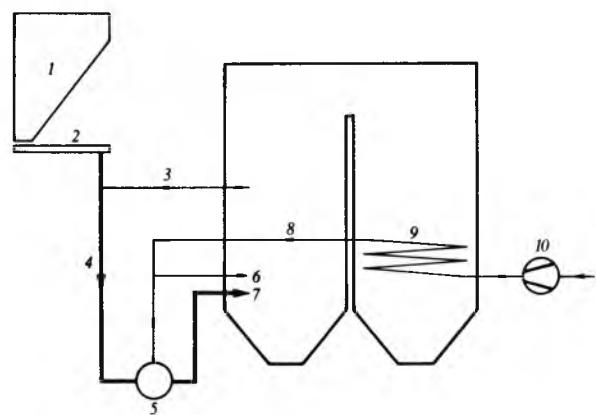
Ugljenu prašinu treba uvjek posredno ubrizgavati želi li se odvoditi troska u tekućem stanju, a ugljen sadrži više od 15% vlage. Kad bi se tolika vlaga dovela u kotao, ne bi se postigla potrebna temperatura za taljenje troske, ili bi se postigla samo pri punom opterećenju kotla.

Pri posrednom ubrizgavanju samljenevi ugljen sakuplja se u bunkerima ugljene prašine i iz njih se odvodi u kotao. To omogućuje da mlinovi rade samo povremeno, i to s punim opterećenjem, pa se smanjuje energija potrebna za mljevenje. Međutim, uskladištenje ugljene prašine vezano je s nekoliko problema.

stvaraju se uvjeti za samozapaljenje, pa se zbog opasnosti od požara bunker ugljene prašine ne smije smatrati skladištem.

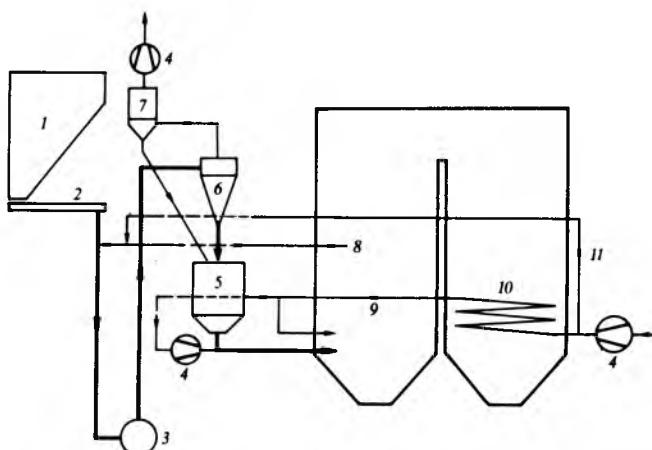


Sl. 43. Shema neposrednog ubrizgavanja ugljene prašine sušene smjesom zraka i plinova izgaranja pomoću pretlaka stvorenog u mlinu. 1 bunker za ugljen, 2 dodavač, 3 dovod ugljena u mlin, 4 mlin za ugljen, 5 zrak, 6 smjesa zraka i ugljene prašine, 7 vrući zrak, 8 hladni zrak, 9 zagrijivač zraka, 10 ventilator



Sl. 44. Shema neposrednog ubrizgavanja ugljene prašine sušene zrakom pomoću pretlaka stvorenog ventilatorom. 1 bunker za ugljen, 2 dodavač, 3 plinovi izgaranja, 4 dovod ugljena pomiješanog s plinovima izgaranja, 5 mlin za ugljen, 6 zrak, 7 smjesa zraka i ugljene prašine, 8 vrući zrak, 9 zagrijivač zraka, 10 ventilator

Za posredno su ubrizgavanje potrebni složeniji i skuplji uređaji (sl. 45). Ugljen se u mlinove dovodi pomiješan s plinovima izgaranja i hladnim zrakom da bi se na izlazu iz mлина postigla temperatura od 80...100 °C. Iz mлина se ugljena prašina odvodi u ciklon, gdje se vrtloženjem odvaja ugljena prašina od plinova i vodenе pare (supare). Preko specijalnog filtra s tkaninom ili elektrofiltrata, koji zadržava ugljenu prašinu, plinovi i vodenе pare odvode se u dimnjak. Ugljena prašina iz ciklona i filtra dovodi se u bunker odakle se zajedno s vrućim zrakom ubrizgava u kotao.

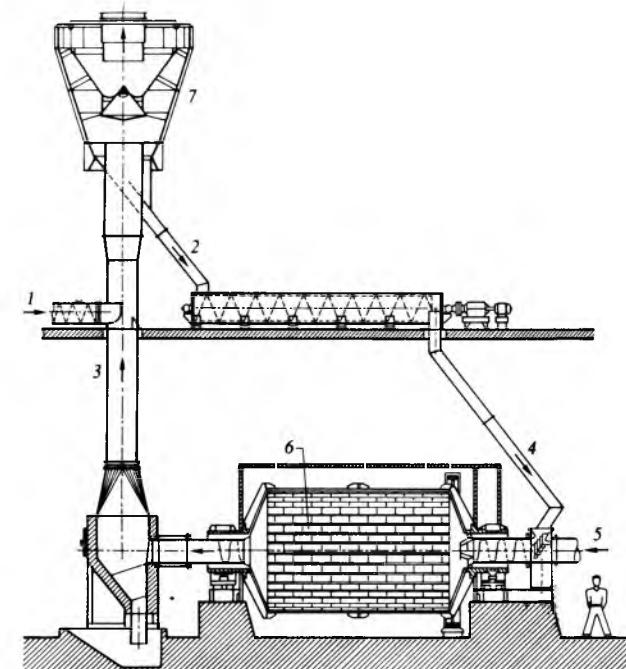


Sl. 45. Shema posrednog ubrizgavanja ugljene prašine. 1 bunker za ugljen, 2 dodavač, 3 mlin za ugljen, 4 ventilator, 5 bunker za ugljenu prašinu, 6 ciklon, 7 filter za suparu, 8 plinovi izgaranja, 9 vrući zrak, 10 zagrijavač zraka, 11 hladni zrak

Uz velike parne kotlove normalno se postavlja više mlinova i za posredno ubrizgavanje, a svaki takav mlin ima svoj ciklon, pa i posebni bunker za ugljen.

**Mlinovi za ugljen.** Za mljevenje ugljena i lignita upotrebljavaju se tri tipa mlinova: bubenjasti mlinovi (mlinovi s kuglama), mlinovi s pritiskom pera (mlinovi s valjcima) i mlinovi čekićari.

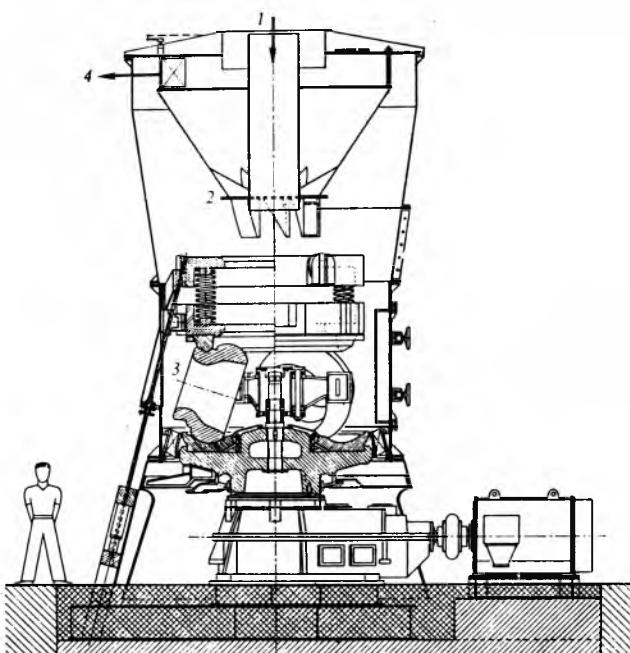
**Bubenjasti mlinovi** (sl. 46) sastoje se od okloppljenog vodaravnog bubnja dooko trećine napunjeno čeličnim kuglama različitog promjera. Pomoću pužnog transporterja ugljen se ubacuje u bubenj, a istodobno se u bubenj dovodi zrak i plinovi



Sl. 46. Bubenjasti mlin za ugljen. 1 dovod ugljena, 2 povrat krupnije ugljene prašine, 3 samljeveni ugljen, 4 dovod ugljena u mlin, 5 dovod zraka i plinova izgaranja, 6 mlin, 7 sito

izgaranja. Bubanj rotira brzinom od 18...30 min<sup>-1</sup> i pri tome čelične kugle melju ugljen. Iza bubnja su ugrađena sita (separatori) kojima se regulira finoća separiranja čestica samljevene ugljene prašine. Struja zraka i plinova izgaranja odnosi samljevene čestice ugljena u situ gdje se krupnije čestice odvajaju od sitnih i vraćaju u mlin. Sušenje je za vrijeme mljevenja maleno, pa ugljen sa sadržajem vlage većim od 8...10% treba prethodno sušiti. Bubenjasti su mlinovi pogodni za mljevenje tvrdoga kamnog ugljena i u pogonu su vrlo sigurni. Potrebna energija za mljevenje iznosi 16...25 kWh/t, a snaga za prazni hod je gotovo jednaka maksimalnoj snazi. Budući da imaju samo malu mogućnost reguliranja količine samljevenog ugljena, upotrebljavaju se za kotlovska postrojenja s posrednim ubrizgavanjem ugljene prašine.

**Mlinovi s pritiskom pera** imaju stazu za mljevenje izvedenu u obliku prstena ili tanjuraste posude koja rotira brzinom od 50...120 min<sup>-1</sup>, a po kojoj se kotrljaju valjci ili kugle pritisnute perom (sl. 47). Ugljen pada kroz cijev smještenu u situ iznad mлина, a zrak se dovodi kroz sapnice u visini staze za mljevenje. Zračna struja odnosi sve lagane čestice samljevenog ugljena u situ gdje se zbog promjene smjera i centrifugalne sile odvajaju krupnije čestice i vraćaju u mlin. Da bi se postigla potrebna brzina zraka i sviđali otpori strujanja, ispred mлина se postavlja ventilator. Mlinovi s pritiskom pera pogodni su za sve vrste kamenog ugljena sa sadržajem vlage do 20%. Potrebna energija za pogon mлина i ventilatora iznosi 12...15 kWh/t, a snaga je za prazni hod ~60% maksimalne snage.

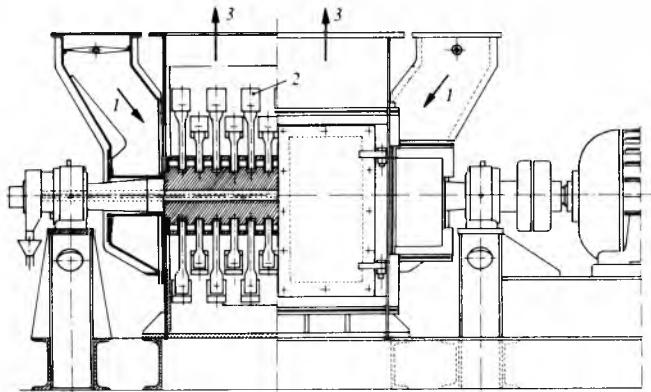


Sl. 47. Mlin za ugljen s pritiskom pera. 1 dovod ugljena, 2 sito, 3 tlačni prsten, 4 odvod ugljene prašine

**Mlinovi čekićari** grade se u dvije različite izvedbe: s udarnim batovima i s udarnim lopaticama (udarnim ventilatorskim krilima).

**Mlin s udarnim batovima** sastoji se od rotora s nekoliko vijenaca na koje je pričvršćeno više pokretnih poluga s batom na vrhu (sl. 48). Rotor se vrti brzinom 750 ili 1500 min<sup>-1</sup>, tako da obodna brzina udarnih batova iznosi 50...90 m/s. Ugljen se melje sudarom s udarnim batovima. Budući da su batovi izvrgnuti trošenju, izrađuju se od specijalnog čelika i tako su konstruirani da se mogu brzo i lako zamjeniti dotrajali dijelovi. Zagrijani zrak ili smjesa zraka i plinova izgaranja odnosi samljeveno gorivo kroz separator u plamenike kotla, a krupnije čestice se iz separatora vraćaju natrag u mlin. Okretanje rotora s batovima stvara potreban pretlak za ubrizgavanje goriva, pa nema posebnog ventilatora. Sušenje ugljena u mlinu je intenzivno, pa je mlin čekićar osobito pogodan za mljevenje

mrkog ugljena i lignita. Ti se mlinovi grade za učin od 30 t/h, potrošnja energije za mljevenje iznosi 13...20 kWh/t, a snaga za prazni hod je 35% maksimalne snage. Krupnoća mljave regulira se brzinom strujanja zraka.



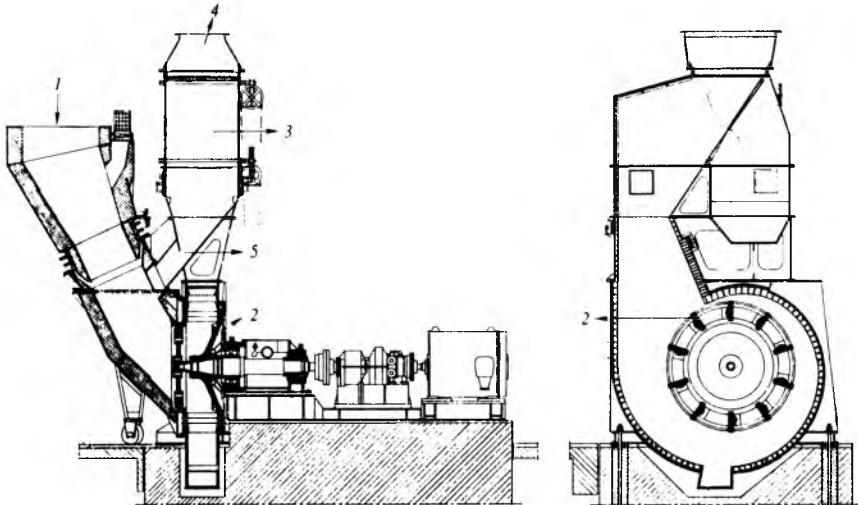
Sl. 48. Mlin za ugljen s udarnim batovima (Krämerov mlin). 1 dovod ugljena, 2 udarni batovi, 3 odvod ugljene prašine

*Mlin s udarnim lopaticama* (sl. 49) ima rotor konstruiran kao ventilacijsko kolo s lopaticama od specijalnog čelika. Ugljen sa zrakom i plinovima izgaranja aksijalno se dovodi rotoru koji se velikom brzinom okreće u kućištu. Upotrebljava se za iste vrste ugljena kao i mlin s udarnim batovima. Potrebna energija za mljevenje iznosi 11...20 kWh/t, a za neke lignite i manje od 10 kWh/t.

**Plamenici za ugljenu prašinu.** Plamenik služi da ugljenu prašinu pomiješa sa zrakom i ubrizga u komoru izgaranja. Smjesa ugljena i zraka mora se što brže zapaliti i nastaviti da gori bez prekida. Potpuno izgaranje mnogo ovisi o načinu dovoda goriva i zraka.

Pri dobrom paljenju smjesa se goriva i zraka pali neposredno nakon ubrizgavanja u komoru izgaranja, dakle odmah na izlazu iz plamenika. Paljenje se prenosi određenom brzinom paljenja s jedne čestice ugljena na drugu. Brzina paljenja ne smije biti veća od brzine ubrizgavanja ugljene prašine jer bi tada došlo do povratnog paljenja u plameniku i u dovodu ugljene prašine. Brzina paljenja ne smije biti ni mnogo manja od brzine ubrizgavanja jer bi tada paljenje kasnilo i moglo bi se prekinuti. Ako je brzina ubrizgavanja premalena, čestice ugljena ispadaju iz smjese ugljene prašine i zraka te se sakupljaju u vodovima ugljene prašine, pa može nastati samozapaljenje. Potrebna brzina strujanja smjese ovisi o gustoći ugljene prašine, o duljini vodova i njihovu promjeru, a iznosi 17...30 m/s.

Brzina paljenja raste s povećanjem sadržaja hlapljivih sastojaka u ugljenu, a smanjuje se s povećanjem sadržaja pepela i vlage. Na paljenje utječe i finoća mljevenja, način dovođenja zraka (primarni i sekundarni zrak) te temperatura zraka. Zrak potreban za izgaranje dovodi se djelomično u smjesi s ugljenom prašinom pri ubrizgavanju goriva (primarni zrak), a djelomično kroz posebne sapnice (sekundarni zrak). Količina primarnog zraka ovisi o postotku hlapljivih sastojaka, pa za niski postotak primarni zrak iznosi 10%, a za visoki i do 35% ukupnog zraka. Budući da brzina strujanja kroz plamenike mora ostati konstantna, pri malim opterećenjima povećava se udio primarnog zraka. Zbog toga se tada pojedini plamenici moraju isključiti iz



Sl. 49. Mlin za ugljen s udarnim lopaticama.  
1 dovod ugljena i plinova izgaranja, 2 kolo s udarnim lopaticama, 3 sito, 4 odvod ugljene prašine, 5 povrat krupnijih čestica ugljene prašine

*Finoća mljevenja* utvrđuje se prosijavanjem samljevenog ugljena kroz sita određenih karakteristika. Sita se označuju prema širini očice.

Finoća mljevenja mnogo utječe na ekonomičnost i sigurnost pogona. Što je gorivo finije samljeveno, to je potrebno više energije mljevenja, mlinovi se više troše, a i ogrjevne površine u kotlu mogu se više onečišćivati. Prekrupna ugljena prašina razlog je izgarjanju među ogrjevnim površinama izvan komore izgaranja pa se one onečišćuju, a zbog većeg postotka neizgorjelih sastojaka u pepelu smanjuje se stupanj djelovanja parnog kotla.

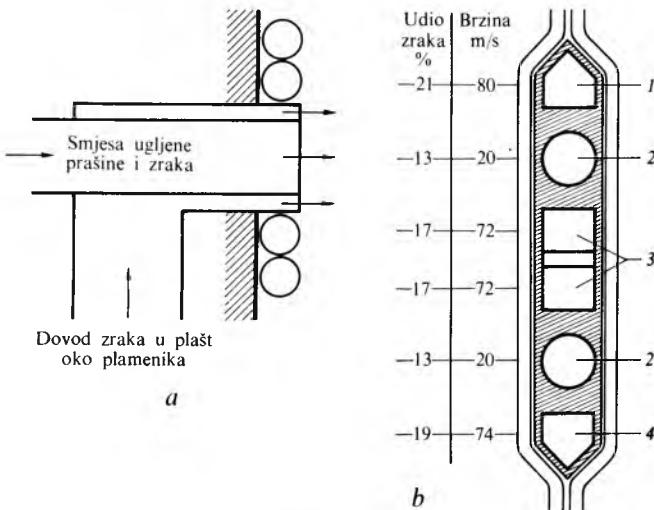
Što je mljevenje grublje, to se teže pale čestice ugljena. Na izbor finoće mljevenja utječu i postotak hlapljivih sastojaka u gorivu, način ubrizgavanja ugljene prašine u komoru izgaranja i način odvođenja pepela iz ložišta kotla jer, među ostalim, i o tim faktorima ovisi paljenje. U mlinu se finoća mljevenja može regulirati promjenom brzine strujanja zraka (tj. količine dovedenog zraka) i temperature. S povećanjem dovoda zraka smanjuje se finoća mljevenja, a s povišenjem temperature u mlinu finoća se povećava.

pogona. Temperatura primarnog zraka ograničena je zbog opasnosti da se u mlinu zapali ugljena prašina, pa za vlažni ugljen i ugljen s malim postotkom hlapljivih sastojaka iznosi ~150 °C, a za ugljen s većim postotkom hlapljivih sastojaka 130 °C, pa i niže. Temperatura sekundarnog zraka može se po volji odabratи.

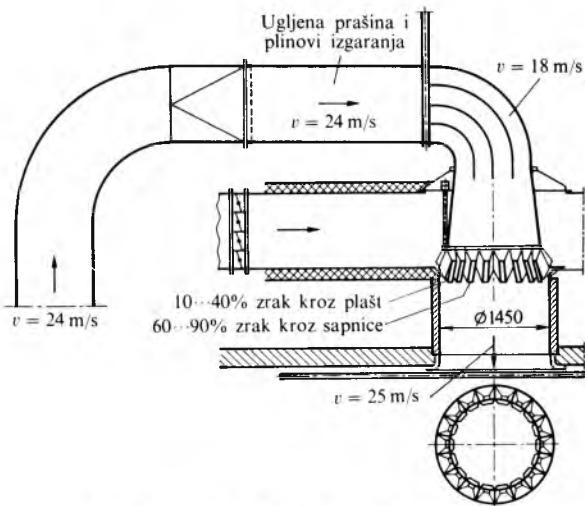
Postoje dvije različite konstrukcije plamenika: *strujni plamenici* i *plamenici s miješanjem*. Pomoću strujnog plamenika ubrizgava se u komoru izgaranja iz mline dobavljena smjesa ugljene prašine i primarnog zraka, a sekundarni se zrak dovodi u ložište posebnim sapnicama. U plamenicima za miješanje sekundarni se zrak dodaje smjesi ugljene prašine i primarnog zraka već u plameniku prije ubrizgavanja u komoru izgaranja.

Najjednostavniji strujni plamenik prikazan je na sl. 50a. Oko cijevi za dovod smjese ugljene prašine i zraka postavljena je cijev većeg promjera kroz koju se dovodi sekundarni zrak, tzv. *zrak plašta*. Takav se plamenik primjenjuje kad ugljena prašina ima veći sadržaj hlapljivih sastojaka, jer zrak plašta udaljuje plamen od kraja plamenika i tako ga štiti od izgaranja. Za ubrizgavanje ugljene prašine s malim postotkom hlapljivih

sastojaka upotrebljavaju se strujni plamenici bez plašta jer bi zrak plašta sprečavao paljenje. Tada se sekundarni zrak dovodi posebnim sapnicama smještenima u blizini plamenika (sl. 50b). Brzine sekundarnog zraka na izlazu pojedinih sapnica različite su da bi se ubrzao prodor zračne struje u struju smjese ugljene prašine i zraka, odnosno u plamen. Količina ubačenog sekundarnog zraka ne regulira se smanjenjem brzine, već prigušenjem pomoću preklopki, jer bi smanjena brzina zraka pogoršala uvjete miješanja zraka s plamenom.



Sl. 50. Strujni plamenik za ugljenu prašinu. a shema strujnog plamenika, b raspored plamenika i sapnica za sekundarni zrak; 1 sekundarni gornji zrak, 2 smjesa ugljene prašine i zraka, 3 sekundarni srednji zrak, 4 sekundarni donji zrak

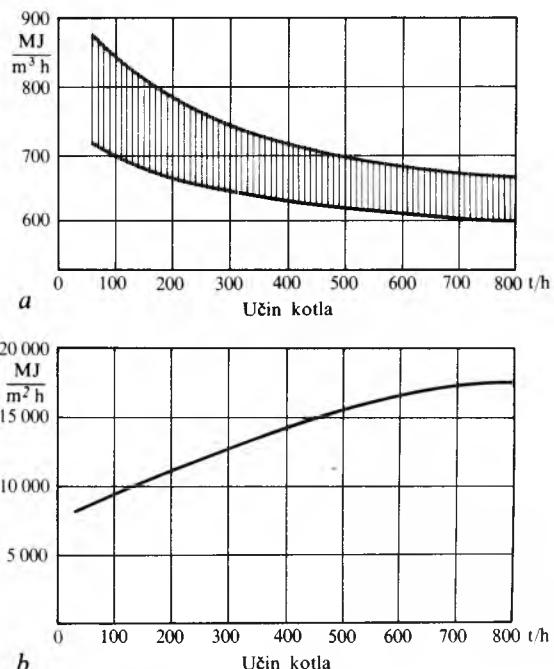


Sl. 51. Plamenik za ugljenu prašinu s miješanjem

Problem dovođenja sekundarnog zraka u plamen ne postoji kad se upotrebljava plamenik s miješanjem jer se sekundarni zrak već u plameniku miješa s gorivom. Konstrukcija plamenika s miješanjem za loženje prašinom mrkog ugljena i lignita prikazana je na sl. 51. Takav se plamenik postavlja na gornju stranu ložišta. U plameniku su smještene sapnice raspoređene u obliku prstena kroz koje dolazi 60...90% sekundarnog zraka, a ostatak se ubrizgava kao zrak plašta.

**Konstrukcije ložišta za izgaranje ugljene prašine.** Volumen komore izgaranja mora biti primjeren toplinskom opterećenju koje je potrebno da se postigne traženi kapacitet proizvodnje vodene pare određenog tlaka i temperature. To znači da dimenzije komore izgaranja ovise o kvaliteti ugljena, veličini čestica ugljene prašine (jer o tom ovisi vrijeme izgaranja  $\tau$ ), svojstvima pepela, načinu odvođenja pepela iz ložišta, te o nizu drugih faktora od kojih se neki mogu odrediti samo prema iskustvenim

podacima. Na sl. 52 prikazani su empirički dijagrami opterećenja volumena i površine ložišta prema učinu kotla loženog ugljenom prašinom.



Sl. 52. Opterećenje ložišta kotla. a opterećenje volumena ložišta, b opterećenje površine ložišta

Konstrukcijski postoje osnovna razlika između ložišta s odvođenjem pepela u suhom stanju i ložišta s odvođenjem pepela u tekućem stanju.

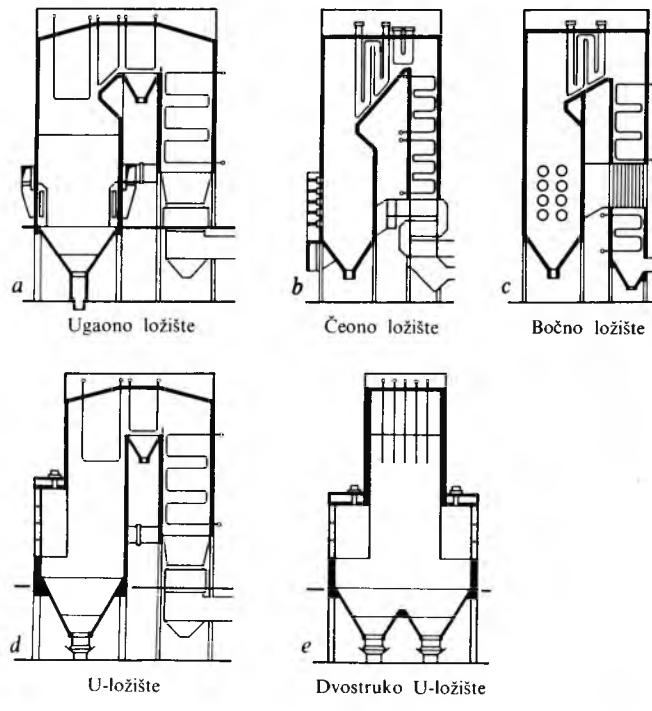
*Ložišta s odvođenjem pepela u suhom stanju.* Iz ložišta se pepelo odvodi u suhom stanju ili kao prašina ili kao zapećena troska. Pepelo i troska odvode se s dna komore izgaranja, zatim iz svih dijelova kotla gdje se pepelo nakuplja zbog promjene smjera strujanja plinova izgaranja i iz otpaćivača plinova izgaranja.

Dimenzije komore izgaranja treba tako odabrati da bi udjelenost između najvišeg plamenika i cijevi za prijelaz topline konvekcijom bila tolika da gorivo na tom putu potpuno izgori i plinovi predaju zračenjem toliko topline da se ohlade ispod temperature omekšanja pepela. Tako se sprečava taloženje troske na cijevima.

Ako se upotrebljava ugljen s velikim udjelom suvišnih tvari i s niskom točkom omekšanja pepela, često se, zbog konstruktivnih razloga, ne može sniziti temperatura dimnih plinova ispod temperature omekšanja pepela. Djelomično se taj problem može riješiti ako se prvi snopovi cijevi ogrjevne površine iza ložišta postave na veći razmak (100...300 mm) nego na normalnim ogrjevnim površinama. Često se površine pregrijača grade u redovima kao zavjese (zavjesni pregrijači) s velikim razmakom između redova (do 1000 mm). Ako se troska zalijepi na cijevi, ipak se prolaz za dimne plinove potpuno ne zatvori jer deblje naslage troske padnu s cijevi na dno ložišta.

Oblik ložišta ovisi o smještaju plamenika. Skice najčešćih oblika ložišta prikazane su na sl. 53.

U *ugaonom ložištu* (sl. 53a) plamenici su smješteni tako da produljenja njihovih simetrala tangiraju zamišljenu kružnicu u sredini ložišta (sl. 54a). Tako nastaje u ložištu kružno turbulentno gibanje plinova i ugljene prašine, što ubrzava izgaranje. Obično se postavljaju po tri ili četiri plamenika jedan iznad drugoga s istim nagibom od  $\sim 15^\circ$  prema dolje, uz uvjet da njihove simetrale tangiraju kružnice istog promjera. Ponekad se primjenjuje i takav raspored plamenika da su gornji plamenici usmjereni prema kružnici većeg, a donji prema kružnici manjeg promjera. S povećanim učinom kotla smanjuje se kružno gibanje plinova i ugljene prašine, a s tim i dobrota procesa izgaranja jer se dubina prodora plamena smanjuje s obzirom na dimenzije



Sl. 53. Oblici ložišta s odvođenjem pepela u suhom stanju

ložišta uz nepromijenjeni tlak sekundarnog zraka. Najpovoljniji je kvadratični tlocrt ložišta, ali se može izvesti i pravokutni tlocrt s omjerom stranica 8:10. U sredini ložišta nastaje područje viših temperatura, što uzrokuje veće toplinsko opterećenje pregrijača s kojim plinovi izgaranja najprije dolaze u dodir. Radi dobrog izgaranja treba od svakog mlinova dovoditi ugljenu prašinu u svaki ugaon ložištu, što uzrokuje ne samo konstrukcijske teškoće nego i veće troškove gradnje kotovskog postrojenja i veće habanje vodova za dovod ugljene prašine.

U čeonom ložištu (sl. 53b) svi su plamenici smješteni na prednjoj strani kotla. Plamenici su postavljeni ili horizontalno ili s manjim nagibom prema dolje (sl. 54b). Dovodi ugljene prašine iz jednog mlinova raspoređeni su na sve plamenike u istoj ravnini da bi se postiglo ravnomjerno izgaranje po cijeloj širini i onda ako jedan od mlinova prestane raditi. Dovodne su cijevi za ugljenu prašinu kraće nego u ugaonom ložištu, pa se zato manje i habaju. Čeono ložište ima pravokutan tlocrt, tako da se postiže jednolika temperatura na izlazu iz ložišta po cijeloj širini. Da bi izgaranje u čeonom ložištu bilo uspješno, treba osigurati dobro miješanje goriva i zraka bilo u plameniku, bilo neposredno na izlazu iz plamenika, jer je u ložištu miješanje nedovoljno.

U bočnom ložištu (sl. 53c) plamenici su postavljeni na obje bočne strane. Iz svakog se mlinova polovica goriva dovodi plamenicima na jednoj, a druga polovica na drugoj strani da bi se osigurala ravnomjerna dobava goriva ako jedan od mlinova prestane raditi. Bočno se loženje primjenjuje kad nema dovoljno mesta za čeono loženje. U sredini je bočnog ložišta temperatura

dimnih plinova najviša, pa to treba uzeti u obzir pri određivanju rasporeda i spoja ogrjevnih površina.

*U-ložište* služi za ugljene s malim udjelom plinovitih sastojaka (sl. 53d). Plamenici su smješteni na polovici visine ložišta i usmjereni su okomito prema dolje, tako da i mlaz goriva i zraka struji iz plamenika prema dolje (sl. 54c). Smjesa goriva i zraka, koja struji iz plamenika, najprije se zagrijava vrućim plinovima što na drugoj strani struje u suprotnom smjeru, tj. prema gore. Cijevi ogrjevnih površina u neposrednoj blizini plamenika obložene su vatrostalnim materijalom da bi se smanjio odvod topline i poboljšalo izgaranje. *Dvostruka U-ložišta* (sl. 53e) upotrebljavaju se za iste vrste ugljena kao i jednostruka U-ložišta, ali za učine kotlova veće od 250 t/h. Nedostatak im je otežana izvedba dovoda ugljene prašine.

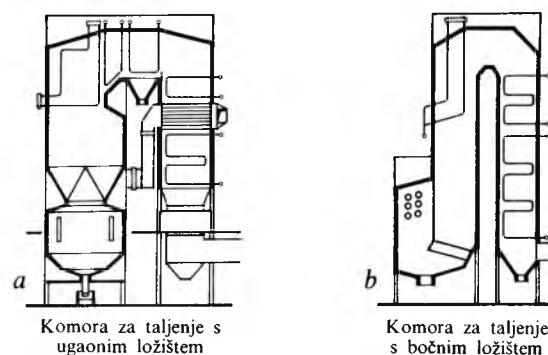
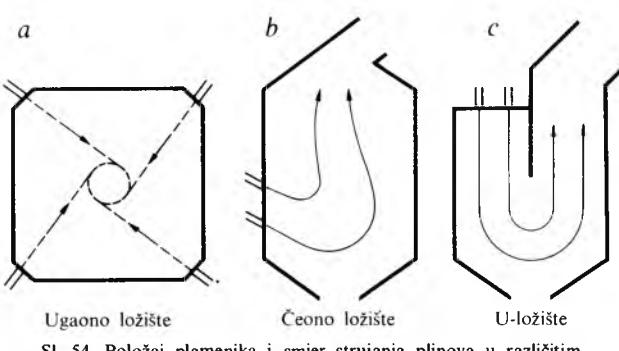
*Ložišta s odvođenjem pepela u tekućem stanju*. Kad se parni kotao loži kamenim ugljenom visokog sadržaja pepela, iz ložišta se pepeo odvodi u tekućem stanju. Taj se postupak ponekad primjenjuje i pri loženju mrkim ugljenom s ogrjevnom moći većom od 16 MJ/kg. Odvođenjem pepela u tekućem stanju poboljšava se stupanj djelovanja jer je potreban manji pretičak zraka  $\lambda$ , ali se stupanj djelovanja pogoršava zbog energije taljenja koju sa sobom odnosi rastaljeni pepeo. Energetski stupanj djelovanja pogoršava se kad je sadržaj pepela veći od 20%.

Postupak odvođenja pepela u tekućem stanju primjenjuje se kad temperatura taljenja pepela ne prelazi 1550 °C.

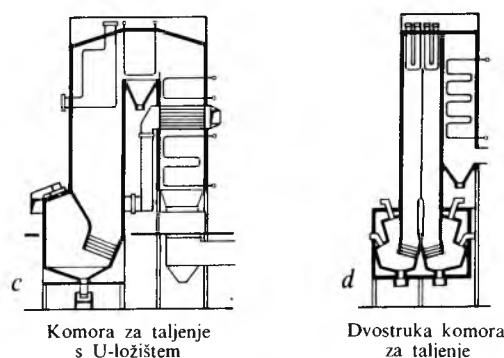
Dio ložišta u kojemu se tali pepeo konstruiran je ili kao komora za taljenje (sl. 55), ili kao ciklonsko ložište (sl. 56).

*Komora za taljenje pepela u ugaonom ložištu* (sl. 55a) na gornjoj je strani sužena da se smanji zračenje topline. Odvod rastaljenog pepela nalazi se u sredini dna komore. Iznad komore ložište se širi u obliku difuzora. U tom dijelu moraju se plinovi izgaranja ohladiti ispod temperature taljenja pepela, što se postiže pogodnim rasporedom ogrjevnih površina.

U bočnom ložištu (sl. 55b) plinovi izgaranja struje najprije prema dolje, pa se na dnu komore istaloži rastaljeni pepeo, a zatim plinovi struje prema gore te se ohlade ispod temperature taljenja pepela prije nego što dodu u dodir s ogrjevnim površinama. Radi boljih pogonskih uvjeta, kad su manja opterećenja, kotlovi većeg učina grade se i s dvostrukim komorama za taljenje.

Komora za taljenje s ugaonim ložištem  
Komora za taljenje s bočnim ložištem

Sl. 54. Položaj plamenika i smjer strujanja plinova u različitim tipovima ložišta

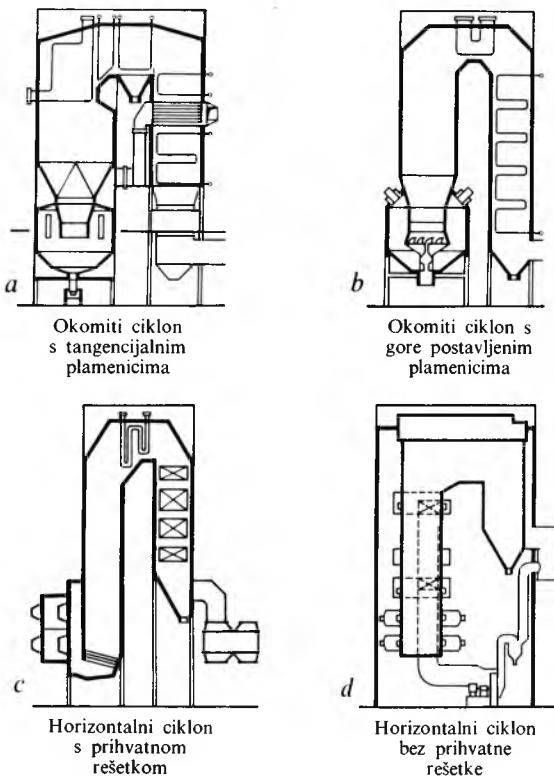


Sl. 55. Oblici ložišta s odvođenjem pepela u tekućem stanju s komorom za taljenje

Slična je konstrukcija komore za taljenje u U-ložištu s plamenicima smještenim na gornjoj strani ložišta (sl. 55c). Dvostrukim U-ložištem (sl. 55d) poboljšavaju se uvjeti pogona pri djelomičnom opterećenju kotla.

U okomitom *ciklonskom ložištu* s tangencijalnim plamenicima (sl. 56a) ciklonska je ogrlica postavljena na izlazu iz ciklona. Zbog toga su plinovi izgaranja prisiljeni da struje prema dolje i da tek nakon kružnog kretanja prođu kroz otvor ciklona. Tako se postiže veoma dobro odjeljivanje pepela iz plinova. Postoji i konstrukcija okomitoga ciklonskog ložišta s plamenicima postavljenim na gornjem dijelu ciklona (sl. 56b). Plamenici su tako nagnuti da plamen rotira.

U horizontalni ciklon (sl. 56c) dovodi se zrak tangencijalno pod relativno visokim tlakom. Tekući pepeo, koji se sakupi u ciklonu, otjeće kroz otvor na ogrlici ciklona, a plinovi što izlaze iz ciklona udaraju o okomiti stijenku gdje se zadrže još preostale čestice pepela. Zatim, radi daljeg hlađenja, plinovi prolaze kroz rešetku od vatrostalnog materijala. U većim se kotlovima postavljaju na prednjoj strani do četiri paralelno spojena ciklona. Jedan ciklon može osigurati proizvodnju pare od  $\sim 200$  t/h.



Sl. 56. Oblici ložišta s odvodom pepela u tekućem stanju s ciklonskim ložištem

Parni kotlovi vrlo velikog učina grade se s horizontalnim ciklonom bez rešetke (sl. 56d). Cikloni su smješteni s prednje i sa stražnje strane ložišta, a pomaknuti su po visini. Tako je za kotao učina 2400 t/h pare postavljeno osam ciklona na prednjoj, a sedam ciklona na stražnjoj strani. Pepeo se granulira pomoću hladnjih plinova izgaranja koji se uzimaju ispred zagrijača zraka. Ti se plinovi dovode  $\sim 3$  m iznad ciklona, a prije dodira s pregrijačima pare, što omogućuje regulaciju temperature pare.

**Ložište za izgaranje čvrstih goriva u fluidiziranom sloju.** Sredinom 1950-ih godina počeo je u Francuskoj razvoj parnih kotlova s ložištem za izgaranje čvrstog goriva u fluidiziranom sloju. Takav način izgaranja omogućuje da se u istom ložištu, bez ikakvih preinaka, upotrebljavaju najrazličitija čvrsta goriva bilo koje ogrevne moći, a pri tom je stupanj korisnosti izgaranja izvanredno visok. Izgaranje čvrstog goriva u fluidiziranom sloju pobudilo je interes i u ostalim zemljama, pa se u Engleskoj, Sjedinjenim Državama Amerike i SR Njemačkoj nakon 1960.

god. radi na razvoju tzv. anglosaksonskog postupka fluidizacije sloja goriva, koji se bitno razlikuje od francuskog postupka.

Anglosaksonskim postupkom dobiva se fluidizirani sloj sastavljen uglavnom od vatrootpornih tvari i pepela te vrlo malog dijela goriva, brzina je fluidizacije relativno malena, sredina je oksidacijska i ugljen izgara u sloju uz velik pretičak zraka, unutar sloja održava se temperatura između 750 i 900 °C odvođenjem topline preko izmjenjivača uporjenih u sloj. Do sada su se prema anglosaksonskom postupku gradili samo prototipni kotlovi, pa još nema praktičnih iskustava o prikladnosti tog postupka za industrijske primjene.

Prema francuskom se postupku fluidizirani sloj sastoji od čvrstog koka i malo pepela, brzina fluidiziranja je visoka, fluidizirani sloj je turbulentan, sredina je reduksijska, pa je potreban relativno mali pretičak zraka za izgaranje, unutar sloja temperatura iznosi 1200...1300 °C, čestice pepela u sloju međusobno se lijepe i talože kao troska koja se može selektivno odvoditi iz ložišta.

Francuski postupak ima tri bitne karakteristike. Prva je da se izgaranje obavlja u dva dijela i pri visokoj temperaturi. Primarni zrak za izgaranje dovodi se ispod rešetke u sloj goriva. Sredina je reduksijska, te je ta faza procesa zapravo isplinjivanje ugljena, pa se dobiva koks i plin male ogrevne moći ( $\sim 4000$  kJ/m<sup>3</sup>). Dobiveni koks, tj. čvrsti ugljik, izgara unutar fluidiziranog sloja, održavajući visoku temperaturu sloja, a plin se diže iznad sloja gdje izgara dovođenjem sekundarnog zraka. Ukupni pretičak primarnog i sekundarnog zraka u prosjeku iznosi  $\sim 20\%$ .

Druga je karakteristika da se zbog turbulencije sloja kapljice pepela u sloju međusobno slijepi, stvarajući čestice većih dimenzija koje se više ne mogu fluidizirati. Te se čestice talože u sloju kao u tekućini, stvarajući trosku koja sadrži jedva koji postotak neizgorjelog ugljika.

Treća je karakteristika vrlo visok stupanj korisnosti izgaranja ugljena. Primarno izgaranje nastaje unutar fluidiziranog sloja koji je turbulentan, pa su relativne brzine između čvrste tvari i plina vrlo visoke, izmijene tvari dodirom plina i čvrste tvari vrlo su aktivne, a poprečno miješanje čvrstih tvari vrlo je djelotvorno pa je sloj savršeno homogen. Sva ta svojstva i činjenica da kinetički procesa pogoduje visoku temperaturu u sloju i da se pepeo izdvaja selektivno omogućuju izvrstan stupanj korisnosti izgaranja ugljena u fluidiziranom sloju. U izgrađenim industrijskim postrojenjima s ložištem za fluidiziranje sloja goriva, prema francuskom postupku, stupanj korisnosti izgaranja ugljena, tj. omjer između energije oslobođene u ložištu i energije sadržane u gorivu, iznosi 99,5% za ugljene sa 10...15% sadržaja pepela, a uvjek iznad 85% za ugljene sa 55% sadržaja pepela.

Od 1954. god. francuska tvrtka Fives-Cail Babcock gradi za industrijske svrhe tzv. kotlove *Ignifluid* koji imaju ložište za izgaranje goriva u fluidiziranom sloju. Dosad najveći kotlovi *Ignifluid* imaju učin do 200 t/h, a ne postoje tehničke teškoće da se takvi kotlovi grade i za učine do 500 t/h.

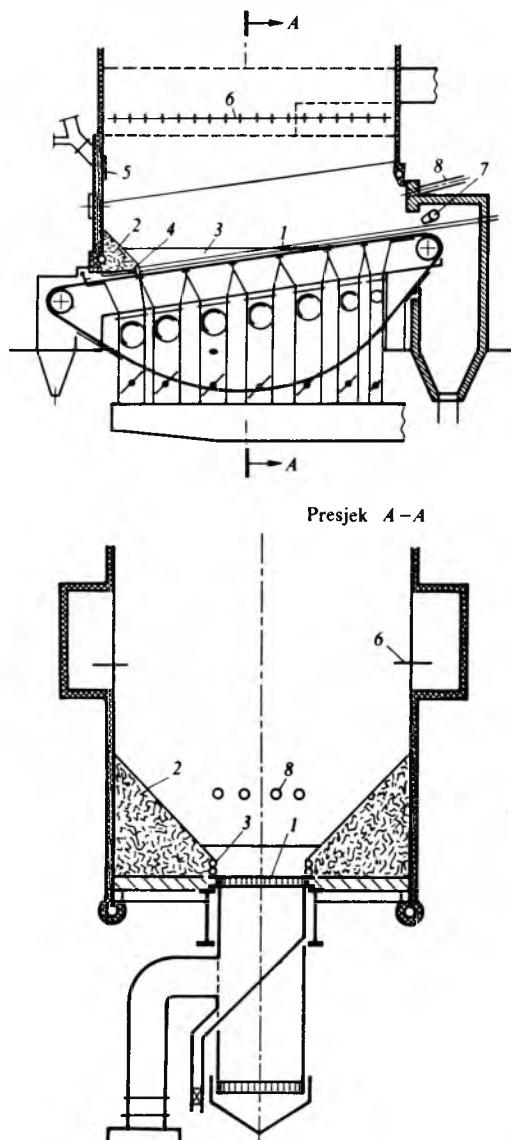
Ložište kotla *Ignifluid* prikazano je na sl. 57. U ložištu je koso postavljena relativno kratka mehanička rešetka (1) koja se giba uzlazno. Osim što se na rešetki stvara fluidizirani sloj goriva, ona služi i za odvod troske izvan ložišta. Primarni zrak za fluidizaciju i isplinjivanje ugljena dovodi se ispod rešetke kroz više zasebnih odjeljaka. Za svaki se odjeljak može neovisno regulirati količina zraka i tako po volji podesiti raspodjelu zraka uzduž čitave rešetke.

Između stijenki ložišta i prednjeg i bočnih rubova rešetke nalazi se nasip ugljena (2) koji ogradije fluidizirani sloj i štiti stijenke ložišta od visokih temperatura u sloju. Donji rub nasipa zadržavaju vodom hladene cijevi (3), koje ujedno i usmjeravaju tok troske. Ubacivanjem novog goriva nasip ugljena se stalno sam od sebe obnavlja.

Na prednjoj strani rešetke nalazi se pneumatska brtva (4) koja zadržava čestice goriva. Tlak zraka ispod rešetke sprečava da čestice goriva i pepela propadaju kroz raspore rešetke.

Sitnež ugljena ili drobljeni ugljen kontinuirano se ubacuje u ložište kroz okretnu mlaznicu (5). Najfinija ugljena prašina odmah izgara u prostoru, a ostalo gorivo pada na rešetku i uključuje se u fluidizirani sloj. Čestice ugljena koje padnu na stražnji

kraj rešetke ne stignu izgorjeti, pa bi s troskom otiše u bunker za odvod troske. Da bi se to sprječilo, sapnica (7) iznad kraja rešetke otpuhuje taj ugljen s površine troske i vraća na prednji dio rešetke. Neizgorjeli fine čestice ugljena koje se skupljaju u konvekcijskim izmjenjivačima topline i u uređaju za otprašivanje dimnih plinova ubacuju se pneumatskim uređajem kroz sapnicu (8) natrag u ložište.



Sl. 57. Ložište kotla Ignifluid. 1 mehanička rešetka, 2 nasip ugljena, 3 rashladne cijevi, 4 pneumatska brtva, 5 okretna mlaznica goriva, 6 sapnice sekundarnog zraka, 7 sapnica za otpuhivanje neizgorjelog goriva, 8 sapnica za povrat neizgorjelih finih čestica goriva

Sekundarni zrak, potreban za izgaranje plina oslobođenog iz fluidiziranog sloja, ulazi kroz sapnice (6) smještene na bočnim stijenkama ložišta. Regulator u dovodnom vodu zraka podešava količinu sekundarnog zraka.

#### Ložišta za tekuća goriva

Ložišta za tekuća goriva mogu biti konstruirana za laka i teška ulja, za otpadna i vrlo teška ulja (mazut, C-ulje) i za različite vrste lužina. Kao tekuće gorivo parnih kotlova velikog učina danas dolazi u obzir samo teško ili vrlo teško loživo ulje. Ta su ulja pri temperaturi okoliša toliko gusta da ih prije loženja treba ugrijati.

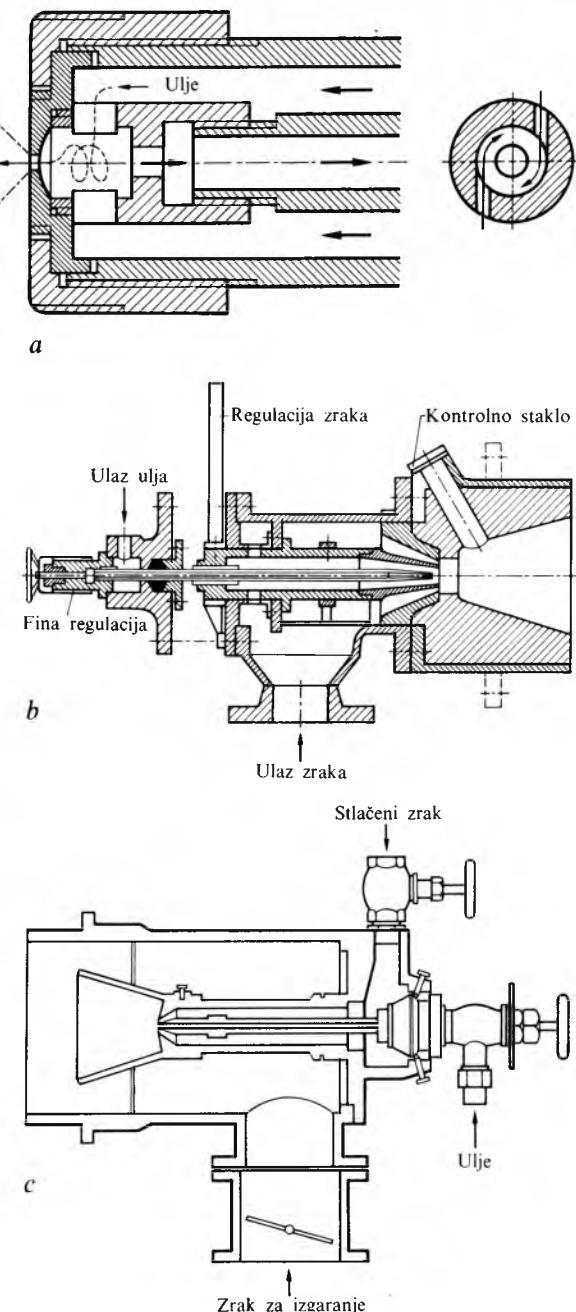
Iz glavnog se spremnika pumpa dnevna potrebna količina loživog ulja u dnevni spremnik sposoban da primi goriva za 12-24 sata pogona. Loživo ulje u dnevnom spremniku grijе se zasićenom vodenom parom na temperaturu od  $\sim 50^{\circ}\text{C}$ .

Dnevni je spremnik obično postavljen dovoljno visoko da loživo ulje može gravitacijski protjecati kroz filtre i dotjecati pumpama. Nakon što se u pumpama povisi tlak, loživo se ulje zagrijava do temperature  $\sim 150^{\circ}\text{C}$ , da bi se u plamenicima moglo fino raspršiti, ali i da bi isparili lako hlapljivi sastojci. Preko voda za stavljanje u pogon ulje se prije paljenja plamenika vraća u dnevni spremnik. Tako se, prije stavljanja u pogon, gorivo pumpa kroz zagrijaća da bi dostiglo temperaturu i viskoznost potrebnou za raspršivanje.

Za projektiranje ložišta od svih su karakteristika tekućeg goriva najvažnije donja toplinska moć  $H_d$  i viskoznost  $v$ . Za dobro i pravilno izgaranje potrebno je dobro raspršiti ulje i zatim ga ispariti (ispliniti). Kad se ulje rasprši i ispari, ono se zapali i izgori.

**Raspršivanje tekućeg goriva.** Raspršivanjem se uljni mlaz pretvara u uljne kapljice. Stupanj finoće raspršivanja ulja na sitne kapljice ovisi o mnogim faktorima od kojih su najvažniji:

- način raspršivanja (raspršivanje tlakom ulja, raspršivanje



Sl. 58. Plamenici za tlačno raspršivanje. a raspršivanje ulja vlastitim tlakom, b raspršivanje ulja zrakom niskog tlaka, c raspršivanje ulja zrakom visokog tlaka

stlačenim zrakom ili parom, raspršivanje centrifugalnom silom); b) konstruktivno rješenje i veličina sapnice, odnosno karakteristike raspršivanja sapnica; c) viskoznost goriva v koja ovisi o temperaturi i o ostalim karakteristikama ulja; d) površinska napetost uljnih kapljica  $\sigma$  koja iznosi  $20\cdots40 \text{ mN/m}$ .

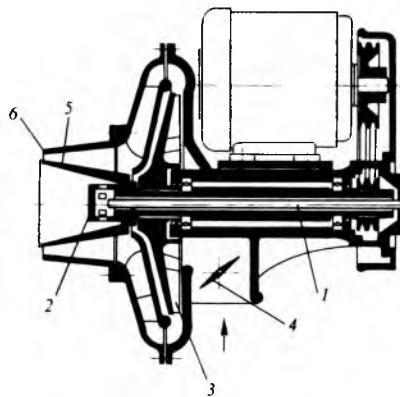
Mješavina uljnih kapljica (uljna magla) stvorena raspršivanjem u plameniku treba da sadrži kapljice približno jednakе veličine i jednolikou raspoređene u mješavini. Normalnim raspršivanjem stvara se  $10^6\cdots10^7$  uljnih kapljica po kubnom centimetru, a njihov promjer iznosi  $50\cdots300 \mu\text{m}$ . Karakteristike mješavine uljnih kapljica određene su srednjim promjerom kapljica  $d'$  i faktorom raspodjele  $n$ . Faktor raspodjele  $n$  mjera je za homogenost mješavine. Ako je  $n = 0$ , znači da u mješavini postoje vrlo male i vrlo velike kapljice. Za  $n = \infty$  sve uljne kapljice u mješavini imaju promjer jednak srednjem promjeru  $d'$ .

*Plamenici za tekuće gorivo.* Prema načinu raspršivanja živog ulja razlikuju se plamenici za *tlačno raspršivanje* i plamenici za *centrifugalno raspršivanje*.

Plamenici za tlačno raspršivanje mogu raditi pomoću visokog tlaka ulja, tlaka vodene pare, tlaka komprimiranog zraka ili različitim kombinacijama tih triju načina. Za tlačno raspršivanje loživo se ulje dovodi u plamenik pod tlakom od  $14\cdots30 \text{ bar}$ , pa se pomoću tangencijalnog ili spiralnog strujanja raspršuje i u finim kapljicama ubrzgava u ložiste. Na sl. 58 prikazano je nekoliko različitih tipova plamenika za tlačno raspršivanje.

U plameniku za centrifugalno raspršivanje (*rotacijski plamenik*) ulje se gravitacijom dovodi kroz šuplju osovinu u prošireni dio gdje se zbog visokog broja okretaja ( $6000\cdots7000 \text{ min}^{-1}$ ) raspršuje (sl. 59). Za centrifugalno raspršivanje nije potrebno da ulje bude ugrijano toliko kao za tlačno raspršivanje.

U ložistu su plamenici smješteni na isti način kao u ložistu kotla loženog ugljenom prašinom, tj. prema obliku ložista.

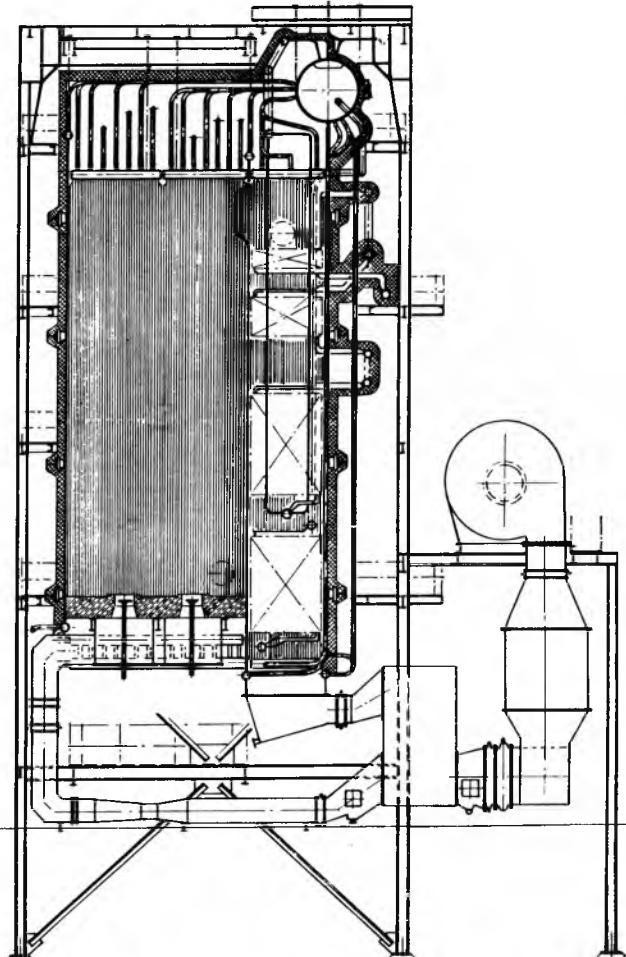


Sl. 59. Plamenik za centrifugalno raspršivanje ulja.  
1 dovod ulja, 2 razdjeljivač ulja, 3 ventilator zraka za izgaranje, 4 zaklopka za regulaciju zraka, 5 rotirajući konus, 6 zaštitni plašt plamenika

**Isparivanje (isplinjivanje) uljnih kapljica.** Za sve vrste uljnih plamenika raspršeno ulje mora ispariti u plinovitu fazu da bi moglo izgarati. Raspršene uljne kapljice različitih promjera  $d$  i određenog faktora nejednolikosti  $n$  gibaju se u struji zraka u ložistu i istodobno isparuju. Kada gotovo potpuno prijeđe u plinovito stanje, kapljice se zapale i izgaraju. Ako za potpuno izgaranje nema dovoljno kisika, a uljne su kapljice još u tekućem stanju, stvara se koks, a ako su kapljice već prešle u plinovito stanje, stvara se čada.

Isparivanje raspršenog ulja mora biti kontinuirano i bez pulzacija, tako da se prvo ispare i izgore finije kapljice pa zatim veće. Isparivanje je endotermni proces i plamen se isparivanjem hlađi. Nedovoljno pregrijano ulje i ulje visoke viskoznosti ima veće raspršene kapljice, pa je isparivanje sporije, što utječe neposredno na intenzivnost i trajanje izgaranja. Naime, isparivanje je funkcija veličine uljne kapljice, i to omjera površine i volumena kapljice. Što je taj omjer veći, to je isparivanje brže. Npr., ako se promjer uljne kapljice smanji na polovicu, nastaje četiri puta manja površina i šest puta manji volumen.

**Konstrukcija ložista za tekuće gorivo.** Veličina ložista za tekuće gorivo određuje se prema dopuštenom toplinskom opterećenju kotla, tj. jednako kao za ložiste kotla loženog ugljenom prašinom. Pri tom se uzima u obzir način raspršivanja, isparivanja i izgaranja tekućeg goriva, karakteristike tekućeg goriva, učin i karakteristike parnog kotla itd. Ložista za tekuće gorivo imaju slične oblike kao ložista kotlova loženih ugljenom prašinom, tj. postoji čeonu ložiste, bočno ložiste, ugaono ložiste i U-ložiste, koja se međusobno razlikuju prema smještaju plamenika.



Sl. 60. Parni kotao s prirodnim optokom, ložiste pod pretlakom, dva prolaza dimnih plinova. Učin kotla  $100 \text{ t/h}$ , dopušteni tlak  $11,25 \text{ MPa}$ , temperatura pregrijanja pare  $520^\circ\text{C}$ .

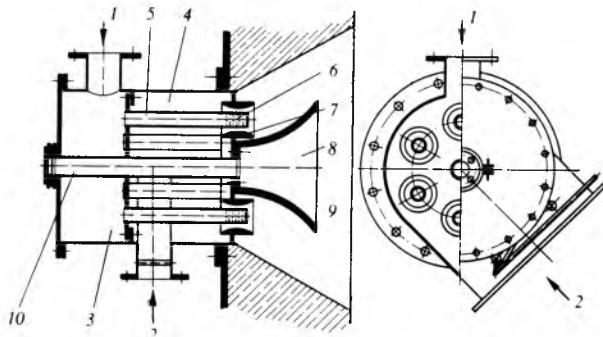
Na sl. 60 prikazan je parni kotao s prirodnim optokom i ložistem s pretlakom za izgaranje tekućeg goriva. Stijenke ložista izvedene su potpuno nepropusno kao membranski zidovi. Plamenici su smješteni na dnu ložista.

#### Ložista za plinovita goriva

Kao plinovita goriva služe prirodni (zemni) plin ili umjetni gorivi plinovi (gradski plin, koksni plin, plin iz visokih peći itd.). Za kotlove velikog učina dolazi u obzir samo zemni plin. U talionicama željeza dobivaju se velike količine plina iz visokih peći (grotleni plin), dovoljne i za kotao velikog učina. Međutim, količina proizvedenog grotlenog plina vrlo je promjenljiva, pa se nikada ne gradi kotao samo na grotleni plin, nego se loženje plinom kombinira s loženjem ugljenom prašinom ili loživim uljem. Takva kombinirana loženja primjenjuju se i za loženje plinom iz koksara ili plinom iz rafinerija nafte. Kad se postrojenju parnog kotla dovodi plin pod visokim tlakom ili u tekućem stanju, potrebna je reduksijska stanica za sniženje tlaka plina. Zemni plin pod visokim tlakom i s niskim temperaturama treba zagrijati da bi se spriječilo kondenziranje ugljikovodika s niskom temperaturom isparivanja.

Volumen ložišta za izgaranje plinovitog goriva određuje se prema dopuštenom toplinskom opterećenju. Pri proračunu plinskog izgaranja uzima se u obzir: a) vrsta, stanje i karakteristike gorivog plina, b) konstruktivno rješenje kojim se postiže potrebna dinamika izgaranja (fizikalni dio izgaranja), c) zakonitosti u pretvorbi tvari i topline pri izgaranju. Prema geometrijskom obliku, ložišta za plinovita goriva slična su ostalim ložištima za izgaranje goriva u prostoru, a razlikuju se samo u plamenicima. U uspoređenju sa čvrstim i tekućim gorivima miješanje zraka s gorivim plinom mnogo je povoljnije i brže. To je omogućilo razvoj različitih *plinskih plamenika* koji se mogu razvrstati u tri osnovne skupine: plamenici s potpunim miješanjem zraka i plinovitog goriva prije istjecanja u ložištu, vrtložni plamenici gdje turbulentno strujanje i miješanje nastaje u ložištu, te plamenici s usporednim strujanjem zraka i plinovitog goriva gdje iza plamenika strujanje zraka i plina postaje koso, pa se oni miješaju.

Na sl. 61 prikazan je plamenik za plin visoke ogrjevne moći (zemni plin, plin iz rafinerije nafte). Plin i zrak miješaju se izvan plamenika, a skretnikom se može usmjeravati mješavina plina i zraka te skratiti plamen. Plin izlazi velikom brzinom kroz sapnici koje su ugradene u sapnici za zrak, pa se tako postiže vrlo intenzivno miješanje i kratak plamen vrlo visoke temperature.

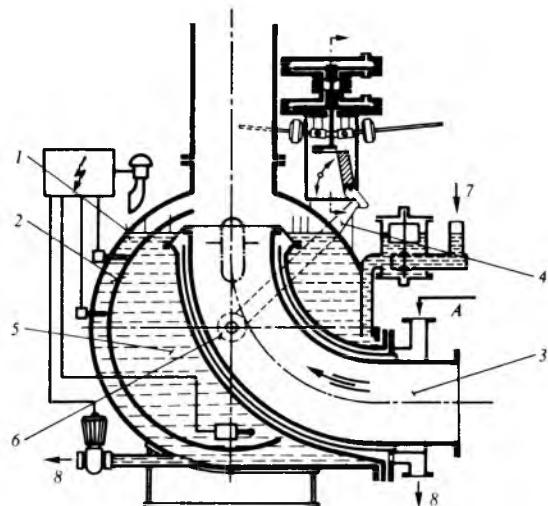


Sl. 61. Plamenik za plin visoke ogrjevne moći. 1 ulaz plina, 2 ulaz zraka, 3 razdjelna komora plina, 4 razdjelna komora zraka, 5 sapnice plina, 6 izbušena glava sapnica, 7 Venturijeve sapnici zraka, 8 usmjerivač gorive smjese, 9 prostor za miješanje plina i zraka, 10 otvor za punjenje i nadzor

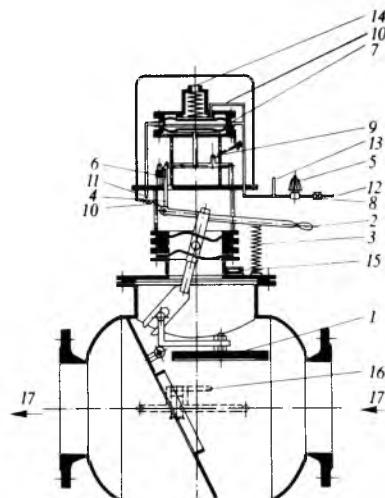
Zbog izvanredno brze reakcije izgaranja zrak i gorivi plin čine vrlo eksplozivnu mješavinu. Zato su u kotlovsom postrojenju s plinskim loženjem potrebni sigurnosni uređaji koji sprečavaju eksploziju mješavine zraka i gorivog plina. Ti su uređaji smješteni što bliže ložištu da bi se spriječilo skupljanje većih količina plina u vodovima zbog propusnosti između zatvorenoga sigurnosnog uređaja i plamenika. Sigurnosni uređaj automatski prekine dovod plina u plamenik kad tlak plina ili zraka u ložištu padne ili naraste ispod ili iznad određene granice. Sigurnosni uređaji za prekid dovoda plina rade pomoću *vodenog zapora* ili *suhog zapora*.

Sigurnosni uređaj na osnovi vodenog zapora prikazan je na sl. 62. U kućištu (1) koje je ispunjeno vodom nalazi se okretna posuda (2) u obliku poluprstena koja se okreće oko osovine (6). Kad se posuda zakrene udesno, zatvori se ulaz plina u plamenik, tj. stvari se voden zapor jer su oba kraja posude upravljeni u vodu (5). Priključak za ulaz plina (3) prekinut je u kućištu tako da ga zaporna posuda može prekriti. Zaporna posuda može se okretati kad se poluga (4) automatskog isključivača (9) osloboodi i pomoći pera pokrene. Automatski isključivač djeluje na principu razlike tlakova koji djeluju na membranske opne. Priključci (7) i (8) služe za punjenje i pražnjenje kućišta zapornom vodom.

Sigurnosni uređaj sa suhim zapornim organom (sl. 63) ima opne za plin i zrak na koje preko impulsnih vodova (10, 11, 12 i 13) djeluje pogonski tlak. Ako je pogonski tlak plina i zraka unutar dopuštenih granica, zaporna zaklopka (1) ostaje otvorena. Padne li tlak plina, stegne se plinska opna i time otvori regulacijski ventil (7) koji propušta zrak u atmosferu



Sl. 62. Sigurnosni uređaj s vodenim zaporom za prekid dovoda plina. 1 kućište, 2 okretna posuda, 3 ulaz plina, 4 poluga automatskog isključivača, 5 zaporna voda, 6 vodoravna osovina okretnе posude, 7 i 8 priključci za punjenje i pražnjenje uređaja zapornom vodom, 9 automatski isključivač



Sl. 63. Sigurnosni uređaj sa suhim zaporom za prekid dovoda plina. 1 zaklopka ventila, 2 ručna poluga, 3 opruga, 4 podešiva kuka, 5 trokraki magnetski ventil, 6 podešivi umetak, 7 zračni regulacijski ventil, 8 sapnica, 9 podešiva opruga za manjak zraka, 10 podešivač za manjak plina, 11 priključak plina, 12 priključak zraka, 13 ostali priključci, 14 odzračivanje, 15 sklopka, 16 obilazni ventil, 17 smjer strujanja plina

preko voda (14). Zbog toga se snizi tlak zraka u membranskom prostoru, pa tlak pera (9) pritisne opnu zraka prema gore i uključi polužni mehanizam koji zatvori zaklopku (1).

### PRIJENOS TOPLINE U PARNOM KOTLU

U parnom se kotlu energija proizvedena izgaranjem goriva u ložištu prenosi na ogrjevne površine (izmjenjivače topline) na tri načina: *provodenjem*, *konvekcijom* i *zračenjem*. Za objašnjene osnovnih pojmoveva i zakona prijelaza topline kao fizikalne pojave v. *Termodinamika*.

#### Prijenos topline provođenjem

Količina topline  $Q$  koja u vremenu  $\tau$  prolazi kroz čvrstu stijenku debljine  $s$  i površine  $A$  određena je izrazom

$$Q = \lambda \frac{t_1 - t_2}{s} A \tau, \quad (15)$$

gdje je  $\lambda$  koeficijent toplinske vodljivosti (toplinska provodnost) materijala stijenke, a  $t_1 - t_2$  razlika temperature prednje i stražnje strane stijenke. Ako se temperature stijenki s vremenom ne mijenjaju, provođenje topline je stacionarno.

Količina topline koja prolazi nekim tijelom u jedinici vremena naziva se toplinski tok  $\Phi$ , a definira se sa

$$\Phi = \frac{Q}{\tau}. \quad (16)$$

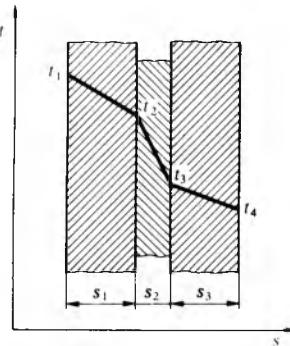
Količina topline koja prolazi jedinicom površine čvrstog tijela u jedinici vremena naziva se gustoćom toplinskog toka  $q$  koji iznosi

$$q = \frac{\Phi}{A} = \frac{Q}{A\tau} = \frac{t_1 - t_2}{s} \lambda. \quad (17)$$

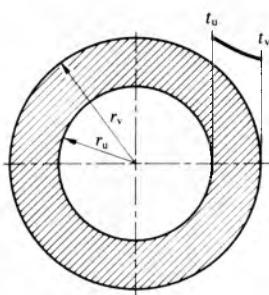
**Provodenje topline kroz ravnu stijenku.** Za ravnu stijenku ili ploču jednadžba toplinskog toka glasi

$$\Phi = A \frac{\lambda}{s} (t_1 - t_2). \quad (18)$$

Ta jednadžba vrijedi uz sljedeće pretpostavke: ploča je jednake debljine  $s$  i nema rubnih specifičnih karakteristika; ploča ima na suprotnim stranicama konstantne temperature  $t_1$  i  $t_2$ ; koeficijent toplinske vodljivosti  $\lambda$  ima konstantnu vrijednost po cijeloj debljini ploče.



Sl. 64. Pad temperature pri prolazu topline kroz složenu ravnou stijenku



Sl. 65. Pad temperature pri prolazu topline kroz cilindričnu stijenku

Ako je stijenka ili ploča sastavljena od više slojeva, a svaki sloj ima različit koeficijent toplinske vodljivosti  $\lambda$ , toplinski je tok u svim dijelovima ploče isti (sl. 64). Jednadžba toplinskog toka kroz ravnou ploču sastavljenu od  $i$  segmenata, uz koeficijent toplinske vodljivosti  $\lambda_i$  i za temperature od  $t_1$  do  $t_{i+1}$  glasi:

$$\Phi = A \frac{t_1 - t_{i+1}}{\sum \frac{s_i}{\lambda_i}}. \quad (19)$$

**Provodenje topline kroz cilindričnu stijenku.** Za prijenos topline u parnom kotlu važan je toplinski tok  $\Phi$  kroz neku cilindričnu stijenku, npr. kroz cijev. Kroz koncentričnu cilindričnu površinu polujmera  $r$  (sl. 65) struji toplina

$$\Phi = - A \lambda \frac{dt}{dr} = - \lambda 2 \pi r l \frac{dt}{dr}, \quad (20)$$

gdje je  $l$  duljina cijevi, a negativni predznak označuje da toplina struji u smjeru temperaturnog pada, tj. temperaturni gradijent  $dt/dr$  je negativan.

Pri stacionarnom provođenju topline mora kroz unutrašnju i vanjsku cilindarsku površinu prolaziti jednaka količina topline, odnosno jednak toplinski tok. Ako se s unutrašnje stijenke cijevi, koja ima temperaturu  $t_u$  i unutrašnji polujmer  $r_u$ , toplina provodi na vanjsku stijenku temperature  $t_v$  i vanjskog polujmera  $r_v$ , integracija izraza (20) daje jednadžbu toplinskog toka

$$\Phi = \frac{2 \pi \lambda l}{\ln \frac{r_v}{r_u}} (t_u - t_v). \quad (21)$$

### Prijenos topline konvekcijom

Jedan od bitnih načina prijenosa topline u parnom kotlu jest da fluid (voda, plin) struji uz čvrstu stijenku predaje ili oduzima toplinu čvrstoj stijenki. Gibanje fluida može biti prirodno ili prisilno.

Pri slobodnoj ili prirodnoj konvekciji čestice se fluida zagriju na topliju stijenku i tako postaju lakše. Zagrijane se čestice dižu uvis, pa nastaje strujanje. To je strujanje pobuđeno samo prijenosom topline, te se zato naziva *slobodnim* ili *prirodnim strujanjem*. Prekine li se prijenos topline, npr. ako se isključi grijanje, nestat će i slobodnog strujanja.

Prisilno strujanje kapljivine ili plina podržava se umjetno ili neovisno o prijenosu topline, a nameće se vanjskim uvjetima, npr. razlikom tlaka pri strujanju kroz cijevi. Zajedno s prisilnom konvekcijom pojavljuje se i prirodna konvekcija. Relativni utjecaj prirodne konvekcije raste s razlikom temperature pojedinih čestica, a opada s brzinom gibanja fluida, pa se pri velikim brzinama strujanja može zanemariti.

**Koeficijent prijelaza topline konvekcijom.** Kad se fluid temperature  $t_f$  giba uz čvrstu stijenku površine  $A$  i temperature  $t_s$ , izmjeni se između fluida i stijenke u vremenu  $\tau$  količina topline

$$Q = \alpha (t_s - t_f) A \tau, \quad (22)$$

gdje je  $\alpha$  koeficijent prijelaza topline konvekcijom. Koeficijent  $\alpha$  ima jedinicu  $\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$ , pa se razlikuje od koeficijenta toplinske vodljivosti  $\lambda$  koji ima jedinicu  $\text{W}/(\text{mK})$ .

Ako se jednadžba (22) podijeli površinom  $A$  i vremenom  $\tau$ , dobije se izraz za gustoću toka topline između fluida i stijenke

$$q = \alpha (t_s - t_f), \quad (23)$$

Kad se promatra gustoća toka topline neposredno uz stijenku, tj. prijenos topline kroz vrlo tanki sloj, može se pisati

$$q = - \lambda \frac{dt}{dn}, \quad (24)$$

gdje je  $n$  normala na stijenku, a negativni predznak na desnoj strani pokazuje da toplina uvek struji u smjeru niže temperature. Ako se izjednače izrazi (23) i (24), dobiva se

$$\alpha = - \lambda \frac{dt}{dn} \frac{1}{(t_s - t_f)}, \quad (25)$$

što pokazuje vezu između koeficijenata  $\alpha$  i  $\lambda$ .

Iz izraza (25) vidi se da je koeficijent prijelaza topline  $\alpha$  funkcija i temperaturnog gradijenta  $dt/dn$  koji ovisi o mnogo različitim i često nepoznatim faktorima, kao što su oblik i raspored površina prijelaza topline, fizikalna svojstva fluida, brzina i režim strujanja fluida, specifična toplina itd. Zato je u malo složenijem slučaju izvanredno teško ili nemoguće analitički odrediti točnu vrijednost koeficijenta  $\alpha$ , pa se za praktične proračune upotrebljavaju vrijednosti dobivene na osnovi pokusa i zakona sličnosti.

Za turbulentno strujanje plinova u cijevima ili uspoređeno s cijevima normalne tehničke hraptavosti, prema Schacku, opća jednadžba za koeficijent prijelaza topline glasi:

$$\alpha = 0,0254 c_p^{0.81} \lambda^{0.19} w_0^{0.75} d^{-0.25}, \quad (26)$$

gdje je  $c_p$  specifični toplinski kapacitet fluida,  $\lambda$  koeficijent toplinske vodljivosti fluida,  $d$  promjer cijevi, a  $w_0$  brzina strujanja fluida reducirana na temperaturu od  $0^\circ\text{C}$  i tlak od  $0,1013 \text{ MPa}$ . Ta jednadžba vrijedi i za turbulentno strujanje pregrijane pare u cijevima, pa ako se uvrste fizikalne vrijednosti za pregrijanu paru, jednadžba (26) prelazi u oblik

$$\alpha = 4,42 + 0,3 \left( \frac{t}{100} \right) w_0^{0.75} d^{-0.25}, \quad (27)$$

gdje je  $t$  temperatura u  $^\circ\text{C}$ .

Karakteristike strujanja fluida okomito na cijevne snopove drugačije su nego karakteristike strujanja fluida u cijevima ili uz cijevi. Prema rezultatima pokusnih ispitivanja O. L. Piersona, E. C. Huga, E. D. Grimisona i drugih može se za okomito

strujanje plina na usporedni ili izmjenični poredak cijevi u snopu od 10 redova postaviti sljedeća jednadžba za koeficijent prijelaza topline:

$$\alpha = 0,29 f_a \lambda \eta^{-0,61} \varrho_0^{-0,61} w_0^{0,61} d^{-0,39}, \quad (28)$$

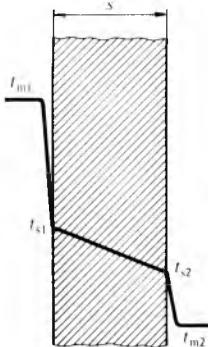
gdje je  $\eta$  dinamička viskoznost plina,  $\varrho_0$  normalna gustoća plina, a  $f_a$  koeficijent ovisan o poretku cijevi i o Reynoldsovom broju.

Za koeficijent prijelaza topline pri prisilnom turbulentnom strujanju vode postavili su Soennecken, Stender i drugi jednostavnu jednadžbu

$$\alpha = 3373 w^{0,85} (1 + 0,014 t_v), \quad (29)$$

gdje je  $w$  brzina strujanja vode, a  $t_v$  temperatura vode.

**Koeficijent prolaza topline.** Pri konvektivnom prijelazu topline u parnom se kotlu toplina prenosi od fluida (vode ili plina) preko čvrste stijenke na drugi fluid. Pri tom procesu toplina prelazi od fluida temperature  $t_{fl}$  na površinu stijenke temperature  $t_{s1}$ , zatim se provodi kroz stijenkou od površine temperature  $t_{s1}$ , do druge površine temperature  $t_{s2}$  da bi konačno prešla od stijenke temperature  $t_{s2}$  na drugi fluid s temperaturom  $t_{f2}$  (sl. 66).



Sl. 66. Prikaz vrijednosti prolaza topline

Kad je taj proces stacionaran, tj. temperature fluida i temperature preko obje površine stijenke ostaju tokom procesa konstantne, vrijede sljedeće jednadžbe:

1) toplinski tok od fluida 1 (vode ili plina) temperature  $t_{fl}$  na prednju stranu stijenke temperature  $t_{s1}$  i površine  $A$  iznosi

$$\Phi_1 = \alpha_1 A (t_{fl} - t_{s1}), \quad (30)$$

gdje je  $\alpha_1$  koeficijent prijelaza topline fluida 1;

2) toplinski tok kroz stijenkou debljine  $s$ , tj. od prednje strane temperature  $t_{s1}$  do stražnje strane temperature  $t_{s2}$  iznosi

$$\Phi_2 = \frac{\lambda}{s} (t_{s1} - t_{s2}) A, \quad (31)$$

gdje je  $\lambda$  koeficijent toplinske vodljivosti stijenke;

3) toplinski tok od stražnje strane stijenke temperature  $t_{s2}$  na fluid 2 temperature  $t_{f2}$  iznosi

$$\Phi_3 = \alpha_2 A (t_{s2} - t_{f2}), \quad (32)$$

gdje je  $\alpha_2$  koeficijent prijelaza topline fluida 2.

Zbroj tih triju jednadžbi daje jednadžbu ukupnog toplinskog toka od fluida 1 kroz čvrstu stijenku na fluid 2

$$\Phi = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} A (t_{fl} - t_{f2}), \quad (33)$$

pa jednadžba koeficijenta prolaza topline  $k$ , koji se izražava u  $\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$ , glasi

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (34)$$

Ako se stijenka sastoji od  $i$  slojeva različitih debljina  $s_i$  i različitih koeficijenata toplinske vodljivosti  $\lambda_i$ , jednadžba je koeficijenta prolaza topline

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{s_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (35)$$

U plamenocijevnom kotlu površina stijenke  $A$  računa se s unutrašnjim promjerom plamene cijevi  $d_w$ , tj.  $A = d_w \pi l$ , jer je toplinski tok od dimnih plinova u cijevi na vodu i vodenu paru izvan cijevi, pa je jednadžba koeficijenta prolaza topline

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{d_w}{2\lambda} + \ln \frac{d_v}{d_u} + \frac{d_w}{\alpha_2 d_v}}. \quad (36)$$

U vodocijevnom kotlu, gdje se toplinski tok prenosi od dimnih plinova izvan cijevi na vodu i vodenu paru u cijevima, površina  $A$  računa se s vanjskim promjerom cijevi  $d_v$ , tj.  $A = d_v \pi l$ , pa je jednadžba koeficijenta prolaza topline

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{d_v}{2\lambda} + \ln \frac{d_v}{d_u} + \frac{d_v}{\alpha_2 d_u}}. \quad (37)$$

U parnom se kotlu mijenjaju temperature fluida (vode i plina ili plina i plina) uzduž površine na kojoj se prenosi toplina. Toplina može prolaziti između dva fluida koji miruju, a temperatura se mijenja kao funkcija vremena na svim mjestima površine podjednako, ili toplina prolazi pri vremenski stalnoj temperaturi na istom mjestu, ali se u smjeru strujanja fluida temperatura mijenja uzduž površine. Ta se ova procesa mogu odvijati istodobno, ali pri ustaljenom pogonu kotla bitan je stacionarni prolaz topline s različitim temperaturama u smjeru strujanja fluida i vremenski konstantnim temperaturama na istim mjestima. Takav je prolaz topline definiran izrazom

$$\ln \frac{t_{1i} - t_{2i}}{t_{1u} - t_{2u}} = -kA \left( \frac{1}{m_1 c_1} + \frac{1}{m_2 c_2} \right), \quad (38)$$

gdje je  $t$  temperatura fluida,  $m$  masa fluida u jedinici vremena,  $c$  specifični toplinski kapacitet fluida, indeks 1 označuje fluid koji predaje toplinu, indeks 2 fluid koji prima toplinu, indeks u ulaz fluida, a indeks i izlaz fluida.

Tok temperature uzduž stijenke na kojoj se prenosi toplina slijedi logaritamsku krivulju. U proračunima se promjenljivi temperturni tokovi najčešće zamjenjuju srednjim temperaturama. Prema smjeru strujanja fluida uzduž ogrjevne površine razlikuje se istosmjerno, protusmjerno i unakrsno strujanje.

### Prijenos topline zračenjem

U ložištu i u strujnim kanalima parnog kotla toplina se prenosi zračenjem kao izmjena topline između plinova izgaranja i ogrjevnih površina. Prema Kirchhoffovu zakonu energija zračenja  $E$  dviju paralelnih površina iznosi

$$E_1 = C_1 \left( \frac{T_1}{100} \right)^4, \quad E_2 = C_2 \left( \frac{T_2}{100} \right)^4, \quad (39)$$

gdje je  $C$  konstanta zračenja,  $T$  apsolutna temperatura, a indeksi 1 i 2 označuju površine.

Vrijednost konstante složenog zračenja  $C_{12}$ , što nastaje u stanju ravnoteže izmijenjenih toplina od površine 1 temperature  $T_1$  na površinu 2 niže temperature  $T_2$ , određena je izrazom

$$C_{12} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_c}}, \quad (40)$$

gdje je  $C_c$  konstanta zračenja crnog tijela jednaka  $5,667 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$ .

Jednadžba gustoće toplinskog toka zračenjem između površina 1 i 2 glasi

$$q_{12} = C_{12} \left| \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right|. \quad (41)$$

Prema tome, ukupna količina topline  $Q_{12}$  koja u jedinici vremena prelazi zračenjem između dviju jednakih ili približno jednakih površina iznosi

$$Q_{12} = A_z q_{12} = A_z C_{12} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (42)$$

gdje je  $A_z$  ogrjevna površina zračenja.

Omjer energije zračenja stvarnog tijela  $E$  i energije zračenja crnog tijela  $E_c$  zove se *emisijski faktor*  $\varepsilon$ . Taj je faktor ujedno i *apsorpcijski faktor*  $a$

$$\varepsilon = \frac{E}{E_c} = \frac{C}{C_c} = a. \quad (43)$$

**Ekvivalentna ogrjevna površina zračenja.** Stjenke na kojima se u parnom kotlu izmjenjuje toplina zračenjem sastavljene su od niza cijevi, a nalaze se ispred šamotnog zida ili su smještene u ložištu kao membranske stjenke. Razmak (korak) između cijevi najčešće je veći od vanjskog promjera cijevi  $d_v$ , pa nastaje prekinuta ogrjevna površina zračenja  $A_z$ . Utjecaj kuta zračenja i razmaka (koraka) cijevi uzima se u obzir faktorom  $\psi$ , te se tako dobiva ekvivalentna ogrjevna površina

$$A_e = \psi A_z \quad (44)$$

Vrijednosti faktora  $\psi$  određene su ispitivanjima na modelima i stvarnim ogrjevnim površinama zračenja u izgrađenim kotlovima.

Ako se u jednadžbu (42) umjesto ogrjevne površine zračenja  $A_z$  uvrsti ekvivalentna ogrjevna površina  $A_e$  prema izrazu (44), proizlazi

$$Q_{12} = Q_z = q_{12} \psi A_z \quad (45)$$

te se tako uzima u obzir specifičnost konstrukcije ogrjevne površine u ložištu.

Kada se na nekim površinama toplina prenosi istodobno zračenjem i konvekcijom, pogodno je prijenos topline zračenjem prikazati prividnim koeficijentom prijelaza topline  $\alpha_z$ . Ako se izraz za ukupni intenzitet zračenja između dviju površina podijeli s razlikom temperature ( $T_1 - T_2$ ), dobiva se *prividni koeficijent prijelaza topline zračenja*

$$\alpha_z = \frac{q_{12}}{T_1 - T_2} = \frac{C_{12} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{T_1 - T_2}. \quad (46)$$

Ako je razlika temperatura ( $T_1 - T_2$ ) ista za prijenos topline zračenjem i konvekcijom, tada jednadžba ukupne gustoće toplinskog toka glasi

$$q_u = (\alpha_z + \alpha) \Delta t_{sr}, \quad (47)$$

gdje je  $\alpha_z$  prividni koeficijent prijelaza topline zračenja,  $\alpha$  koeficijent prijelaza topline konvekcijom, a  $\Delta t_{sr}$  srednja logaritamska temperaturna razlika definirana izrazom

$$\Delta t_{sr} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}. \quad (48)$$

**Toplinsko zračenje plinova izgaranja.** Volumen dimnih plinova nastalih izgaranjem u ložištu kotla sastoji se od smjese dijatermih plinova, koji ne mogu emitirati niti apsorbirati toplinsko zračenje, i adjatermih plinova, kao što su vodena para, ugljik-dioksid i sumpor-dioksid, koji u jednom dijelu svog spektra emitiraju i apsorbiraju toplinu (v. Plinovi). Emitiranje i apsorpcija toplinskog zračenja tih plinova ovisi o njihovoj temperaturi i gustoći (tj. o tlaku plina  $p$ ), a intenzitet zračenja o debljini sloja  $s$ .

Ispitivanjima su određene iskustvene jednadžbe intenziteta toplinskog zračenja najvažnijih adjatermih plinova zastupljenih u smjesi dimnih plinova u ložištu kotla.

Intenzitet je toplinskog zračenja ugljik-dioksida u dimnim plinovima

$$q_{CO_2} = 0,1043(p_s)^{0,4} \left( \frac{T_{pl}}{100} \right)^{3,2}, \quad (49)$$

gdje je  $p$  parcijalni tlak plina,  $s$  debljina sloja plina, a  $T_{pl}$  apsolutna temperatura plina. Izraz (49) vrijedi u području umnoška  $p_s = 0,0003 \dots 0,04$  m MPa i temperature plina  $T_{pl} = 773 \dots 2073$  K.

Intenzitet je toplinskog zračenja vodene pare u dimnim plinovima

$$q_{H_2O} = (0,047 - 0,876 \cdot 10^{-6} p_s)(p_s)^{0,6} \left( \frac{T_{pl}}{100} \right)^{2,32 + 0,0297 \sqrt{p_s}}. \quad (50)$$

Taj izraz vrijedi u području  $p_s = 0,01 \dots 0,04$  m MPa i temperatu  $T_{pl} = 400 \dots 1700$  K.

Toplinsko zračenje sumpor-dioksida intenzivno je u području spektra za valne duljine  $2,8 \dots 4,2$  μm. Međutim, budući da još nema dovoljno potpuno provjerenih pokusnih podataka, uzima se da je zračenje sumpor-dioksida jednakno zračenju ugljik-dioksida na istoj temperaturi  $T_{pl}$  i pri jednakom umnošku  $p_s$ .

Ako se mješavina plinova izgaranja sastoji od ugljik-dioksida i plinova koji ne zrače, tada je zračenje mješavine jednakno zračenju ugljik-dioksida prema izrazu (49). U mješavini vodene pare i plinova koji ne zrače, ako je udio parcijalnog tlaka vodene pare u mješavini velik, zračenje je mješavine jednakno zračenju vodene pare prema izrazu (50), a ako je udio vodene pare u mješavini malen, tada se emisijske vrijednosti vodene pare smanjuju.

Ukupan tok izmjene topline zračenjem između volumena plinova u ložištu i stjenki ogrjevnih površina glasi

$$Q_z = Q_{12} = A_z C_{12} \left[ \left( \frac{T_{pl}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{st}}{100} \right)^4 \right], \quad (51)$$

gdje je  $T_{pl}$  apsolutna temperatura plina, a  $T_{st}$  apsolutna temperatura stjenki ogrjevnih površina. Konstanta složenog zračenja  $C_{12}$  odredi se prema izrazu (40) računajući s iskustvenim vrijednostima konstante zračenja volumena dimnih plinova  $C_1$  i konstante zračenja ogrjevne površine  $C_2$ .

Slično se, primjenom iskustvenih podataka, određuje toplinsko zračenje plinova u dimnim kanalima i prostorima cijevnih snopova izvan ložišne komore.

**Toplinsko zračenje svjetlećeg plamena.** Svjetleći plamen, što nastaje pri izgaranju goriva u ložištu, sadrži užarene čestice ugljika i pepela, pa zbog toga zrači toplinu.

Na zračenje svjetlećeg plamena utječu: vrsta i stanje goriva (čvrsto, tekuće, plinovito), temperatura i pretičak zraka za izgaranje, dimenije i oblik plamena, koncentracija užarenih čestica u plamenu, omjer ugljika i vodika u gorivu, oblik i toplinsko opterećenje ložišta itd. Zbog mnogo složenih činilaca o kojima ovisi intenzitet toplinskog zračenja svjetlećeg plamena, u praktičnim proračunima se primjenjuju iskustvene vrijednosti i podaci pokusa, polazeći od izraza za emisijski faktor svjetlećeg plamena  $\varepsilon_f$  koji glasi

$$\varepsilon_f = 1 - e^{-kcs}, \quad (52)$$

gdje je  $k$  faktor zračenja plamena ovisan o temperaturi, o fizikalnim karakteristikama itd.,  $c$  faktor koncentracije užarenih čestica u plamenu, a  $s$  debljina plamena.

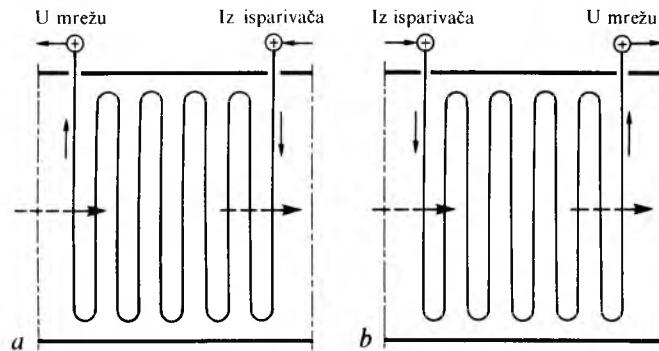
#### Prijenos topline na izmjenjivaču topline u parnom kotlu

**Prijenos topline na isparavače vode.** Isparavači vode koji su smješteni u ložištu kotla (ekransi sustav, membranske cijevne stjenke) ujedno služe za hlađenje ložišta i na njih se toplina pretežno zračenjem plinova izgaranja i zračenjem svjetlećeg plamena. Na isparavače vode smještene u području visokih temperatura blizu ložišta prenosi se toplina plinova izgaranja zajednički zračenjem i konvektivno. Međutim, najveći dio isparavača vode obično se nalazi u području kotla udaljenom od komore izgaranja, tj. u području nešto nižih temperatura plinova izgaranja, pa se na taj dio isparavača toplina prenosi pretežno konvektivno.

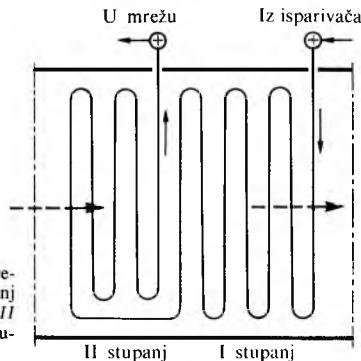
**Prijenos topline na pregrijače pare.** Pregrijač pare obično ima dva ili više stupnjeva pregrijanja. Ogrjevne površine prvog stupnja ugrađene su u stjenke ložišta kotla ili su ovješene kao zavjesu u prostoru ložišta, pa se na njih toplina prenosi zračenjem. Ogrjevne površine drugog stupnja nalaze se u prolazima dimnih

plinova izvan ložišta i na njih se toplina prenosi konvekcijom. Takva kombinacija ozračenih i konvektivnih dijelova pregrijala omogućuje da se lakše postigne približno konstantna temperatura pregrijavanja pare unutar širokog raspona učina parnog kotla. Naime, kad se poveća učin kotla, kroz ozračeni dio pregrijala mnogo više se poveća protok pare nego toplina zračenja, pa je pregrijanje pare manje. U konvektivnom dijelu pregrijala s povećanjem učina kotla povećavaju se brzine strujanja dimnih plinova i pare, pa se zbog toga poveća koeficijent prolaza topline  $k$  i ukupno prenesena toplina površini pregrijala.

Količina topline koja se od plinova izgaranja prenosi na vodenu paru u cijevima pregrijala ovisi i o odnosu smjera nastrujavanja plinova na cijevi pregrijala prema smjeru strujanja pare u cijevima. Najčešće se primjenjuje unakrsno-istosmjerno ili unakrsno-protusmjerno strujanje (sl. 67). U pregrijalu sa dva stupnja obično je u prvom stupnju unakrsno-protusmjerno strujanje, a u drugom stupnju unakrsno-istosmjerno strujanje (sl. 68).



Sl. 67. Položaj cijevi za paru u pregrijalu s jednim stupnjem. a) unakrsno-protusmjerno strujanje, b) unakrsno-istosmjerno strujanje



Sl. 68. Položaj cijevi za paru u pregrijalu sa dva stupnja: I stupanj unakrsno-protusmjerno strujanje, II stupanj unakrsno-istosmjerno strujanje

Zbog visokih temperatura plinova izgaranja u području pregrijala te visokih temperatura i visokog tlaka pare u pregrijajući materijal cijevi ogrjevnih površina pregrijala veoma je napregnut. Zato se odnosom strujanja plinova i pare nastoji doprinijeti takvim temperaturnim uvjetima da se optimalni toplinski učin pregrijala postigne uz što je moguće niže temperature materijala cijevi.

**Regulacija temperature pregrijanja pare.** Temperatura pregrijanja pare važna je veličina koja treba imati predviđenu konstantnu vrijednost. Međutim, promjenom opterećenja (učina) parnog kotla ili promjenom kvalitete goriva mijenja se temperatura pregrijanja pare, što utječe na stupanj korisnosti kotla, a i na sigurnost pogona ako temperatura pregrijane pare prijeđe dopuštenu granicu. Zbog toga se u određenom području opterećenja kotla (npr. između 70...100% opterećenja) pomoću posebne regulacije održava predviđena konstantna temperatura pregrijane pare.

Pregrijavanje pare najčešće se regulira između prvog i drugog dijela pregrijala. Iza drugog dijela pregrijala ugrađen je termostat koji djeluje na sustav regulacije pregrijanja, tako da se para između prvog i drugog dijela toliko ohladi da se naknadnim pregrijavanjem u drugom dijelu postigne na kraju pregrijala

predviđena temperatura pare. Regulacija temperature pregrijane pare može se zasnovati na promjeni režima strujanja dimnih plinova, ili hlađenjem pregrijane pare pomoću površinskih hladnjaka, ili uštrcavanjem vode u pregrijanu paru.

Regulacija temperature pregrijanja pomoću promjene vođenja dimnih plinova može se provesti na nekoliko različitih načina, ali nijedan od njih ne regulira temperaturu dovoljno točno, a svaki je povezan s konstrukcijskim teškoćama. Zato se takva regulacija danas rjeđe primjenjuje, i to samo za kotlove manjeg učina. Jedan od načina takve regulacije jest da se pokretanjem plamenika u ložištu aktivira veća ili manja ozračena površina i time postiže viša ili niža temperatura plinova u području pregrijala. Drugi je način da se pri malom opterećenju kotla dovodi u ložište jedan dio (do 40%) već ohlađenih plinova izgaranja. Treći je način da se jedan dio vrućih plinova izgaranja odvodi posebnim sporednim vodom mimo pregrijala pare.

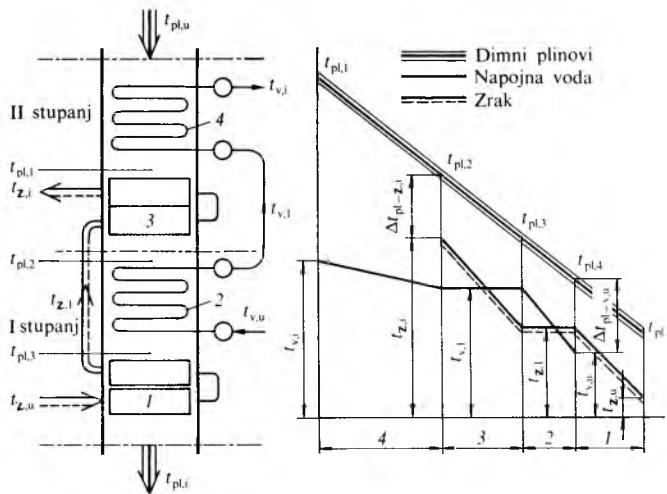
Današnji parni kotlovi srednjeg i velikog učina imaju regulaciju temperature pregrijanja uštrcavanjem vode u paru ili hlađenjem pregrijane pare pomoću površinskih hladnjaka. Napojna voda ili kondenzat uštrcava se u buben kotla iz prvog stupnja pregrijala, te se tako para ohladi prije ulaska u drugi stupanj pregrijala. Iza prvog stupnja pregrijala para se može hladiti i pomoću površinskih hladnjaka koji su ugrađeni u bubenju kotla, ali takvo je rješenje konstrukcijski složeno, a ne može se kontrolirati propusnost hladnjaka. Zato parni kotlovi većeg učina, visokog radnog tlaka i visokih temperatura pare imaju površinske hladnjake za regulaciju temperature pregrijanja smještene zaštebno, izvan kotla.

**Prijenos topline u zagrijaćima vode.** U parnom kotlu je zagrijać vode smješten u izlaznom dijelu kanala za dimne plinove. Ako se preuzme konvektivno toplino od dimnih plinova, zagrijać vode povisuje temperaturu napojne vode, a smanjuje temperaturu dimnih plinova, što znači da smanjuje i gubitak energije sadržane u dimnim plinovima na izlazu iz parnog kotla.

U kotlovima nižeg i srednjeg tlaka zagrijać vode zagrijava pojnu vodu na temperaturu 30...50 °C nižu od temperature isparivanja. U visokotlačnim kotlovima mogu se predviđjeti zagrijaći vode u kojima se dio vode i isparuje. To su tzv. *predisparivači vode*, izvedeni kao završni dio ogrjevne površine zagrijaca vode ili kao odvojena ogrjevna površina, a u njima se isparuje 5...20% od ukupno proizvedene pare u kotlu.

Prema termičkoj shemi parnog kotla, zagrijać vode može imati jedan ili više stupnjeva. Ponekad su između pojedinih stupnjeva zagrijaca vode smješteni dijelovi zagrijaca zraka (sl. 69).

Zagrijać vode je najčešće izrađen u obliku vodoravno položenih cijevnih zmija s usporednim ili izmjeničnim poretkom cijevi. U parne kotlove manjeg i srednjeg tlaka ugrađuju se (danasa sve rjeđe) lijevani rebrasti zagrijaci vode. Rebra se nalaze na vanjskoj strani cijevi, tj. na strani dimnih plinova. Lijevani rebrasti zagrijaci vode ugrađuju se katkad i u kotlove viših tlakova kao završni dijelovi ogrjevne površine, jer je otpornost lijevanog



Sl. 69. Smještaj ogrjevnih površina zagrijaca vode i zagrijaca zraka sa shemom temperaturnih tokova dimnih plinova, vode i zraka

materijala prema koroziji višestruko veća od otpornosti materijala vučenih ili valjanih cjevi.

Sustav strujanja dimnih plinova i vode u zagrijivaču vode najčešće je protusmjerno-unakrstan, a rjeđe istosmjerno-unakrstan. Strujanje je vode u zagrijivaču prisilno djelovanjem napojne pumpe.

**Prijenos topline u zagrijivačima zraka.** Kad se upotrebljava gorivo male ogrjevne moći, a to su pretežno čvrsta goriva, treba zagrijati zrak za izgaranje jer se inače ne može postići vrijeme izgaranja u tehnički prihvatljivim granicama. Zato se, već prema vrsti i sastavu goriva, sadržaju vlage u gorivu, smještaju ogrjevnih površina i geometrijskom obliku ložišta, zrak potreban za izgaranje zagrijava i do  $500^{\circ}\text{C}$ . Zrak za izgaranje zagrijava se u zagrijivačima zraka pomoću plinova izgaranja, što smanjuje gubitke energije sadržane u dimnim plinovima na izlazu iz kotla, pa se tako povećava i stupanj korisnosti kotla.

Temperatura zraka koji se dovodi u ložište zajedno s gorivom (primarni zrak) ne smije premašiti neku maksimalnu vrijednost koja ovisi o načinu loženja i svojstvima goriva. U ložištu s rešetkama temperatura zraka ne smije biti mnogo veća od  $100^{\circ}\text{C}$  (do  $200^{\circ}\text{C}$  kad se loži vrlo vlažnim ugljenom) da se šipke rešetaka ne bi suviše ugrijale. Kad se loži ugljenom prašinom, maksimalna temperatura smješte zraka i ugrijene prašine ovisi o sadržaju vlage u ugljenu i iznosi između  $120^{\circ}\text{C}$ , za ugljen s malim sadržajem vlage, i  $180^{\circ}\text{C}$ , za mrki ugljen i lignit s visokim sadržajem vlage. To je ograničenje temperature primarnog zraka potrebno da bi se spriječilo samozapaljenje ugrijene prašine. Nasuprot tome, temperatura sekundarnog zraka teorijski nema gornje granice, nego ovisi o kvaliteti materijala zagrijivača zraka i o ekonomskim faktorima. U tabl. 9 navedene su temperature zagrijavanja zraka za izgaranje prema vrsti goriva.

Tablica 9  
TEMPERATURNE GRANICE ZAGRIJAVANJA ZRAKA ZA IZGARANJE

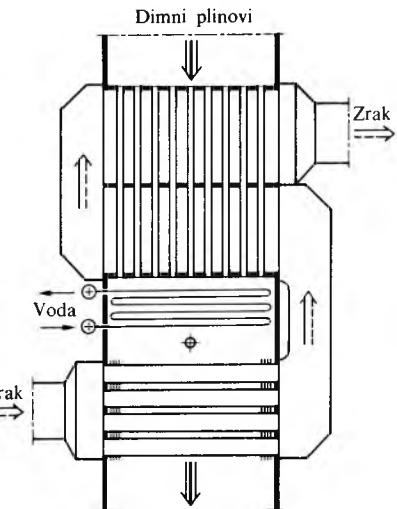
Vrsta goriva	Temperatura °C
Ugljen s udjelom vlage ispod 8%	250...300
Ugljen s udjelom vlage iznad 8%	380...420
Tekuće odvođenje pepela za sve vrste ugljena	380...420
Loživo ulje i zemni plin	200...300
Plin iz visokih peći	250...350

Zagrijivač zraka ugrađen je kao ogrjevna površina u izlaznom dijelu kanala za dimne plinove. Konstrukcijski se razlikuju cijevni i pločasti zagrijivači zraka. Ogrjevna površina cijevnog zagrijivača sastavljena je od čeličnih glatkih ili lijevanih cijevi, a pločastog zagrijivača od čeličnih limova. Danas se sve manje grade pločasti zagrijivači zraka jer su tehnološki složeniji od cijevnih zagrijivača.

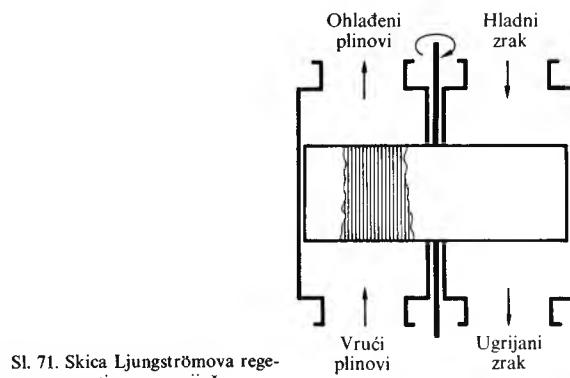
Lijevane cijevi zagrijivača zraka imaju uzdužna rebra s unutrašnje strane i poprečna rebra s vanjske strane radi veće ogrjevne površine. Lijevane su cijevi smještene uvijek vodoravno i kroz njih struji zrak za zagrijavanje, a plinovi izgaranja struje oko cijevi. Smjer strujanja plinova izgaranja i zraka najčešće je protusmjerno-unakrstan, a rjeđe istosmjerno-unakrstan.

Valjane ili vučene cijevi zagrijivača zraka imaju glatke stijenke i ugrađuju se vodoravno ili uspravno. U zagrijivaču s vodoravno položenim cijevima zrak struji kroz cijevi, a dimni plinovi oko cijevi. U zagrijivaču s uspravnim cijevima dimni plinovi struje kroz cijevi, a oko cijevi struji zrak. Osnovno je pravilo da dimni plinovi treba da struje vertikalno da bi se pepeo i čada mogli skupljati na najnižim dijelovima dimnih kanala, odnosno da bi se ogrjevne površine na strani dimnih plinova mogle čistiti od naslage pepela.

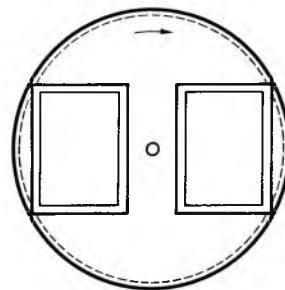
Zagrijivači zraka grade se i u dva stupnja (sl. 70). Prvi stupanj zagrijivača je sastavljen od vodoravno položenih lijevanih cijevi i smješten je bliže izlazu iz parnog kotla. Upotrebljavaju se lijevane cijevi jer su otpornije na koroziju, koja može nastati zbog niskih temperatura zraka i izlaznih dimnih plinova. Drugi stupanj zagrijivača ima glatke, uspravno položene cijevi.



Sl. 70. Shema zagrijivača zraka sa dva stupnja



Sl. 71. Skica Ljungströmova regenerativnog zagrijivača



Osim rekuperativnih zagrijivača zraka, ponekad se upotrebljava i regenerativni Ljungströmов zagrijivač (sl. 71). U tom zagrijivaču kao ogrjevna površina služi rotor kojemu su profilirani dijelovi naizmjenice izloženi strujama vrućih dimnih plinova i strujama hladnog zraka. Prednost je Ljungströmova zagrijivača da zbog relativno visokih brzina strujanja i zbog toga bržeg prijelaza topline ima male dimenzije.

#### DOVOD ZRAKA ZA IZGARANJE I ODVOD PLINOVA IZGARANJA

Zbog upotrebe goriva lošije kakvoće, gradnje parnih kotlova sve većeg učina, povećanja specifičnih toplinskih opterećenja, te zbog velike brzine strujanja plinova izgaranja, postalo je prijeko potrebno da se zrak za izgaranje dovodi, a plinovi izgaranja odvode pomoću ventilatora, tj. umjetnim propuhom.

**Ventilatori za dovod svježeg zraka i odvod plinova izgaranja.** Da bi se odredio potreban učin ventilatora, mora se znati količina potrebnog zraka za izgaranje, odnosno količina plinova izgaranja koje treba odvoditi iz parnog kotla svedavajući otpor strujanja. Prema iskustvenim podacima tlak ventilatora koji dobavlja zrak za izgaranje iznosi u kotlovima s rešetkom

500...5000 Pa, a u kotlu koji se loži ugljenom prašinom, plinom ili ložnim uljem 2000...6000 Pa. Tlak ventilatora potreban za odvođenje plinova izgaranja iznosi 200...4000 Pa, već prema izvedbi postrojenja, odnosno da li je ugrađen čistač dimnih plinova. Gubitak tlaka zbog otpora strujanja kroz čistač iznosi 500...2000 Pa.

Zbog promjena opterećenja, koje su neizbjegljive u termoenergetskim postrojenjima, potrebno je da se rad ventilatora (tlak i dobava) uskladije s trenutnim opterećenjem. To se postiže prigušenjem pomoću zaklopki na usisnoj strani ventilatora, regulacijom brzine vrtnje ventilatora pomoću hidrauličke spojke, regulacijom brzine vrtnje pomoću elektromotora s kliznim prstenvima, regulacijom brzine vrtnje pomoću kolektorskog motora, ugradnjom zakretnih statorskih lopatica ventilatora, upotreboom elektromotora s promjenljivom brzinom vrtnje (gruba regulacija) kombinirano s prigušivanjem, te regulacijom brzine vrtnje upotreboom parne turbine kao pogonskog stroja.

Za dovod svježeg zraka potrebnog za izgaranje služe ventilatori svježeg zraka i vodovi ili kanali zraka i goriva. Ti dijelovi parnog kotla razlikuju se prema tipu kotla i vrsti upotrijebljenog goriva.

Parni kotlovi s izgaranjem goriva u sloju na rešetki imaju ventilator svježeg zraka, vodove (kanale) zraka sa zaklopkama do zonske raspodjele na rešetki, raspore rešetke i sloj goriva. Zagrijać zraka sastavni je dio te opreme.

Parni kotlovi s izgaranjem čvrstog goriva (ugljene prašine) u prostoru imaju ventilator svježeg zraka, zagrijać zraka, vodove zraka od ventilatora do zagrijaća zraka i do mlinova za ugljenu prašinu, mlinove, vodove s različitim ugradnjama od mlinova do gorionika, i gorionike. Sve te iste dijelove, osim mlinova za ugljenu prašinu, imaju i parni kotlovi loženi tekućim ili plinovitim gorivom.

Parni kotlovi s tekućim ili plinovitim gorivom često imaju ložišta pod pretlakom, tj. tlak u ložištu veći je od tlaka okolišnog zraka. Tada ventilator svježeg zraka mora svladati sve otpore strujanja u dovodnom kanalu zraka, mora osigurati potreban pretlak (100...2000 Pa) u ložištu i svladati otpore strujanja dimnih plinova do izlaza iz dimnjaka.

Jednadžba za proračun potrebne snage ventilatora glasi

$$N_v = \frac{V \left( 1 + \frac{t}{273} \right) \Delta p}{10^3 \eta_v}, \quad (53)$$

gdje je  $V$  volumen zraka ili plinova izgaranja u  $\text{m}^3/\text{s}$ ,  $t$  temperatura zraka ili dimnih plinova u  $^\circ\text{C}$ ,  $\Delta p$  razlika tlaka koju treba ostvariti ventilatorom u Pa, a  $\eta_v$  stupanj korisnosti ventilatora koji prema iskustvu iznosi 0,6...0,8.

**Ovod plinova izgaranja.** Iz malih se parnih kotlova mogu plinovi izgaranja odvoditi prirodnim propuhom. Prirodni propuh nastaje u dimnjaku kao razlika tlaka stupca okolišnog zraka i tlaka stupca plinova izgaranja srednje temperature  $t_{\text{pl}(s)}$

$$h_s = 273 g H \left( \frac{\rho_u}{273 + t_u} - \frac{\rho_{\text{pl}}}{273 + t_{\text{pl}(s)}} \right) \frac{b}{760}, \quad (54)$$

gdje je  $h_s$  prirodni propuh (statički uzgon) u Pa,  $H$  visina dimnjaka (m),  $\rho_u$  gustoća okolišnog zraka i  $\rho_{\text{pl}}$  gustoća plinova izgaranja ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $t_u$  temperatura okolišnog zraka,  $t_{\text{pl}(s)}$  srednja temperatura plinova izgaranja u dimnjaku ( $^\circ\text{C}$ ), te  $b$  stvarni tlak (Pa).

Korisni ili efektivni propuh  $h_e$  u dimnjaku jednak je prirodnom propuhu  $h_s$  umanjenom za otpor strujanja u dimnjaku  $\Delta p_{\text{tr}}$  i za kinetičku energiju dimnih plinova  $\Delta p_i$  na izlazu iz dimnjaka

$$h_e = h_s - \sum \Delta p = h_s - (\Delta p_{\text{tr}} - \Delta p_i). \quad (55)$$

Otpor strujanja u dimnjaku iznosi

$$\Delta p_{\text{tr}} = C H v^2 \rho_{\text{pb}} \quad (56)$$

gdje je  $C$  koeficijent otpora strujanja ovisan o promjeru i izvedbi dimnjaka, a  $v$  brzina strujanja plinova izgaranja kroz dimnjak, koja za prirodnji propuh iznosi 5...9  $\text{m}/\text{s}$ .

Kinetička energija dimnih plinova na izlazu iz dimnjaka određena je izrazom

$$p_i = \frac{1}{2} v_i^2 \rho_{\text{pl}}, \quad (57)$$

gdje je  $v_i$  izlazna brzina dimnih plinova.

Iz većih kotlovnih postrojenja plinovi izgaranja odvode se umjetnim propuhom što ga proizvode ventilatori. Takva postrojenja imaju visoke dimnjake da se osigura rasprostiranje plinova izgaranja s česticama pepela na što veći okolišni prostor radi zaštite okoliša.

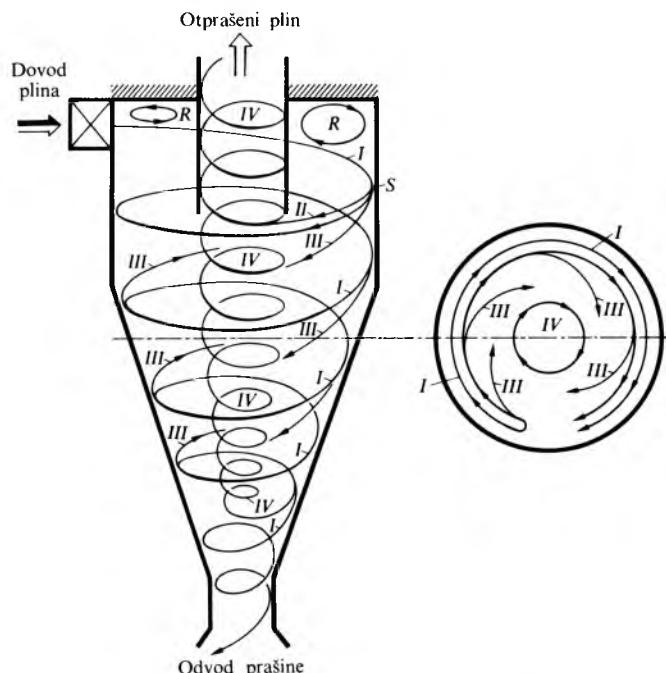
**Otprašivanje plinova izgaranja.** Plinovi izgaranja nose sa sobom prašinu koja se sastoji od letećeg pepela (neizgorjele mineralne čestice, silikati, spojevi željeza, kalcija, magnezija), od leteće troške (rastaljeni silikati) i od sitnih čestica koksa i čadi (amorfni ugljik sa smolastim sastojcima). Količina i sastav leteće prašine ovise o vrsti goriva i o načinu loženja.

Plinovi izgaranja iz velikih termoenergetskih postrojenja sadrže velike količine leteće prašine. Radi zaštite okoliša, prije nego što se plinovi izgaranja izbacuju u atmosferu, mora se iz njih odstraniti prašina. Npr. termoelektrana snage od 100 MW, koja ima parni kotao ložen ugljenom sa sadržajem pepela od 30%, u 24 sata proizvede gotovo 380 t pepela. Ako se kotao loži ugljenom prašinom uz suho odvođenje pepela, a bez otprašivanja plinova izgaranja, u okoliš bi termoelektrana izbacivala ~300 t prašine na dan. Za loženje s vrtloženjem i odvođenje pepela u tekućem stanju ta količina bi iznosila ~150 t/dan, a za ciklonsko ložište ~75 t/dan.

Zrnca leteće prašine različitih su dimenzija. Najkrupnija su zrnca gorive čestice letećeg koksa, ali i ona su tako malena da im se veličina ne može odrediti pomoću sita. Zato se sastav leteće prašine s obzirom na dimenzije čestica određuje prema brzini padanja, jer s promjerom čestice raste i brzina padanja. Sastav leteće prašine prikazuje se kao postotni udio pojedinih dimenzija čestica u mikrometrima i o tom sastavu ovise tip uređaja za otprašivanje.

Otprašivanje plinova izgaranja može biti mehaničko pomoću ciklonskih otprašivača ili električno pomoću elektrofiltrira.

**Mehanički otprašivači** djeluju na principu sile gravitacije ili na principu centrifugalne sile. U gravitacijskom se otprašivaču smanji brzina strujanja plinova izgaranja na 1...2  $\text{m}/\text{s}$ , pa čestice zbog svoje težine padaju na dno. Takav se otprašivač upotrebljava samo za prašinu većih dimenzija, dakle za kotlove s loženjem na rešetki. Centrifugalni otprašivač ima oblik cilindra koji na donjem dijelu prelazi u suženi lijevak. Plinovi izgaranja dovode se tangencijalno u cilindrični dio, pa djelovanjem cent-



Sl. 72. Idealizirani prikaz strujanja u ciklonskom otprašivaču. I, II, III i IV smjerovi strujanja, R prstenasto strujanje

fugalne sile čestice udaraju o stijenku i padaju u lijevak, a pročišćeni plinovi izlaze na vrhu otprašivača (sl. 72). Otprašivanje je to bolje što je brzina plinova veća, pa je zato relativno velik utrošak energije za pogon ventilatora ( $\sim 0,2 \text{ kWh}$  po  $1000 \text{ m}^3$  plinova).

**Električni otpaćivač** zapravo je kondenzator velikih dimenzija u kojemu među elektrodama vlađa razlika napona od 30...70 kV. U tako stvorenom električnom polju čestice prašine postanu negativno ili pozitivno nabijene i putuju prema elektrodama gdje se skupljaju i otpadaju na dno otpaćivača. Budući da se prašina i lijevi za elektrode, pogotovo ona najsitnija, posebni uređaj udara u pravilnim vremenskim razmacima po elektrodama i stresa sa njih prašinu. Električni otpaćivač ima bolji stupanj djelovanja i manji potrošak energije od centrifugalnog, pa se danas upotrebljava za kotlove ložene ugljenom prašinom, unatoč tome što zahtijeva veće investicije.

### VODA ZA PARNE KOTLOVE

Sirova prirodna voda nikad se ne upotrebljava izravno u parnim kotlovima jer sadrži mehaničke nečistoće, otopljene soli i plinove. Napojna voda, koja se dovodi u kotao, i kotlovska voda, koja se nalazi u kotlu, moraju imati takva svojstva da bude sigurna i ekonomična proizvodnja tehnički čiste vodene pare, da se na ogrjevnim površinama u dodiru s vodom ili parom ne taloži kotlovska kamenac i da se ne pojavljuje korozija u sustavu voda–para.

**Svojstva napojne vode.** Propisana svojstva napojne vode i vode u kotlu ovise o vrsti kotla i o parametrima pare. Prema preporuci Udruženja vlasnika velikih kotlova u SR Njemačkoj napojna voda za vodocijevne kotlove treba imati karakteristike prikazane u tabl. 10.

Opći je zahtjev da napojna voda mora biti bistra i bezbojna, dakle bez lebdećih tvari i muteži, a to se lako kontrolira.

Korozija željeznih stijenki sprečava se održavanjem koncentracije kisika ispod dopuštene granice. Dosad nije zapažena korozija pri koncentraciji od  $0,02 \text{ mg O}_2$  po litri vode, a tu je granicu tehnički relativno lako ostvariti. Međutim, u toku obustave pogona povećava se opasnost od korozije, pa se nastoji održati koncentracija kisika dosta ispod dopuštene granice.

O tvrdoći vode ovisi stvaranje kotlovnog kamenca koji se taloži na unutrašnje stijenke cijevi u kotlu. Kotlovac nastaje zagrijavanjem vode s otopljenim solima različitih minerala, u prvom redu vode s ionima kalcija  $\text{Ca}^{2+}$  i hidrogenkarbonata  $\text{HCO}_3^-$ . Pri tom treba razlikovati mulj od kotlovnog kamenca. Mulj se sastoji također od netopljivih spojeva, ali se oni ne talože na stijenkama, već ostaju raspršeni u vodi.

Razlikuju se karbonatna i nekarbonatna tvrdoća vode. Karbonatnu tvrdoću čine u voditoplji kalcij-hidrogenkarbonat  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  i magnezij-hidrogenkarbonat  $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ . Nekarbonatnu tvrdoću uzrokuju kalcij-sulfat  $\text{CaSO}_4$ , magnezij-sulfat  $\text{MgSO}_4$ , kalcij-klorid  $\text{CaCl}_2$ , magnezij-klorid  $\text{MgCl}_2$ , kalcij-nitrat  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ , magnezij-nitrat  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$  i kalcij-silikati.

Već samo nekoliko dosetaka miligrama soli po litri napojne vode uzrokuje velike teškoće u pogonu parnog kotla, jer se s vremenom u kotlu nataloži kotlovska kamenac. Taloženje kamenca, koji je vrlo dobar topinski izolator, smanjuje prijelaz topline i povisuje temperaturu ogrjevnih površina, pa zbog toga popušta materijal i pucaju cijevi. U kotlovima malog učina, kao što su stariji tipovi plamenocijevnih i sekcijskih kotlova, mogla se upotrebljavati i nešto tvrda voda, jer se istaloženi kamenac mogao ukloniti mehanički specijalnim alatom za vrijeme obustave pogona. Takva mogućnost ne postoji za moderne kotlove velikog učina.

Koncentraciju željeza i bakra u napojnoj vodi treba održati ispod dopuštene granice da bi se osigurala čistoća pare. Nešto veća koncentracija karbonatne kiseline  $\text{H}_2\text{CO}_3$ , odnosno u vodi otopljenog ugljik-dioksida može pobuditi koroziju željeza. Zbog toga se koncentracija ugljik-dioksida u napojnoj vodi mora održavati na razini dopuštenih iznosa.

Napojna voda mora biti kemijski neutralna ili slabo bazična da se spriječi korozija koja bi nastala kad bi voda bila imalo kisela. Mjerilo kiselosti ili bazičnosti vode jest vrijednost  $p\text{H}$ , koja za kotlovsku napojnu vodu ne smije biti veća od 9,5. Zbog čistoće pare važno je da koncentracija silikatne kiseline bude u dopuštenim granicama, jer se silicij-dioksid taloži na lopaticama turbine.

Električna vodljivost je također jedan od pokazatelja čistoće napojne vode. Električna provodnost ovisi o koncentraciji iona, pa za kemijski čistu vodu ona iznosi  $0,05 \text{ S/cm}$ .

Tablica 10  
PREPORUČENE KARAKTERISTIKE NAPOJNE VODE ZA VODOCIJEVNE KOTLOVE

		Protočni kotlovi i voda za hlađenje pregrijane pare	Kotlovi s prirodnim i prisilnim strujanjem					
			20 bar*	40 bar*	64 bar*	80 bar i više		
Opći zahtjevi			bistra i bezbojna voda					
Koncentracija kisika	$\text{O}_2 \text{ mg/L}$	maks. 0,03 (za vrijeme stavljanja u pogon i obustavljanja); u trajnom pogonu $< 0,02$						
Tvrdoća	ekvival. jedinici mol/L	neodredivo**	$< 0,02$	$< 0,01$	$< 0,01$	neodredivo**		
Željezo	$\text{Fe mg/L}$	$< 0,02$	po mogućnosti $< 0,05$			$< 0,03$		
Bakar	$\text{Cu mg/L}$	$< 0,005$		$< 0,01$		$< 0,005$		
Karbonatna kiselina	$\text{CO}_2 \text{ mg/L}$	$< 1$	po mogućnosti $< 20$			$< 1$		
Vrijednosti $p\text{H}$ pri $20^\circ\text{C}$		7 do 9,5 samo hlapljiva sredstva za postizanje bazičnosti		7 do 9,5		7 do 9,5 po mogućnosti samo hlapljiva sredstva za postizanje bazičnosti		
Silikatna kiselina	$\text{SiO}_2 \text{ mg/L}$	u trajnom pogonu $< 0,02$				ako se pogon vodi bez odmulinjanja, u trajnom pogonu maks. 0,02; inače se drži samo preporuka za kotlovsku vodu		
Električna provodnost (mjereno nakon jakog kiselog izmjenjivača i otklanjanja $\text{CO}_2$ )	$\text{S/cm}$	u trajnom pogonu $< 0,02$				ako se pogon vodi bez odmulinjanja, u trajnom pogonu maks. 0,3; inače se drži samo preporuka za kotlovsku vodu		
Permanganatski broj	$\text{KMnO}_4 \text{ mg/L}$	po mogućnosti $< 5$	po mogućnosti $< 10$		po mogućnosti $< 5$			
Udio ulja	$\text{mg/L}$	$< 0,3$	po mogućnosti $< 1$	$< 0,5$		$< 0,5$		

\* Ako je lokalni prijelaz topline  $8,37 \cdot 10^2 \text{ MJ/m}^2\text{h}$ , vrijede preporučene vrijednosti za 80 bar i više

\*\* Tvrdoća mora biti tako malena da se ne može odrediti modernim metodama analize

Permanganatski broj je mjera za udio organskih tvari u napojnoj vodi. Taj se udio određuje pomoću kalij-permanganata,  $\text{KMnO}_4$ , pa količina permanganata potrebna za oksidaciju organskih spojeva pokazuje količinu organskih tvari u napojnoj vodi. Zbog većeg udjela organskih tvari voda se u kotlu pjeni i tada para za sobom nosi čestice pjene i vode u pregrijač i turbinu.

Udio ulja u napojnoj vodi mora biti u dopuštenim granicama, jer ulje u kotlu može na stijenkama stvarati tanke slojeve na koje se lijepe izlučene soli. Osim toga, ima vrsta ulja koje se raspadaju u kotlu i s parom odlaze u turbinu gdje se talože.

#### Priprema vode za parne kotlove

Priprema vode za napajanje parnog kotla sastoji se od niza tehnoloških postupaka kojim se sirova voda obrađuje tako da dobije svojstva propisana uvjetima za kvalitetu napojne vode. Da bi se mogli odrediti tehnološki postupci obradbe sirove vode, moraju se znati njena svojstva i karakteristike. Zbog toga treba prirodnu sirovu vodu vrlo detaljno kemijski analizirati i kvalitativno i kvantitativno odrediti udio grubih mehaničkih nečistoća (plivajući i lebdeći sastojci, te sastojci koji se talože), udio koloidnih nečistoća (mineralne i organske tvari) i udio otopljenih nečistoća (soli, kiseline i plinovi).

**Odstranjivanje mehaničkih nečistoća.** Sirova se voda najprije vodi kroz rešetku gdje se zadrže krupne mehaničke nečistoće (grančice, lišće i sl.), a nakon toga, ako je potrebno, voda prolazi vrlo malom brzinom kroz bazen za taloženje gdje se istaloži pijesak i ostali grublji materijal. Mehaničke taložnice veoma rasterećuju filtarske uređaje koji uklanjuju preostale sitne mehaničke nečistoće. U filtru voda protječe kroz sloj kremenog pijeska brzinom 8–12 m/h. Brzina protjecanja vode to je veća što je deblji sloj pijeska. Mehaničkim filtriranjem mogu se odstraniti nečistoće veće od  $10^{-4}$  mm.

**Odstranjivanje koloidnih nečistoća.** Koloidne nečistoće imaju dimenzije između  $10^{-4}$  i  $10^{-6}$  mm. Zbog koloidnih nečistoća u kotlu nastaje pjenjenje, pa se onečisti para, a u uređajima za omekšavanje vode takve nečistoće mogu uzrokovati promjene koje smanjuju kvalitetu vode.

Jedan od postupaka za odstranjivanje koloidnih nečistoća jest kemijsko koaguliranje. Ako se vodi doda aluminij-sulfat, željezo-klorid ili natrij-aluminat, stvaraju se pahuljice (koaguliranje) koje se talože kao hidroksidi aluminija, natrija ili željeza. Djelovanje koaguliranja ovisi o vrijednosti  $pH$  i temperaturi vode, a reakcija traje 40–60 min. Postupak se provodi u posebnim uredajima za taloženje, a zatim se voda filtrira u filtrima s kremenim pijeskom.

Ako kemijsko koaguliranje ne daje zadovoljavajuće rezultate, upotrebljava se filter s aktivnim ugljenom, ali taj je postupak mnogo skuplj.

U posljednje vrijeme u upotrebi su anionski izmjjenjivači koji mogu odstraniti 70–95% koloidnih nečistoća, već prema njihovu sastavu.

**Odstranjivanje željeza i mangana.** Voda iz dubokih podzemnih bunara sadrži veće količine željezneh spojeva (najčešće željezo-hidrogenkarbonata) koji mogu onemogućiti djelovanje izmjjenjivača kad se oni upotrebljavaju za pripremu napojne vode. Ako se voda priprema taložnim postupcima, spojevi se željeza izravno odstrane.

Pri snažnom miješanju zraka i vode željezo-hidrogenkarbonat prelazi u željezo-hidroksid koji se može odvojiti filtriranjem. Za željezo u organskim spojevima potrebna su jača oksidacijska sredstva (klor ili kalcij-permanganat). Mangan se odstranjuje na sličan način kao željezo.

**Postupci taloženja.** Taloženjem se sirova voda dekarbonizira i omekšava. Dekarbonizacijom se smanjuje udio slobodne i vezane ugljične kiseline na minimum, a omekšavanjem se smanjuje tvrdoća vode. U postupku taloženja topljivi se spojevi pretvaraju u netopljive, koji se zatim odstrane filtriranjem.

Kemijski proces mešanja vode jest postupak djelomičnog taloženja otopljenog kalcij-hidrogenkarbonata,  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ , pomoću dodatka vapnenog mljeka  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Ako voda sadrži nekarbonatnu tvrdoću, uz vapno se dodaje i soda,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , a ako je karbonatna tvrdoća jednaka nekarbonatnoj, primje-

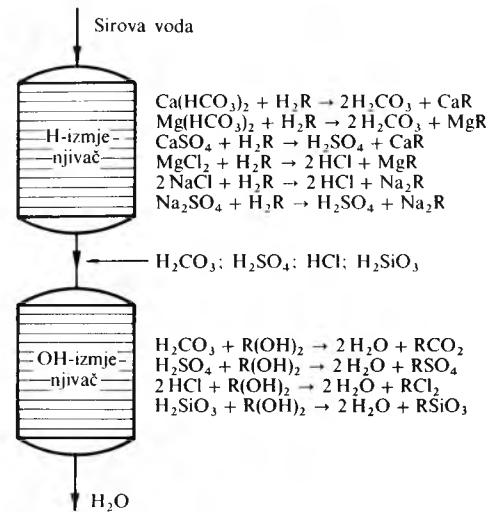
njuje se postupak taloženja pomoću natrijeve lužine,  $\text{NaOH}$ . Međutim, nijedan od tih postupaka ne osigurava tvrdoću propisanu za kotlovsu vodu, nego služi samo kao priprema za potpuno omekšavanje, odnosno potpunu demineralizaciju napojne vode u ionskim izmjjenjivačima.

Vrlo mala tvrdoća vode može se postići taloženjem dodatkom fosfata, najčešće natrij-fosfata,  $\text{Na}_3\text{PO}_4$ , ali zbog visoke cijene taj se postupak primjenjuje samo kao završni postupak nakon upotrebe vapna i sode ili natrijeve lužine. Natrij-fosfat može se i neposredno dodavati u kotlove niskog radnog tlaka, pa će se tako praktički svi spojevi koji bi se mogli istaložiti kao kamenac pojaviti u obliku mulja.

Postupci taloženja, uključujući i postupak s fosfatima, mogu se primijeniti samo za kotlove malog i srednjeg učina. Naime, tim se postupcima uz višak kemikalija povećava koncentracija soli u vodi koja se dovodi u kotao, a to zahtijeva da se kotao mora češće odmuljivati, što je povezano s gubitkom energije i povećanom potrebnom količinom napojne vode.

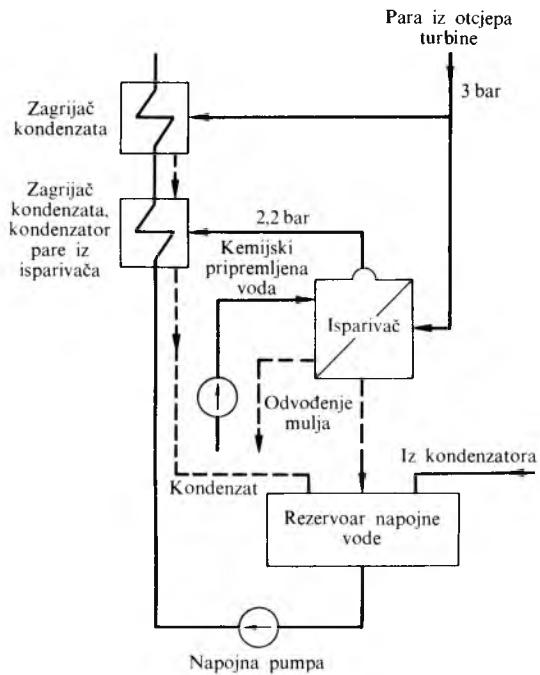
**Omekšavanje i demineralizacija vode ionskim izmjjenjivačima.** Ionski izmjjenjivači su u vodi netopljive tvari koje mogu svoje labilno vezane ione zamijeniti ionima iz vode. Anorganske soli raspadaju se u vodi u električno nabijene čestice, ione, i to u jednakim broj pozitivno nabijenih kationa i negativno nabijenih aniona. Omekšavanje (ili neutralna izmjena) jest zamjena natrij-iona iz izmjjenjivača ionima kalcija i magnezija iz dekarbonizirane ili sirove vode.

Primjene li se serijski ionski izmjjenjivači, koji zamjenjuju svoj kiseli vodik-ion kationima (kationski filter) iz sirove ili prethodno dekarbonizirane vode, te izmjjenjivači koji zamjenjuju svoj bazični hidroksid-ion anionima (anionski filter) iz kisele vode iz kationskih filtera, tada se iz tih serijski spojenih ionskih filtera dobiva voda bez kationa i aniona od otopljenih soli, a naziva se demineraliziranim vodom. Tako se pomoću serijskih ionskih izmjjenjivača može, npr., potpuno odsoliti voda, što se danas primjenjuje za kotlove većeg učina. Ako se spoje kationski i anionski filter u seriju, iz prvog u vodi ostaju kiseline koje u drugome prelaze u kemijski čistu vodu (sl. 73) (v. Izmjena iona, TE 6, str. 576).



Sl. 73. Shema serijskog ionskog izmjjenjivača za potpuno odsoljavanje

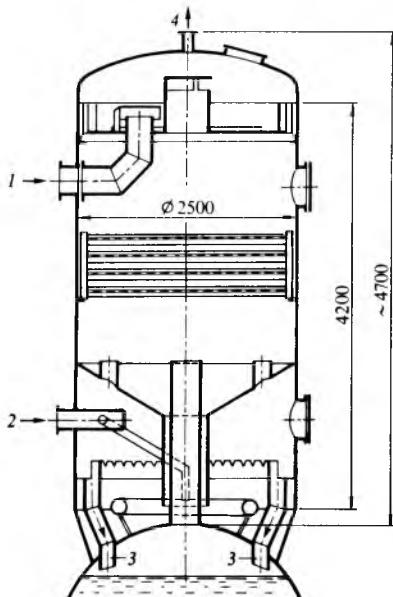
**Odsoljavanje vode pomoću isparivača.** Za potpuno odsoljavanje vode može se upotrijebiti i isparivač (sl. 74). Voda, omekšana jednim od postupaka taloženja, dovodi se u isparivač i zagrijava parom koja je djelomično ekspandirala u parnoj turbini. U isparivaču voda ispari, a zatim se kondenzira u jednom od zagrijivača turbinskog kondenzata, te služi kao napojna voda. Tako se postupak zove termička priprema napojne vode. Termička priprema napojne vode uz prethodnu pripremu taloženjem upotrebljava se iz ekonomskih razloga za sirovu vodu s velikom koncentracijom soli i kad su to pretežno nekarbonatne soli.



Sl. 74. Termička shema isparivača postavljenog u krug vode i pare

**Otplinjavanje napojne vode.** Osim soli, napojna voda nosi sa sobom i otopljene plinove (kisik, ugljik-dioksid) koji mogu u kotlu uzrokovati koroziju. Uz konstantan tlak topljivost plinova u vodi opada s površnjem temperature, pa pri vreljštu postiže vrijednost nula. Dakle, da bi se plinovi izlučili iz vode, treba vodu zagrijati do vreljšta i plinove odvesti na pogodan način. Otplinjivanje se može provesti pri tlaku većem od 1 bar, ali i pri nižim tlakovima. U praksi se daje prednost otplinjivanju pri pretlaku jer tada nema opasnosti da zrak prođe u otplinjivač.

Sva voda što se dovodi u kotao treba se otplinjivati, dakle osim dodatne napojne vode i voda koja se dovodi iz kondenzatora. Kondenzat iz kondenzatora sadrži mali udio plinova ( $20 \mu\text{g/L}$ ), a potpuno odsoljena dodatna napojna voda praktički je zasićena plinovima (pri 1 bar i  $20^\circ\text{C}$ :  $\sim 8500 \mu\text{g/L}$ ). Takva je dodatna voda veoma agresivna, pa se u posebnom otplinjivaču otplinjuje do udjela od  $\sim 50 \mu\text{g/L}$ . Otplinjivač mora biti izrađen od materijala otpornog prema koroziji.



Sl. 75. Otplinjivač s raspršivanjem vode i dodatnim zagrijavanjem. 1 dovod vode, 2 dovod pare, 3 odvod vode, 4 odvod supare

Najčešće se upotrebljava otplinjivač s raspšrkavanjem vode (sl. 75). Voda se dovodi u gornji dio otplinjivača u tavi za raspšrkavanje i otuda otječe po cijelom presjeku otplinjivača. Tako raspšršena voda zagrijava se parom koja struji u suprotnom smjeru. Za vrijeme zagrijavanja iz vode se odjeljuju plinovi, koji zajedno s malom količinom pare (otparkom) izlaze kroz otvor na vrhu, a voda očišćena od plinova pada na dno otplinjivača, najčešće smještenog na spremniku napojne vode.

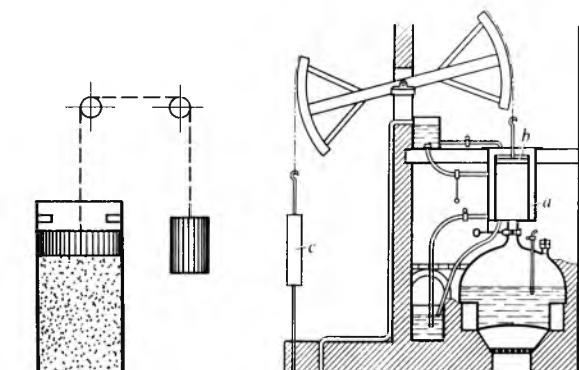
LIT.: A. Zinzen, Dampfkessel und Feuerungen, Springer-Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg 1957. — V. Đurić, Parni kotlovi I—III, Građevinska knjiga, Beograd 1959—60. — K. Schröder, Grosses Dampfkraftwerke, Bd. 1—4, Springer-Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg-New York 1959—1968. — C. D. Shields, Boilers, McGraw-Hill, New York 1961. — R. Doležal, Grosskesselfeuерungen, Theorie, Bau und Auslegung, Springer-Verlag, Berlin 1961. — R. Freier, Kesselspeiswasser und Kühlwasser, Technologie und Betriebsanalyse, W. de Gruyter, Berlin 1963. — M. Ledenigg, Dampferzeugung, Dampfkessel, Feuerungen, Springer-Verlag, Wien 1966. — F. Nuber, Wärmetechnische Berechnung der Feuerungs- und Dampfkesselanlagen, Oldenbourg-Verlag, München 1966. — A. Levai, Maschinentechnische Einrichtungen der Wärmekraftwerke, Bd. 1: Dampferzeugung, VEB Deutsche Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1966. — R. Günther, Verbrennung und Feuerungen, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York 1974. — N. H. Afgan, J. M. Beer, Heat Transfer in Flames, John Wiley & Sons, New York-Toronto-London-Sidney 1974. — H. Požar, Osnove energetike, Školska knjiga, Zagreb 1976. — E. Woodruff, H. Lammers, Steam-Plant Operation, McGraw-Hill, New York 1976. — L. Kreuh, Generatori pare, Školska knjiga, Zagreb 1978.

L. Kreuh H. Požar

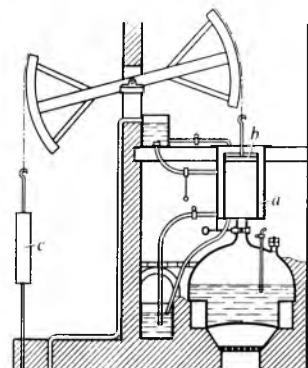
## PARNI STAPNI STROJ

toplinski stroj koji pretvara toplinsku energiju vodene pare u mehaničku energiju.

Svojstva i djelovanje vodene pare bili su poznati već u starom vijeku. Oko  $\sim 100$  god. Heronova kugla predstavlja preteču parnog stroja. Ta je kugla bila do polovice napunjena vodom i imala je sa strane dvije cjevčice savijene pod pravim kutom. Kad se zagrijala i voda pretvorila u paru, počela se okretati pod utjecajem mlaza pare koji izlazi iz cjevčica. Tek potkraj XVII stoljeća (1690. god.) izgradio je Francuz Denis Papin (1647—1712) prvi stroj donekle sličan parnom stupnju stroju. To je bio Papinov atmosferski stroj, koji se sastojao od cilindra i stapa (sl. 1), a cilindar je istovremeno bio i kotao, i stroj, i kondenzator. Zagrijana voda pretvarala se u paru koja je potiskivala stup do njegova gornjeg položaja. Tada se cilindar počeo hladiti, pa se para kondenzirala i pod stapom se stvarao vakuum, a tlak atmosferskog zraka potiskivao je stup prema dolje. Budući da je atmosferski tlak bio glavni faktor rada, to je taj stroj dobio naziv *atmosferski stroj*. Papin je namjerao svoj stroj upotrijebiti za pogon većih čamaca, ali mu to nije uspjelo.



Sl. 1. Shema Papinovog atmosferskog stroja



Sl. 2. Newcomenov atmosferski (parni) stroj (1711. god.)

Na daljem je razvitu parnih strojeva radio i Thomas Savery (1650—1715), a 1711. god. Thomas Newcomen (1663—1729) konstruirao je praktično upotrebljivi atmosferski parni stroj (sl. 2). Utek c, pričvršćen na motak sisaljke, preko balansira povukao je stup b gore. Cilindar a tada se odozdo napunio iz kotla parom atmosferskog tlaka, zatim se dovodi pare zatvorio i u cilindar pustio mlaz vode, pa se para u cilindru brzo i gotovo potpuno kondenzirala. Zbog vakuuma stvorenog u cilindru vanjski zrak potisnuo je stup prema dolje, a time preko balansira povukao motak sisaljke opet prema gore.

Osnova današnjeg parnog stupnja stroja dao je James Watt (1736—1819) tek 1788. god. Njegov parni stroj imao je sve karakteristike današnjeg parnog stroja i radio je s pretlakom pare. Para se automatski razvodila i obavljala rad uz ekspanziju s obje strane stupa u cilindru. Parni kotao i kondenzator bili su odvojeni od stroja koji je imao zamašnjak i regulator, ali stroj je imao balansir i umjesto koljenčastog pogonskog mehanizma Watt je primijenio jednu naročitu konstrukciju sa zupčanicima.