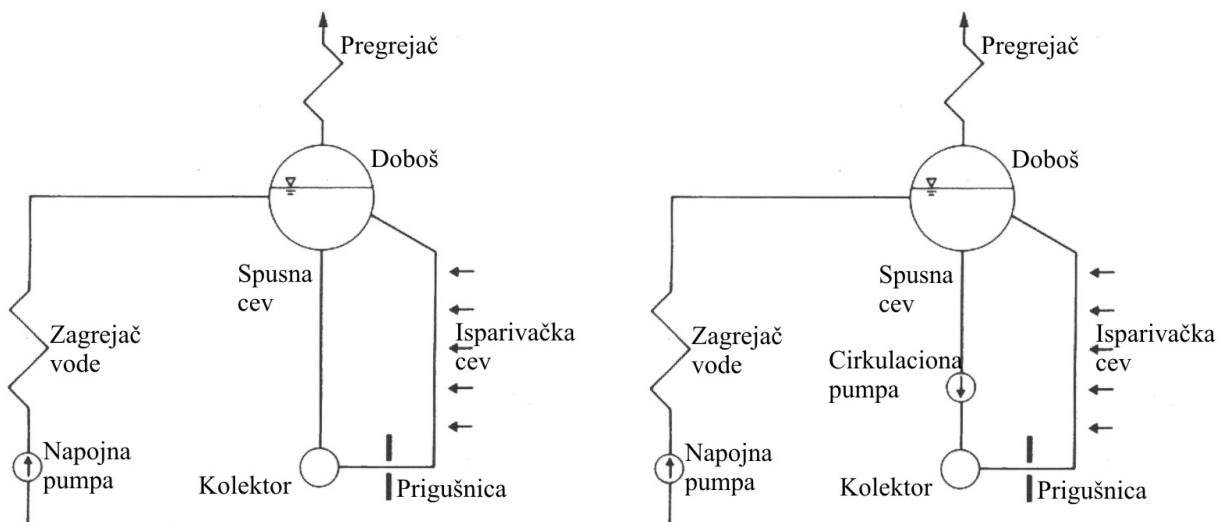


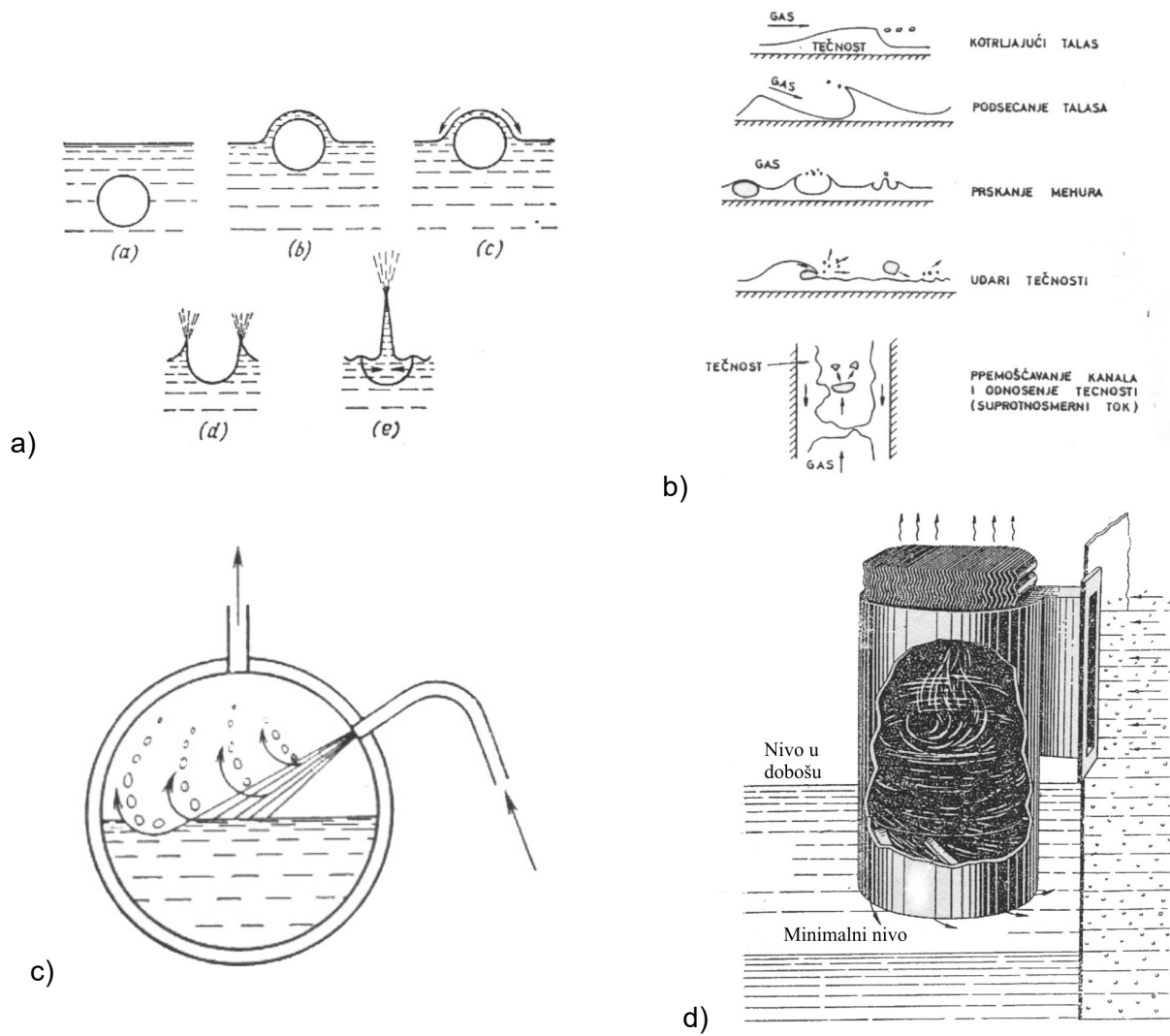
MEHANIZMI UKLJUČIVANJA I IZDVAJANJA KAPI IZ TOKA PARE

Kod kotlova sa prirodnom ili prinudnom cirkulacijom do izdvajanja pare iz ključajuće dvofazne mešavine dolazi u dobošu kotla (slika 1.1). Razdvajanje pare i vode u dobošu nije potpuno, tako da iz doboša ističe vlažna para. Sadržaj vlage u pari mora biti ograničen pošto je odnošenje vlage u pregrejač pare nepovoljno. Kapi sa sobom nose soli i druge primese koje se talože u pregrejaču, tako da se vremenom formira sloj koji predstavlja toplotni otpor prolazu toplote sa strane dimnih gasova na paru unutar cevi pregrejača. Dodatno isparavanje kapi i povećanje toplotnog otpora smanjuje temperaturu pare na izlazu iz pregrejača. Povećanje toplotnog otpora sa unutrašnje strane cevi pregrejača pogoršava hlađenje zida cevi pregrejača i dovodi do povećanje temperature metala, tako da vremenom može doći do termomehaničkih oštećenja i pucanja cevi. Stoga je neophodno obezbediti vlažnost pare na izlazu iz doboša koja nije veća od dozvoljenih graničnih vrednosti. Maseni udeo vlage u mešavini sa parom na izlazu iz doboša energetskog kotla ne bi trebao da bude veći od 0,0003 kg vode po kg mešavine (ili u procentima 0,03%). Međutim, u praksi je često vlažnost pare veća od dozvoljenih vrednosti.

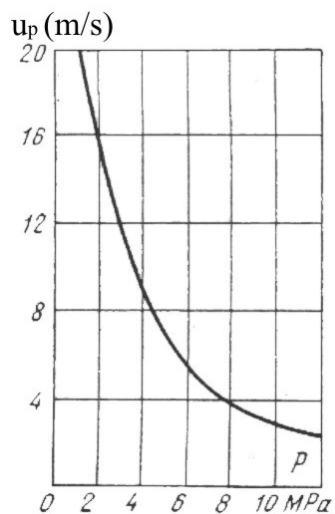
Para koja se izdvaja iz dvofazne mešavine u dobošu kotla sa sobom povlači kapi vode. Do uključivanja kapi u tok pare može doći pri različitim termohidrauličkim uslovima strujanja vode i pare u delovima i geometrijama unutrašnje strukture doboša u kojima dolazi do razdvajanja parne i tečne faze. Mehurovi pare koji isplivavaju na slobodnu površinu dvofazne mešavine u dobošu za sobom povlače kapi u trenutku kada se rasprskava tanak sloj vode iznad mehura koji napušta vodeni prostor, kao i pri podizanju mlaza vode koji nastaje kada voda popunjava udubljenje koje na površini ostaje nakon isplivavanja mehura (slika 1.2a). Do uključivanja kapi u tok pare može doći i kada para struji preko tečnog filma koji se sliva na zidu ciklonskog separatora ili separatora od talasastih limova (slika 1.2b). Brzine pare pri kojima dolazi do uključivanja kapi sa površine tečnog filma su prikazane na dijagramu na slici 1.3. Para nosi sa sobom kapi i kada se izdvaja iz mlaza dvofazne mešavine koji utiče u doboš iz isparivačke cevi kotla (slika 1.2c), kao i pri isticanju iz prostora ciklonskih separatora u kojima se formira vrtložno kretanje dvofazne mešavine sa visokim zapreminskim udelom pare (slika 1.2d).



Slika 1.1 Kotao sa prirodnom (levo) i prinudnom (desno) cirkulacijom i dobošem.



Slika 1.2 Različiti mehanizmi uključivanja kapi u struju pare.



Slika 1.3 Brzine pare pri kojima počinje uključivanje kapi sa površine tečnog filma.

Para sa uključenim kapima struji u parnom prostoru ka mestu isticanja koje se nalazi na vrhu doboša. Veće kapi se na tom putu vraćaju u prostor dvofazne mešavine usled dejstva gravitacije, dok sitnije kapi bivaju odnešene u izlazni parovod doboša. Da li će kap biti odnešena naviše strujom pare ili će pasti u dvofaznu mešavinu zavisi od odnosa težine kapi, sile potiska i sile otpora strujanju kapi u pari koja je opstrujava u vertikalnom pravcu. U graničnom slučaju kap lebdi u parnom prostoru (ne kreće se ni naviše ni naniže), a sile koje deluju na kap su u ravnoteži, koja se može napisati u obliku

$$\frac{\pi d_k^3}{6}(\rho' - \rho'')g = C_D \frac{\rho'' u_p^2}{2} \frac{\pi d_k^2}{4} \quad (1.1)$$

gde je d_k prečnik sferične kapi, ρ' je gustina kapi, ρ'' je gustina pare, u_p je vertikalna komponenta brzine pare, a C_D je koeficijent otpora pri opstrujavanju kapi. Leva strana jednačine predstavlja razliku sile težine i sile potiska, dok desna strana jednačine predstavlja silu kojom para deluje na kap. Koeficijent otpora se može odrediti pomoću polu-empirijskog izraza

$$C_D = \frac{24}{Re_k} \left(1 + 0.15 Re_k^{0.687}\right) + \frac{0.42}{1 + 4.25 \cdot 10^4 Re_k^{-1.16}} \quad (1.2)$$

gde se Reynolds-ov broj za kap određuje kao

$$Re_k = \frac{\rho'' d_k u_p}{\mu_p} \quad (1.3)$$

gde je μ_p dinamička viskoznost pare. Na osnovu ovde navedenog razmatranja može se zaključiti da će kap biti odnešena tokom pare naviše ukoliko je: (a) za zadati prečnik kapi d_k brzina pare veća od vrednosti brzine u_p koja zadovoljava jednakost (1.1), odnosno (b) ukoliko je za zadatu brzinu pare u_p prečnik kapi manji od vrednosti d_k koja zadovoljava jednačinu (1.1). Vrednost brzine pare pri kojoj će kap lebdeti u toku pare se naziva granična ili terminalna brzina i određuje se iz jed. (1.1) kao

$$u_p = \sqrt{\frac{4gd_k}{3C_D} \left(\frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right)} \quad (1.4)$$

Prečnik kapi koje su nošene tokom pare vertikalno naviše, zavisi kako od sile potiska i dinamičkog dejstva pare na kap, što je određeno jednačinama (1.1), odnosno (1.4), tako i od hidrodinamičke stabilnosti kapi u struji pare. Maksimalni prečnik kapi je određen kritičnim Weber-ovim brojem, koji predstavlja odnos dinamičke sile pritiska kojom struja kontinualne parne faze deluje na dispergovanu kap i sile površinskog napona

$$We_{kr} = \frac{\rho_p u_r^2 d_k}{\sigma} \quad (1.5)$$

Eksperimentalno je utvrđeno da je vrednost kritičnog Weber-ovog broja za strujanje kapi u gasnoj fazi $We_{kr} = 13$. U jed. (1.5) u_r predstavlja relativnu brzinu pare i kapi. Prema ovom kriterijumu ukoliko je vrednost Weber-ovog broja veća od kritične, doći će do deljenja kapi na kapi manjih dimenzija. U maglenom toku pare i kapi, nemaju sve kapi maksimalno moguću

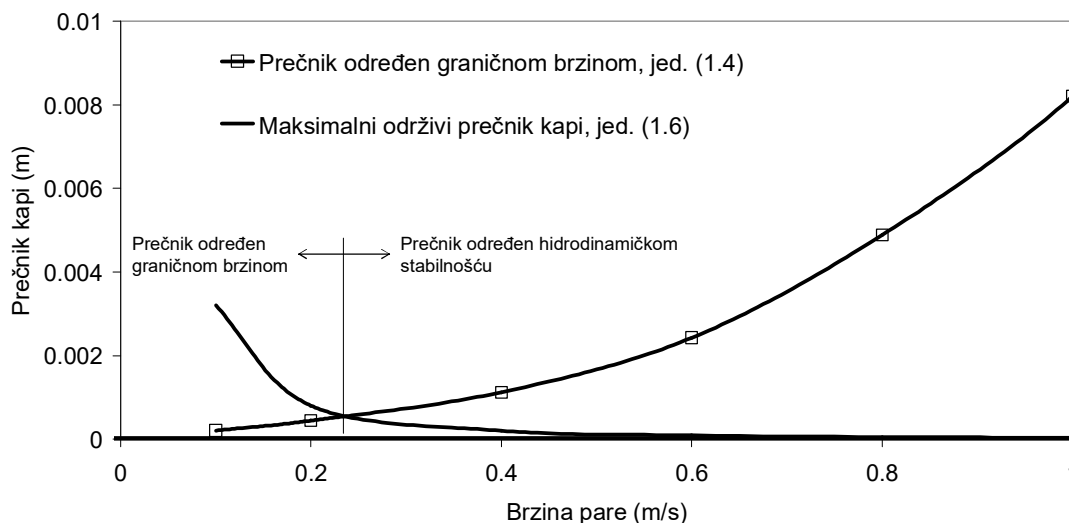
dimenziju, već postoji neki raspored dimenzija kapi od najvećih do najmanjih. Uzimajući u obzir ovu raspodelu, srednji prečnik kapi se može odrediti kao

$$d_k = \frac{\sigma We}{\rho_p u_r^2} \quad (1.6)$$

gde je $We = 0,799$.

Prečnici vodenih kapi određeni su u zavisnosti od granične brzine pare za pritisak od 16 MPa prema izrazima od (1.1) do (1.3) i prema kriterijumu o hidrodinamičkoj stabilnosti kapi (jed. 1.6), i prikazani su dijagramom na slici 1.4. Za određenu brzinu na dijagramu, kapi koje bi imale veći prečnik od vrednosti određene jednačinama (1.1) do (1.3) bi se vratile nadole u prostor dvofazne mešavine, dok bi kapi sa manjim prečnikom bile odnešene tokom pare naviše do izlaza iz doboša. Kapi koje bi pri određenoj brzini pare imale prečnik veći od vrednosti određene jed. (1.6) bi se razdvojile na manje kapi. Rezultati na slici 1.4 pokazuju da tok pare određene brzine (vertikalno naviše) u parnom prostoru doboša može sa sobom van doboša da ponese samo kapi čiji je prečnik manji od vrednosti određene donjom krivom na dijagramu. Prema slici 1.4, maksimalno mogući prečnik kapi koje su nošene tokom pare vertikalno naviše je za brzine pare manje od 0,235 m/s određen graničnom brzinom pare jednačinom (1.4), dok je za veće brzine pare prečnik kapi određen uslovom hidrodinamičke stabilnosti. S obzirom na brzine pare u dobošu od oko 1 m/s, prečnici kapi koje su nošene tokom pare su određeni hidrodinamičkom stabilnošću i iznose nekoliko desetina μm . Tok pare sa uključenim kapima ovako malih dimenzija je magleni tok.

Mehanizam izdvajanja vlage iz pare usled dejstva sile Zemljine teže se naziva gravitaciono izdvajanje ili gravitaciona separacija vlage. Da bi se u potpunosti iskoristili efekti gravitacione separacije potrebno je da visina parnog prostora od površine dvofazne mešavine do izlaznog preseka pare bude veća od približno 0,8 m. Pri manjim visinama sila teže ne može da zaustavi strujanje u vertikalnom pravcu naviše većih kapi, sa većom kinetičkom energijom. Veće kapi dosežu do gornjeg dela doboša u kome se smanjuje protočni presek i ubrzava struja pare, tako da sa tokom pare bivaju odnešene u izlazni parovod. Sa povećanjem visine od površine dvofazne mešavine do izlaznog preseka pare iznad navedene visine od 0,8 m ne postiže se



Slika 1.4 Granične vrednosti prečnika kapi koje mogu biti odnešene iz parnog prostora doboša.

značajno smanjenje vlage.

Sa povećanjem produkcije pare u kotlu, povećava se i protok pare koja se izdvaja iz dvofazne mešavine u dobošu, a samim tim se povećava i uključivanje kapi u tok pare u parnom prostoru doboša. Stoga je sa stanovišta smanjenja uključivanja kapi u tok pare na površini dvofazne mešavine povoljnije ukoliko je brzina pare na površini manja, odnosno ukoliko je za zadatu produkciju pare veća slobodna površina dvofazne mešavine. Parametar pomoću koga se uzima u obzir uticaj brzine pare, koja napušta površinu dvofazne mešavine, na uključivanje kapi, naziva se opterećenje površine dvofazne mešavine i određuje se kao

$$R_A = \frac{\dot{D}v''}{A} \quad (\text{ms}^{-1}) \quad (1.7)$$

gde je \dot{D} produkcija pare u kotlu, v'' je specifična zapremina suvozasićene pare, a A je veličina slobodne površine dvofazne mešavine u dobošu. Da bi se uzeo u obzir i uticaj gravitacione separacije na sadržaj vlage u pari definiše se i zapreminsko opterećenje parnog prostora kao

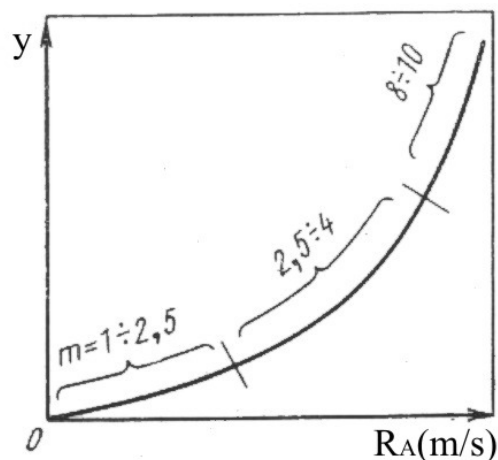
$$R_v = \frac{\dot{D}v''}{V_p} = \frac{R_A}{h_{sr}} \quad (\text{s}^{-1}) \quad (1.8)$$

gde je V_p zapremina parnog prostora u m^3 , a h_{sr} je srednja visina parnog prostora u m. Sa smanjenjem R_A , odnosno R_v , smanjuje se i vlažnost pare koja napušta parni prostor doboša.

Zavisnost vlažnosti pare od opterećenja površine R_A je prikazana na slici 1.5. Ova zavisnost se može opisati izrazom

$$y = 1 - x = nR_A^m \quad (1.9)$$

gde eksperimentalne konstante m i n zavise od vrste doboša, pritiska i koncentracije nečistoća u vodi. Eksponent m se značajno menja sa opterećenjem površine R_A . Uočavaju se tri oblasti. Za opterećenja pri kojima je vrlo mali sadržaj vlage u pari ($y < 0,03\%$), $m = 1-2,5$, za opterećenja kod kojih je $y = 0,03-0,2\%$, $m = 2,5-4$, i za veća opterećenja sa $y > 0,2\%$, $m = 8-10$ (Rasohin, 1980). Dobroši kod energetskih kotlova rade na početku druge oblasti kod koje je $m = 2,5-4$.



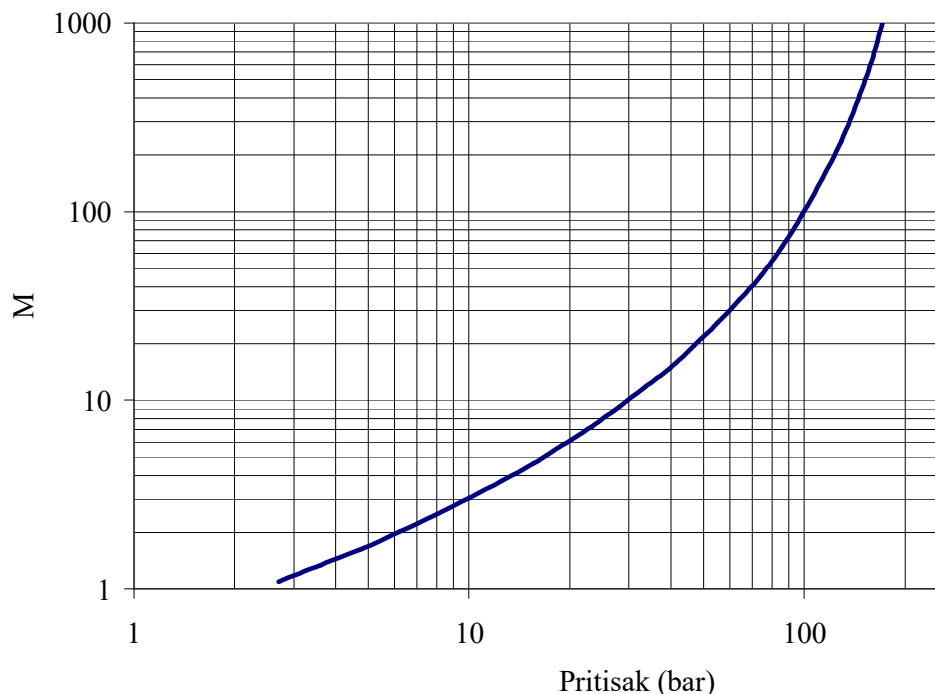
Sika 1.5 Zavisnost vlažnosti pare od opterećenja površine dvofazne mešavine.

Vlažnost pare na vrhu parnog prostora doboša, kod koga deluje samo gravitaciona separacija, može se odrediti prema eksperimentalnom izrazu

$$y = 0,211 \frac{R_A^{2,76}}{h_p^{2,3}} \frac{\nu^2 (\rho'')^{1,1} (\rho' - \rho'')^{0,09}}{\sigma^{1,19}} 10^{10} = M \frac{R_A^{2,76}}{h_p^{2,3}} \quad (1.10)$$

gde je h_p visina parnog prostora doboša, R_A je određeno jed. (1.7), a konstanta M zavisi od termofizičkih parametara vode i pare, tako da je njena zavisnost od pritiska data na slici 1.6. Na osnovu slike 1.6 i jed. (1.10) zaključuje se i da se pri konstantnom opterećenju površine i određenoj visini h_p , sa povećanjem pritiska znatno smanjuje gravitaciona separacija. Do ovog zaključka se dolazi i na osnovu jed. (1.4). Sa povećanjem pritiska se smanjuje razlika gustina faza, tako da se značajno smanjuje i brzina pare koja sa sobom može da ponese kapi određenog prečnika d_k .

Nivo dvofazne mešavine u dobošu, a samim tim i visina parnog prostora, menjaju se tokom promena snage kotla i pritiska u cevnom sistemu kotla u prelaznim i poremećenim uslovima rada. Samim tim se menja i sadržaj vlage u pari koja ističe iz doboša. Pored toga, do značajnog povećanja visine na kojoj se nalazi površina dvofazne mešavine u dobošu kotla, a samim tim i do povećanja vlažnosti pare, može doći ukoliko se koncentracija soli u kotlovskoj vodi poveća iznad određene kritične vrednosti. Povećanje koncentracije soli iznad kritične vrednosti dovodi do smanjenja dimenzija mehurova pare u sloju dvofazne mešavine u dobošu, samim tim se protok pare kroz vodeni prostor doboša ostvaruje sa povećanim brojem mehurova, povećava se razdelna površina između vode i pare, povećava se međufazno trenje vode i pare na površini mehurova, što sve dovodi do povećanja zapreminskog udela pare u sloju vode i povećanja ("nadimanja") zapremine dvofazne mešavine. Na slici 1.7 je prikazan uticaj koncentracije soli u kotlovskoj vodi na vlažnost pare koja napušta površinu dvofazne mešavine. Pri koncentracijama



Slika 1.6 Parametar proporcionalnosti vlažnosti pare na izlazu iz doboša i opterećenja površine dvofazne mešavine.

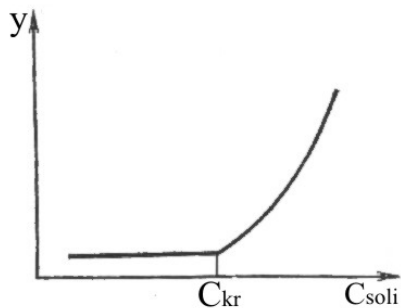
manjim od kritične, vlažnost pare se ne menja. Sa porastom koncentracije soli iznad kritične vrednosti, vlažnost naglo raste.

U cilju procene potrebne zapremine doboša, može se koristiti sledeća empirijska korelacija koja daje zavisnost između maksimalno prihvatljivog zapreminskog opterećenja parnog prostora R_v , pritiska u barima i električne provodljivosti kotlovske vode λ u mikrosimensima po centimetru ($\mu\text{S/cm}$)

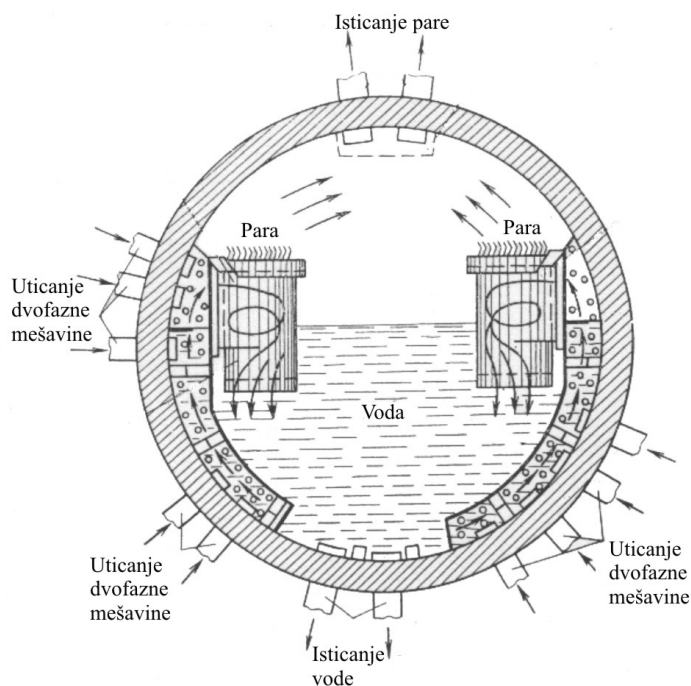
$$R_{v,\max} = 0,264 \cdot 10^3 p^{-0,7} \lambda^{-0,61} \quad (1.11)$$

Između električne provodljivosti i koncentracije soli postoji direktna relacija; povećanju koncentracije soli od 1 mg/l odgovara povećanje provodljivosti od 2 $\mu\text{S/cm}$.

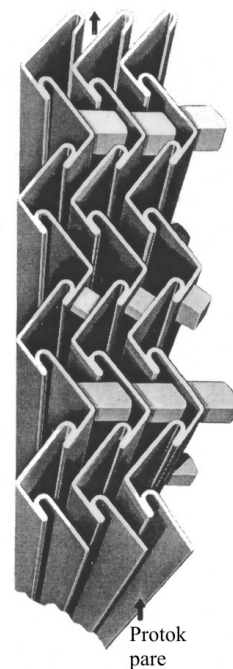
Ukoliko bi vlažnost pare na izlazu iz parnog prostora doboša, određena pomoću jed. (1.10), bila veća od dozvoljenih vrednosti, onda u doboš treba uključiti i posebne uređaje za separaciju vlage, kao što su ciklonski separatori vlage (slika 1.8) i separatori vlage sa talasastim limovima – takozvani sušaci pare (slika 1.9).



Slika 1.7 Zavisnost vlažnosti pare od koncentracije soli u kotlovske vode.



Slika 1.8 Ciklonski separatori u dobošu kotla.



Slika 1.9 Sušać pare (separator sa talasastim limovima).

Već je rečeno da povećani sadržaj vlage pare na ulazu u pregrejač snižava temperaturu pare na izlazu iz pregrejača. Ova zavisnost je analizirana za uslove rada pregrejača pare 1 na kotlu bloka 1, odnosno 2 TENT A. Toplotna snaga pregrejača pare je određena kao

$$\dot{Q}_{PP1} = \dot{m}(h_{PP1,iz} - h_{PP1,ul}) \quad (1.12)$$

Odakle se entalpija pare na izlazu određuje kao

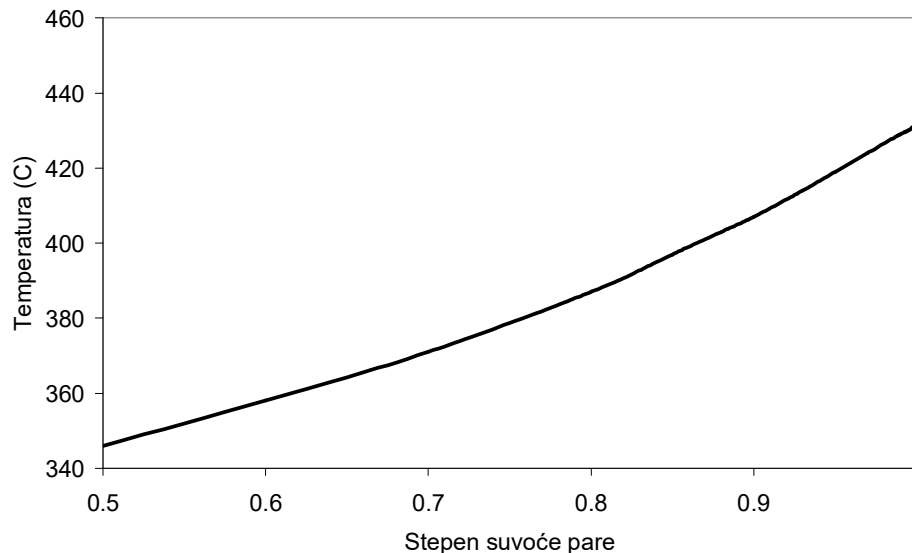
$$h_{PP1,iz} = \frac{\dot{Q}_{PP1}}{\dot{m}} + h_{PP1,ul} \quad (1.13)$$

a entalpija vlažne pare na ulazu u pregrejač se određuje kao

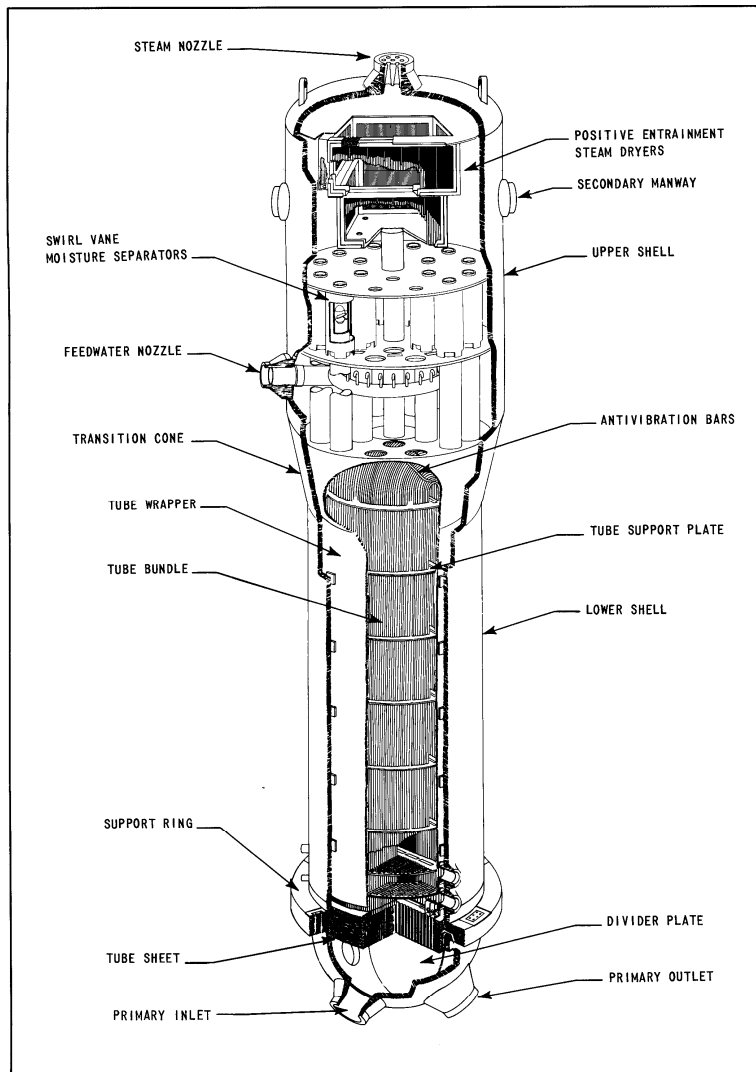
$$h_{PP1,ul} = h'(p_{PP1,ul}) + x_{PP1,ul} \cdot r(p_{PP1,ul}) \quad (1.14)$$

gde je $p_{PP1,ul}$ pritisak na ulazu u pregrejač pare 1, h' je entalpija zasićene vode, a r je latentna toplota isparavanja.

Prema tehnološkoj šemi blokova A1 i A2 TENT A, za nominalne uslove rada, protok pare na izlazu iz doboša je 180,56 kg/s, pritisak pare na ulazu u pregrejač pare 1 je 161 bar, a temperatura 350 °C. Parametri pare na izlazu iz pregrejača pare su 158 bar i 440 °C. Na osnovu ovih parametara je određena toplotna snaga pregrejača od 90,5 MW, a iz jednačina (1.13) i (1.14) je određena entalpija pare na izlazu iz doboša $h''_{PP1,iz}$ za različite stepene suvoće vlažne pare na ulazu u pregrejač. Na osnovu sračunate entalpije na izlazu i za pritisak od 158 bar je određena tempertura pare i rezultati su prikazani na slici 1.10. Rezultati pokazuju značajan pad temperature pare na izlazu pregrejača u zavisnosti od stepena suvoće vlažne pare na ulazu u pregrejač pare 1.



Slika 1.10 Zavisnost temperature pare na izlazu iz pregrejača pare 1 od stepena suvoće pare na ulazu na bloku 1 i 2 TENT A.



Westinghouse STEAM GENERATOR
MB 3593