

A. Vohauc
 Institut za nuklearne nauke Vinča
 Laboratorija za termotehniku i energetiku
 11001 Beograd, Pošt. fak 522

FIZIČKI PARAMETRI EFLUENATA
 IZ RASHLADNIH TORNJEVA NUKLEARNE ELEKTRANE

PHYSICAL PARAMETERS OF EFFLUENT
 FROM NUCLEAR POWER STATION COOLING TOWERS

SAHRŽAJ - Razmatrane su vrednosti fizičkih parametara efluenata iz vlažnih rashladnih tornjeva nuklearne elektrane, tj. zagrejanog vlažnog vazduha sa kapima nastalim kondenzacijom i kapima raspršene rashladne vode. Poznavanje fizičkih parametara efluenata na izlazu iz rashladnog tornja bitno je radi proračuna rasejanja efluenata po okolini. Količina i spektar veličina kapi raspršene rashladne vode dobijaju se na osnovu merenja in situ i eksperimentalne karakterizacije eliminatora kapi. Originalno razvijeni proračun prenosa toplote i supstance unutar ispuha vlažnog rashladnog tornja omogućava dobijanje preciznijih podataka za parametre izlaznog vazduha iz tornja u zavisnosti od snage elektrane, karakteristike tornja i atmosferskih uslova.

ABSTRACT - Physical parameters of the effluent dispersed from the wet cooling towers, i.e. mixture of the warm moist air with the entrained droplets are analyzed. Understanding of the effluent physical parameters at the exit of cooling tower is important for prediction of the effluent dispersion in the environment. Mass and droplet diameter distributions of the drifted cooling water are measured in situ and also, drift eliminators are characterized experimentally. A new numerical method for heat and mass transfer evaluation in the cooling tower packing (fill) was developed, that leads to more accurate prediction for outlet air parameters in relation of plant power rate, cooling tower characteristics and atmospheric conditions.

1. UVOD

Na izlazu vazduha iz vlažnog rashladnog tornja pojavljuju se zagrejani vazduh povišene vlažnosti sa kaplama vode, koje čine perjanicu rashladnog tornja vidljivom. Fizički parametri efluenata iz rashladnog tornja: brzina, temperatura i relativna vlažnost izlaznog vazduha, kao i koncentracija i spektar prečnika vodenih kapi, predstavljaju polazne podatke za predviđanje rasprostiranja vlažne perjanice, odnosno rasprostiranja i taloženja vodenih kapi poreklom iz rashladnog tornja. Precizniji podaci o fizičkim parametrima efluenata iz rashladnog tornja omogućavaju, uz korišćenje adekvatnih matematičkih modela, preciznije predviđanje rasprostiranja efluenata po okolini i eventualnih interakcija sa efluentima drugog poroka.

Specifičnost rashladnih tornjeva nuklearne elektrane u odnosu na rashladne tornjeve termoelektrane na fosilna goriva ogleda se pre svega u prosečno većim gabaritima i većim toplotnim snagama koje se u njima disipiraju, tj. predaju okolnoj atmosferi. Veće dimenzije i veće toplotne snage rashladnih tornjeva nuklearne elektrane su posledica u proseku većih nominalnih snaga blokova u čijem sistemu povratnog hladjenja radi rashladni toranj, nešto nižih vrednosti stepena iskorišćenja generisane toplotne snage savremenih nuklearnih elektrana i većeg procenta neiskorišćene toplotne snage koji se upućuje na rashladne tornjeve. Tako, za raspon hladjenja od 10°C , rashladni toranj treba da hladi protok vode u proseku oko $150 \text{ m}^3/\text{h}$ u nuklearnoj elektrani, odnosno oko $100 \text{ m}^3/\text{h}$ u termoelektrani na fosilna goriva, za svaki proizvedeni MW električne snage.

Sa stanovišta povećanih mera sigurnosti i zaštite okoline kako pri normalnom radu, tako i pri akcidentnim uslovima, radi tačnije procene moguće interakcije efluenata iz rashladnih tornjeva sa ispuštenim radionuklidima, nameću se zahtevi za preciznije određivanje fizičkih parametara efluenata iz rashladnih tornjeva nuklearne elektrane.

2. VODENE KAPI KAO EFLUENTI IZ RASHLADNOG TORNJA

Voda se na izlasku vazduha iz rashladnog tornja pojavljuje u obliku pare u sastavu vlažnog vazduha i u vidu vodenih kapi dvojakog porekla. Jedan deo kapi sa prečnicima reda veličine $1 \mu\text{m}$ nastaje kondenzacijom vodene pare iz vlažnog vazduha, dok ostali deo kapi predstavljaju kapi raspršene rashladne vode koje, poneke strujom vazduha, prolaze eliminatoru kapi i napuštaju toranj. Kapi raspršene rashladne vode (drift) sadrže sve rastvorene soli i minerale kao i rashladna voda, a pojavljuju se u širokom spektru prečnika od desetak do nekoliko stotina mikrometara (čak i reda veličine milimetra). Usled sudara, spajanja i narastanja kapi nastaju oštre razlike ove dve vrste kapi po poreklu, u pogledu sastava i veličine, te se na izlazu dobija kontinualna distribucija koncentracije kapi u odnosu na intervale prečnika sa dva ili pak samo sa jednim maksimumom.

Merenja spektra veličina kapi koji napuštaju toranj vrše se obično uz korišćenje hemijski osetljivih papira, premazanih slajdova ili laserske tehnike. Npr. uz upotrebu filmova prekrivenih tečnom plastikom i osetljivog papira, merenja na izlazu iz ventilatorskih tornjeva daju bimodalnu raspodelu procentualne zastupljenosti po broju u zavisnosti od prečnika sa maksimumima na $35 \mu\text{m}$ i $200 \mu\text{m}$. Pri tome, kapi prečnika iznad 1 mm čine $0,007 \%$ kapi po broju (ali preko 96% kapi po masi), dok kapi prečnika ispod $100 \mu\text{m}$ čine preko 97% kapi po broju (a manje od 1% kapi po masi) (1). Tornjevi sa starijim tipovima eliminatora kapi imaju spektre prečnika kapi pomerene ka većim dijametrima, a i samim tim veće gubitke rashladne vode u vidu raspršenih kapi. F.M. Shofner et al (2) iznose podatke sa merenja na tornjevima sa prirodnim strujanjem vazduha u elektranama Hornsring i Homer City, pri čemu su dobijene unimodalne raspodele kod kojih su maseni medijalni dijametri na $95 \mu\text{m}$, odnosno na oko $130 \mu\text{m}$. Merenja su vršena osetljivim papirima i laserskom tehnikom (PILSD). Pri tome se određuju brojevi kapi ΔN_i u svakom intervalu prečnika kapi $\Delta d_i [\mu\text{m}]$ po jediničnoj zapremini $V_0 [\text{m}^3]$, pa distribucija broja kapi po prečniku iznosi: $n_i = \Delta N_i / (\Delta d_i V_0) [1/\mu\text{m m}^3]$. Distribucija mase kapi po prečniku je prema tome: $m_i = (n_i d_i^3 / 6) \rho n_i [\mu\text{g } \mu\text{m}^{-1} \text{m}^{-3}]$, gde d_i pred-

stavlja srednji dijametar kapi u intervalu Δd_k , a ρ - gustinu vode u kapi. Distribucija masenog fluksa se dobija kao $f_k = m_k u_k$, gde je u_k - apsolutna brzina kapi srednjeg prečnika d_k na mestu merenja, a maseni fluks na mestu merenja se dobija zbrajanjem masenih flukseva po svim dijametrima kapi. Pored pomenutih metoda i kombinacija tih metoda, za dobijanje ukupnog masenog fluksa kapi koriste se još izokinetička sonda i ciklonski separator. Sve ove metode i tehnike još se razvijaju u pogledu tačnosti, naročito za niže vrednosti flukseva i merenje distribucije najsitnijih kapi ($< 30 \mu m$) [7].

Zbrajanjem masenih flukseva vodenih kapi po čitavom poprečnom preseku izlaznog otvora tornja dobija se ukupna emisija (ukupni maseni protok) vodenih kapi iz rashladnog tornja. Ona uglavnom zavisi od protoka rashladne vode, konstrukcije eliminatora kapi i brzine strujanja vazduha kroz tornj. Kod ventilatorskih tornjeva sa standardnim eliminatorima kapi, gubitak vode u obliku kapi raspršene vode iznosi od 0,02 % do 0,12 % protoka cirkulacione vode, sa tipičnom vrednošću od 0,05 %, dok je sa usavršenim eliminatorima taj procenat varira od 0,001 % do 0,008 %, sa tipičnom vrednošću od 0,004 % [4]. Ispitivanja na tornjevima sa prirodnim protokom pokazuju da se nešto više od 0,001 % cirkulacione vode gubi u vidu kapi, a A. Koffman i R.E. Grimbale [1] za obe vrste tornjeva (sa prirodnim i sa prinudnim strujanjem vazduha), kao tipičnu vrednost gubitka vode u vidu raspršenih kapi uzimaju 0,005 % protoka rashladne vode, što je u skladu sa merenjima i navodima drugih autora i projektnim ponudama proizvođača.

3. PARAMETRI VLAŽNOG VAZDUHA NA IZLAZU IZ TORNJA

U ispunj vlažnog rashladnog tornja, voda i vazduh dolaze u direktan kontakt, pri čemu se voda hladi prvenstveno delimičnim isparavanjem i konvekcijom, a vazduh koji učestvuje u procesu se zagreva i zasićuje vlagom. Složeni procesi prenosa toplote i supstance obično se opisuju sistemom diferencijalnih jednačina sa uvođenjem određenog broja aproksimacija, kao što je zanemarivanje promene protoka vode usled isparavanja. Klasičan Merkelov pristup formulisanju i modifikaciji osnovnog sistema jednačina dovodi

do tzv. Merkelove glavne jednačine u integralnom obliku:

$$\sigma F / G_v = \int_{t_{v2}}^{t_{v1}} C_v dt_v / (h''_{tv} - h) \quad (1)$$

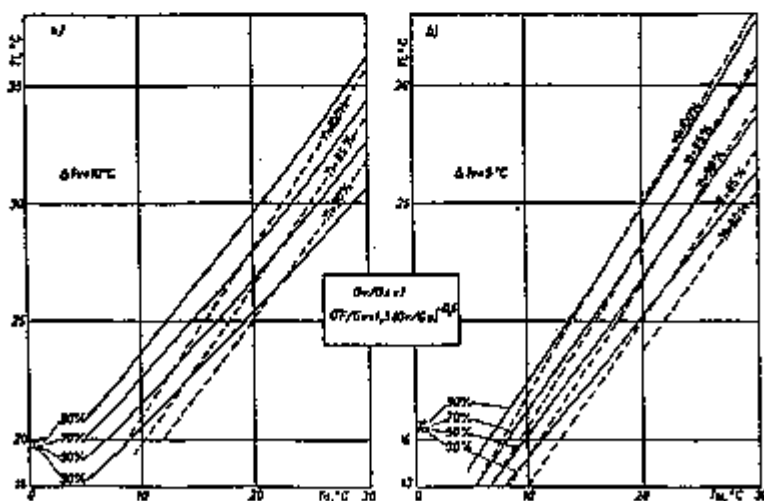
u kojoj je bezdimenzijski izraz sa leve strane u literaturi poznat kao Merkelov broj tj. $Me = \sigma F / G_v$, gde je σ - površinski koeficijent prelaza mase, F - površina razmene, a G_v - maseni protok vode. Integral sa desne strane jednačine (1) je u granicama raspona hlađenja vode $\Delta t_v = t_{v1} - t_{v2}$, a C_v je specifični toplotni kapacitet vode, h''_{tv} - entalpija zasićenog vlažnog vazduha na temperaturi vode, dok je h - entalpija vazduha na odgovarajućem mestu ispuha. S druge strane, pokazuje se da jednačina oblika:

$$\sigma F / G_v = A (G_v / G_s)^B \quad (2)$$

dobro koreliše eksperimentalne podatke dobijene pri karakterizaciji ispuha /3/, gde G_s predstavlja maseni protok sušlog vazduha, a A i B konstante korelacije. Razvijeni su mnogobrojni metodi numeričkog određivanja Me -broja sa uvođenjem određenih korekcija, od kojih, neki obezbeđuju zadovoljavajuću tačnost pri određivanju vrednosti Me -broja, odnosno u predviđanju temperature ohlađene vode za date okolnosti /3/. Međutim, pokazuje se da većina savremenih metoda ne daje proračunske vrednosti parametara izlaznog vazduha, već pretpostavlja relativnu vlažnost izlaznog vazduha od 100%. Ova aproksimacija, za uobičajene uslove rada rashladnih tornjeva, može da dovede do greške u utvrđivanju temperature izlaznog vazduha od preko 2 °C. Što naknadno utiče na proračun vidljive perjanice (u slučaju kraćih perjanica, dužina do 300 m, razlike u proračunatim dužinama prevazilaze 20% /3/). S obzirom da parametri izlaznog vazduha zavise od: raspona hlađenja vode, odnosa masenih protoka vode i vazduha, karakteristike ispuha i relativno veoma promenljivih atmosferskih uslova u kojima rashladni tornj radi, nemoguće je adekvatno predviđanje fizičkih parametara izlaznog vazduha samo na bazi ograničenog broja obavljenih merenja na izgrađenom tornju.

Originalno razvijeni numerički metod rešavanja matematičkog modela prenosa toplote i mase unutar ispuha protivstrujnog

vlažnog rashladnog tornja /10/, izvedenog bez uobičajenih aproksimacija, omogućava dobijanje preciznih podataka kako o temperaturama vode i promenama masenog protoka vode usled isparavanja, tako i temperature i relativne vlažnosti izlaznog vazduha, za date parametre ulaznog vazduha i uslove u ispuni. Numerički postupak se zasniva na metodi alternativnih stacionarnih (bolje: "zamrznutih") stanja, univerzalno primenljivog na sve slučajeve razmene toplote i mase pri suprotnosmernom kretanju fluida koji učestvuju u procesu razmene. U konkretnom slučaju, iz poznatog masenog protoka vode i temperature vode na gornjem kraju ispunе i poznatog masenog protoka vazduha, njegove temperature i vlažnosti, na donjem kraju ispunе, metod alternativnih stacionarnih stanja omogućava rešavanje jednačina iz sistema koje određuju promene parametara jednog fluida duž ispunе u smeru njegovog kretanja, zadržavajući ("zamrzavajući") parametre drugog fluida koji utiču na razmenu, na vrednostima iz prethodnog prolaska. Taj postupak se ponavlja naizmenično, jer se pri dolasku na kraj ispunе, vršći proračun po jednom fluidu u smeru njegovog kretanja, uloge menjaju, kao i smer rešavanja. Ovaj relaksacioni postupak vodi ukupnom rešenju tako, što se razlike vrednosti parametara svakog fluida na krajevima određenih segmenata, odnosno na krajevima ispunе, iz tekućeg i prethodnog prolaska neprestano smanjuju, dok ne postanu manje od unapred zadate male vrednosti.



SLIKA 1. IZLAŽNI PARAMETRI VAZDUHA (t_v, D_v) U ZAVISNOSTI OD ULAZNIH PARAMETARA (t_v, D_v) ZA DATE USLOVE U ISPUNU RASHLADNOG TORNJA

Primer primene ovog numeričkog postupka i računarskog programa na konkretnu rashladnu tornj u širokom dijapazonu parametara ulaznog vazduha i barometarskom pritisku od 1000 mbar, prikazan je na dijagramu (slika 1). Proračun je izvršen za slučaj jednakih mešanih protoka vode i vazduha, za datu karakteristiku ispušne, pri rasponu hlađenja vode a) 10°C i b) 5°C . Pokazuje se da pri višim temperaturama i nižim vrednostima relativne vlažnosti ulaznog vazduha, pri navedenim uslovima, relativna vlažnost izlaznog vazduha može da bude i ispod 80%.

Za svaki skup relevantnih uslova, razvijeni metod proračuna, samostalno ili uključuen u kompleksni zonalni hidraulički i termički proračun rashladnog tornja, omogućava dobijanje preciznih vrednosti fizičkih parametara izlaznog vazduha, koji predstavljaju polazne podatke za adekvatno predviđjanje rasprostiranja vlažne perjanice.

4 ZAKLJUČAK

Poznavanje vrednosti fizičkih parametara efluenata iz vlažnih rashladnih tornjeva nuklearnih elektrana neophodno je radi kvantitativnog predviđjanja rasprostiranja tih efluenata, kao i razmatranja delovanja tog rasijanja na okolinu i interakcija sa drugim ispuštima iz elektrane.

Koncentracija i spektar vodenih kapi na izlazu iz rashladnih tornjeva određuju se isključivo eksperimentalnim putem na izgrađenim objektima i karakterizacijom eliminatora kapi na eksperimentalnim uredjajima. Izmerene vrednosti su karakteristične za određenu konstrukciju tornja i date hidrauličke uslove.

Fizički parametri izlaznog vlažnog vazduha u mnogo većoj mjeri zavise od atmosferskih uslova, pa je pored eksperimentalno određene karakteristike ispušne, potrebno izvršiti proračun za svaki konkretni skup uslova. Razvijeni metod proračuna omogućava precizno dobijanje relevantnih podataka.

5. LITERATURA

- /1/ ASME Research Committee, "Cooling Tower Plume Modeling and Drift Measurement", ASME, 1975.
- /2/ S.R.Hanna, J.Pell, Coord., "Cooling Towers Environment-1974", Proceedings of a Symp., University of Maryland, 1975.
- /3/ A.Vehauc, Z.Zarić, "Uticaj promene polaznih uslova na predviđanje rasprostriranja perjanica rashladnih tornjeva nuklearne elektrane", XXI Jugoslovenska Konferencija za ETAN, jun 1977.
- /4/ A.Vehauc, "Termičke opterećenje okoline konvencionalnih i nuklearnih termoelektrana prouzrokovano radom rashladnih tornjeva", Magistrski rad, Mašinski fakultet, Beograd, 1980.
- /5/ J.W.Sutherland, "Analysis of mechanical-draught counter-flow air/water cooling towers", Trans. of the ASME, J. of Heat Transfer, Vol.105, pp.576-583, August 1983.
- /6/ N.Ninić, A.Vehauc, "Eksperimentalno ispitivanje ispunu rashladnih tornjeva", VII Simpozijum termičara Jug., jun 1984.
- /7/ M.W.Golay, W.J.Glantschnig, F.R.Best, "Comparison of methods for measurement of cooling tower drift", Atmospheric Environment, Vol.20, No.2, pp.289-291, 1985.
- /8/ J.Montfort, A.Voule, "The cooling system for nuclear power stations. Design criteria and methods", RGN Int. Edition.
- /9/ N.Ninić, A.Vehauc, "Analiza uticaja izbora nulte tačke entalpije vode na tačnost Merkelovog metoda proračuna rashladnih tornjeva", IBK-TTE-885, maj 1987.
- /10/ A.Vehauc, "Razvoj metoda određivanja prenosa mase i toplote unutar ispunu protivstrujnog vlažnog rashladnog tornja", Doktorska disertacija, Tehnološki fakultet, Novi Sad, 1991.