

Modeli razmjene toplote kod termoelektrana sa ultra-super-kritičnim parametrima pare

MERIM M. ALIČIĆ, JP Elektroprivreda BiH,
ZD Rudnici "Kreka", Tuzla, Bosna i Hercegovina

Pregledni rad
UDC. 621.311.22:536.24
DOI: 10.5937/tehnika1704531A

Trenutno se u svijetu sve više razvijaju i grade termoenergetska postrojenja sa nadkritičnim početnim radnim parametrima pare. Rad postrojenja sa ovim parametrima karakteriše viši stepen korisnosti što i jeste jedan od osnovnih razloga za njihovu primjenu. Proces isparavanja se odvija u pseudo-kritičnoj oblasti, odnosno pri dostizanju pseudo-kritične temperature kada započinje kontinuiran prelaz vode iz tečnog u gasovito stanje. Ovu promjenu faze karakteriše nagla promjena termofizičkih karakteristika kao što su: specifična toplota, gustina, dinamički viskozitet, toplotna provodljivos dr. Problematika pogoršane razmjene toplote proučava se u oblasti konvektivne razmjene toplote i iz uslova sličnosti temperaturnog polja za strujanje bez unutrašnjeg izvora toplote između kojih je uspostavljena funkcionalna zavisnost nazvana Nusseltov kriterijum sličnosti.

Ključne riječi: superkritičan fluid, pseudokritična oblast, prenos toplote, Nusseltov kriterijum sličnosti

1. UVOD

Proces razmjene toplote kod termoelektrana sa ultra-super-kritičnim parametrima pare odvija se u području iznad kritične tačke za vodu, u području superkritičnog fluida, kao što je to predstavljeno na faznom dijagramu za vodu (slika 1).

Superkritičan fluid je fluid koji na temperaturi i pritisku iznad svoje kritične tačke posjeduje gustinu tekućine i viskoznost plina. Kritična temperatura je temperatura iznad koje ne postoji razlika između tečne i plinovite faze i pri toj temperaturi nastaje superkritični fluid. Kritični pritisak je pritisak pare na kritičnoj temperaturi. Na faznom dijagramu se kritični pritisak i temperatura obilježavaju kao kritična tačka. Iznad kritične temperature povećavanjem pritiska ne može se dobiti tečna faza [1].

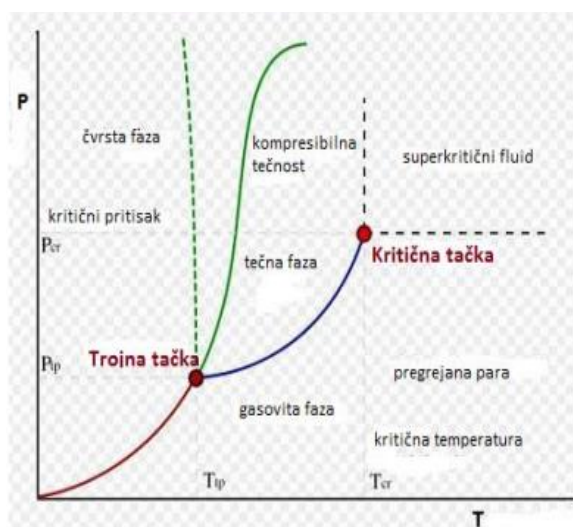
Za sve vrijednosti pritiska u nadkritičnoj oblasti, počevši od vrijednosti bliskih kritičnoj tački, specifična toplota vode pri nekoj određenoj vrijednosti temperature dostiže svoj maksimum.

Adresa autora: Merim Aličić, JP Elektroprivreda BiH, ZD Rudnici "Kreka", Tuzla, Mije Keroševića Guje 1, Bosna i Hercegovina

e-mail: merim.alicic@gmail.com

Rad primljen: 29.05.2017.

Rad prihvaćen: 13.06.2017.



Slika 1 - Fazni dijagram za vodu [1]

Vrijednost temperature pri kojoj se dostiže maksimalna specifična toplota naziva se pseudokritična temperatura [2]. Pod kritičnim parametrima parnog ciklusa podrazumijevaju se parametri pri kojima se voda direktno pretvara u paru bez promjene specifične zapremine i imaju vrijednosti: $t=374,15^{\circ}\text{C}$ i $p=221,2$ bar [3].

Parametri pare za podkritična, super-kritična i ultra super - kritična termoenergetska potrojenja predstavljani su u tabeli 1.

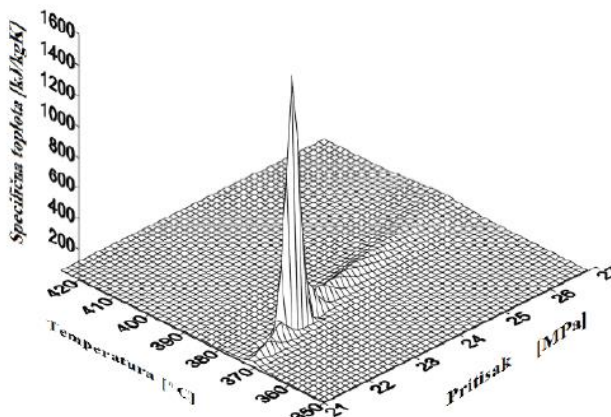
Tabela 1. Parametri pare za podkritična, super-kritična i ultra super-kritična potrojenja [3]

| Parametar | Jedinica | Podkritični parametri | Super-kritični parametri pare SC | Ultra-super-kritični parametri pare USC |
|-------------|----------|-----------------------|----------------------------------|---|
| Pritisak | bar | od 100-220 | od 220-255 | od 255-350 |
| Temperatura | °C | do 540 | do 580 | od 590 do 720 |

2. PSEUDOKRITIČNA OBLAST

U procesu razmjene toplote u području dokritičnih parametara specifična toplota vode i pare ograničena je svojim vrijednostima na liniji zasićenja, dok se u

području nadkritičnih parametara ne uočava oblast u kojoj se odvija isparavanje, pa se i promjena vrijednosti specifične toplote odvija po drugim zakonitostima [2].

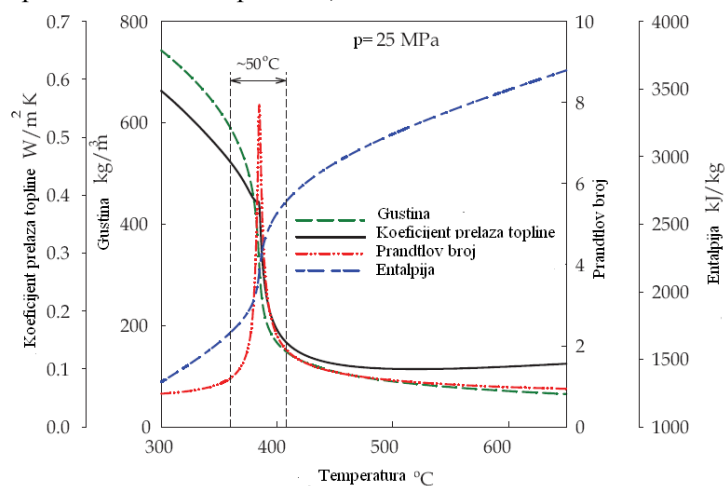
Slika 2 - Prikaz pseudokritične oblasti u p - T , p - c_p i p - T - c_p dijagramu [2]

Za vrijednosti pritiska u kritičnoj tački od 221,2 bar evidentna je i kritična temperatura od 374,15°C.

ali se maksimalna specifična toplota smanjuje u odnosu na onu u kritičnoj tački.

Pri ovoj temperaturi specifična toplota ima maksimalnu vrijednost. Sa povećanjem pritiska povećava se i vrijednost odgovarajuće pseudokritične temperature,

Pored specifične toplote u pseudokritičnoj oblasti, i druge termofizičke veličine vode imaju skokovite promjene.

Slika 3 - Termofizičke osobine vode u pseudokritičnoj oblasti za $p=25$ MPa [6]

Zbog opisanih promjena termofizičkih veličina vode u pseudokritičnoj oblasti dolazi do pogoršane razmjene toplote. Pogoršana razmjena toplote karakteristika je procesa koji se odvijaju u uslovima kada specifična toplota prelazi vrijednosti $c_p > 8$ kJ/kgK, što predstavlja zonu visokih specifičnih toplina [2].

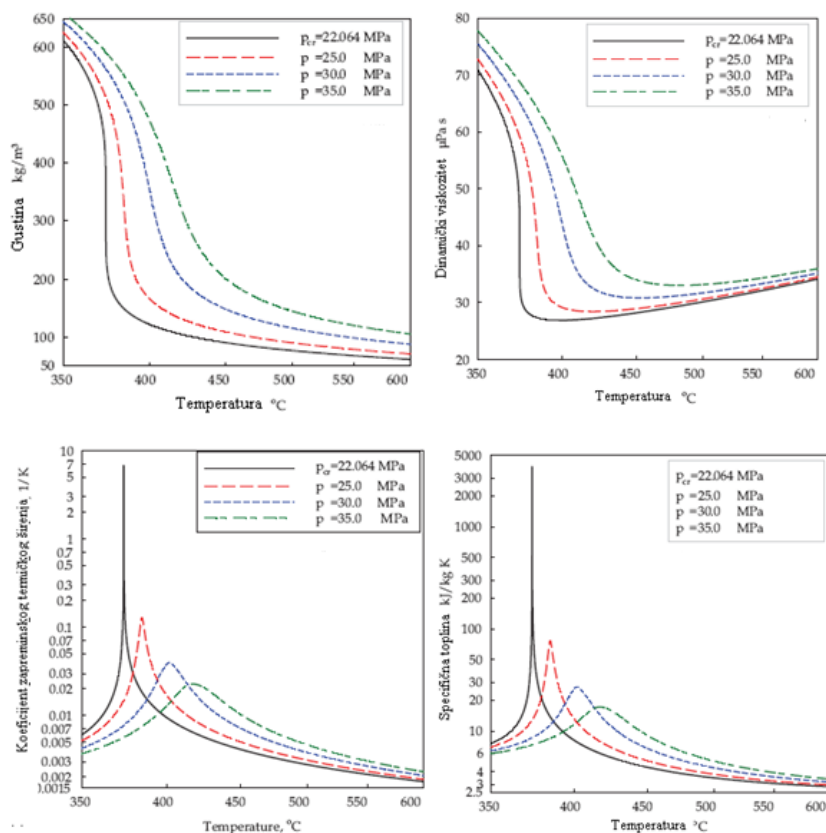
3. PROCES RAZMJENE TOPLOTE U PSEUDOKRITIČNOJ OBLASTI

Procesi koji se odvijaju u oblasti sa uticajem kritičnih i pseudokritičnih parametara mogu predstavljati rizične procese sa stanovišta razmjene toplote. Naglo

se povećava specifična toplota, dok se istovremeno naglo smanjuje specifična gustoća, dinamički viskozitet i toplotna provodljivost. Sa povećanjem radnog pritiska, promjena termofizičkih veličina postaje sve blaža, što je pokazatelj i veće stabilnosti pri razmjeni toplote na većim radnim pritiscima [4].

Problematika pogoršane razmjene toplote proučava se u oblasti konvektivne razmjene toplote i iz uslova sličnosti temperaturnog polja, za strujanje bez unutrašnjeg izvora toplote, između kojih je uspostavljena funkcionalna zavisnost nazvana Nusseltov kriterijum sličnosti [5]:

$$Nu = f(R_e, P_r) \quad (1)$$



Slika 4 - Promjena termofizičkih veličina vode u natkritičnoj oblasti [6]

3.1. Modeli razmjene toplote u natkritičnoj oblasti

Postoji više modela procesa razmjene toplote u nadkritičnoj oblasti, gdje su sadržani koeficijenti koji odgovaraju jednačini [6]:

$$Nu = C \cdot Re_x^n \cdot Pr_x^m \cdot F \quad (3)$$

$$F = f\left(\frac{c_p}{c_p}, \frac{\rho_w}{\rho_b}, \frac{D}{L}\right); \quad (4)$$

Model Dittus – Boelter (1930)

Nusselt-ov broj sadrži koeficijent prelaza toplote, pa se prethodna relacija može napisati i kao:

$$\alpha = \frac{\lambda}{D} f(R_e, P_r) \quad (2)$$

Na osnovu jednačine (2) vidi se da je koeficijent prelaza toplote sa zida cijevi na fluid zavisan od karaktera strujanja, međusobnog odnosa temperaturnog i brzinskog graničnog sloja, te toplotne provodljivosti fluida i ekvivalentnog prečnika. Na osnovu Nusseltovog kriterijuma sličnosti ekperimentalnim metodama razvijeni su modeli razmjene toplote u natkritičnoj oblasti.

$$Nu = 0.023 \cdot Re_b^{0.80} \cdot Pr_{min}^{0.8} \left(\frac{\rho_w}{\rho_b}\right)^{0.3} \quad (5)$$

Pr_{min} je minimalna vrijednost od Pr_{min} ili Pr_b ;

Model Bichop (1964)

$$Nu = 0.023 \cdot Re_x^{0.90} \cdot Pr_x^{0.66} \cdot \left(\frac{\rho_w}{\rho_b}\right)^{0.43} \cdot \left[1 + 2.4 \cdot \frac{D}{L}\right]; \quad (6)$$

$$\text{Pr} = \left(\frac{h_w - h_b}{T_w - T_B} \cdot \frac{\mu_b}{k_b} \right) \quad (7)$$

$$C = \left(\frac{h_w - h_b}{T_w - T_B} \right) \quad (8)$$

Model Swenson (1965)

$$Nu = 0.00459 \cdot \text{Re}_x^{0.92} \cdot \text{Pr}_x^{0.61} \cdot \left(\frac{c_p}{c_{pb}} \right)^{0.61} \cdot \left(\frac{\rho_w}{\rho_b} \right)^{0.23}; \quad (9)$$

$$\text{Pr} = \left(\frac{c_p}{c_{pb}} \cdot \frac{\mu_w}{\lambda_w} \right); \quad (10)$$

$$c_p = \left(\frac{h_w - h_b}{T_w - T_B} \right); \quad (11)$$

Model Yamagata (1972)

$$Nu = 0.0135 \cdot \text{Re}_x^{0.85} \cdot \text{Pr}_x^{0.80} \cdot F_c \quad (12)$$

$$F_c = \begin{cases} 1; E \geq 1; \\ 0,67 \cdot P_{pc}^{-0.05} \cdot \left(\frac{c_p}{c_{pc}} \right)^{n_1}; 0 \leq E \leq 1; \\ \left(\frac{c_p}{c_{pc}} \right)^{n_2}; E \leq 0; \end{cases} \quad (13)$$

$$n_1 = -0,77 \cdot \left(1 + \frac{1}{\text{Pr}} \right) + 1,49; \quad (14)$$

$$n_2 = 1,44 \cdot \left(1 + \frac{1}{\text{Pr}} \right) - 0,53; \quad (15)$$

Model Karnoshchekov (1960)

$$Nu = Nu_0 \cdot \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.11} \cdot \left(\frac{k_b}{k_w} \right)^{-0.33} \cdot \left(\frac{c_p}{c_{pb}} \right)^{0.35}; \quad (16)$$

$$Nu_0 = \frac{\frac{\xi}{8} \cdot \text{Re}_b \cdot \text{Pr}}{12,7 \cdot \sqrt{\frac{\xi}{8} \cdot \left(\text{Pr}^{\frac{2}{3}} - 1 \right)} + 1,07}; \quad (17)$$

$$\xi = \frac{1}{(1,82 \cdot \log_{10} \cdot \text{Re}_b \cdot -1,64)^2}; \quad (18)$$

$$20 \cdot 10^3 < \text{Re}_b < 860 \cdot 10^3; 0,85^3 < \text{Pr} < 65;$$

$$0,90 < \frac{\mu_b}{\mu_w} < 3,60; 1,00 < \frac{k_b}{k_w} < 6,00;$$

$$0,07 < \frac{c_p}{c_{pb}} < 4,50;$$

Model Karnoshchekov (1967)

$$Nu = Nu_0 \cdot \left(\frac{\rho_w}{\rho_b} \right)^{0.3} \cdot \left(\frac{c_p}{c_p} \right)^n; \quad (19)$$

$$Nu_0 = \frac{\frac{\xi}{8} \cdot \text{Re}_b \cdot \text{Pr}}{12,7 \cdot \sqrt{\frac{\xi}{8} \cdot \left(\text{Pr}^{\frac{2}{3}} - 1 \right)} + 1,07}; \quad (20)$$

$$\xi = \frac{1}{(1,82 \cdot \log_{10} \cdot \text{Re}_b \cdot -1,64)^2}; \quad (21)$$

$$8 \cdot 10^4 < \text{Re}_b < 5 \cdot 10^5; 0,85 < \text{Pr} < 65;$$

$$0,09 < \frac{\rho_w}{\rho_b} < 1,00; 0,02 < \frac{c_p}{c_{pb}} < 4,00;$$

$$0,9 \leq \frac{T_w}{T_{pc}} \leq 2,5$$

$$n = \begin{cases} 0,4; \\ 0,22 + 0,18 \frac{T_w}{T_{pc}}; \\ n_1 + (5 \cdot n_1 - 2) \cdot \left(1 - \frac{T_b}{T_{pc}} \right); \end{cases};$$

ako je

$$\begin{cases} \frac{T_w}{T_{pc}} \leq 1 \text{ ili } \frac{T_b}{T_{pc}} \geq 1,2 \\ 1 \leq \frac{T_w}{T_{pc}} \leq 2,5; \\ 1 \leq \frac{T_b}{T_{pc}} \leq 1,2; \end{cases};$$

Model Jackson i Hall (1975)

$$Nu = 0.0183 \cdot \text{Re}_b^{0.82} \cdot \text{Pr}_b^{0.5} \cdot \left(\frac{c_p}{c_p} \right)^n \cdot \left(\frac{\rho_w}{\rho_b} \right)^{0.3}; \quad (22)$$

$$n = \begin{cases} 0,4; \\ 0,4 + 0,2 \left(\frac{T_w}{T_{pc}} - 1 \right) \\ 0,4 + 0,2 \left(\frac{T_w}{T_{pc}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 5 \left(\frac{T_b}{T_{pc}} - 1 \right) \right) \end{cases} ; \quad \text{ako je } \begin{cases} T_b < T_w < T_{pc} \text{ ili } T_{pc} < T_b < T_w \\ T_b < T_{pc} < T_w \\ T_{pc} < T_b < T_w \end{cases} ;$$

Model Pioro and Duffy (2007)

Pioro and Duffy su sumirali nekoliko modela razmjene topline u natkritičnom području i 2007. god dali jednu sveobuhvatnu koleraciju za računanje prenosa topline u natkritičnom području [7]. Karakteristike (*Nu*, *Re* i *Pr*) broja od *m*₁- *m*₇ dati su u tabeli 2

$$Nu = C_1 \cdot Re_x^{m_1} \cdot Pr_x^{m_2} \cdot \left(\frac{\rho_w}{\rho_b} \right)^{m_3} \cdot \left(\frac{\mu_w}{\mu_b} \right)^{m_4} \cdot \left(\frac{k_w}{k_b} \right)^{m_5} \cdot \left(\frac{c_p}{c_p} \right)^{m_6} \cdot \left[1 + C_2 \cdot \frac{D}{L} \right]^{m_7} ; \quad (23)$$

Tabela 2. Model Pioro and Duffy (2007)

| Model | Karakteristike Nu, Re i Pr | | | | | | |
|-----------------------|----------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | m ₁ | m ₂ | m ₃ | m ₄ | m ₅ | m ₆ | m ₇ |
| McAdams et al. 1950 | 0,8 | 0,33 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Bringer, Smith 1957 | 0,77 | 0,55 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Shitsman 1959, 1974 | 0,8 | 0,8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Krasnoshchekov, 1959 | 0,8 | 0,3 | 0 | 0,11 | 0,33 | 0,35 | 0 |
| Swenson et al. 1965 | 0,923 | 0,613 | 0,231 | 0,231 | 0 | 0 | 0 |
| Kondrat'ev 1969 | 0,8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Ornatsky et al. 1970 | 0,8 | 0,8 | 0,3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Ornatsky et al. 1972 | 0,8 | 0,40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Yamagata et al. 1972 | 0,85 | 0,8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Dyadyakin, Popov 1977 | 0,8 | 0,7 | 0,45 | 0,2 | 0 | 0 | 1 |
| Kirillov et al. 1990 | 0,8 | 0,33 | n ₁ | 0 | 0 | n ₂ | 0 |
| Gorban' et al. 1990 | 0,9 | 0,12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Model Jackson (2012)

Za definisanje pseudokritične oblasti i prenosa toplote prinudnom konvekcijom u pseudokritičnoj oblasti po modelu Jackson važe sljedeći obrasci [7]:

- temperatura zida ne prelazi pseudokritičnu vrijednost

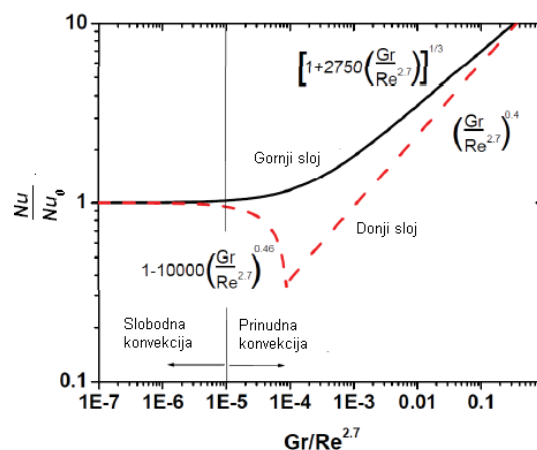
$$\frac{Gr_b}{Re_b^{2,7} \cdot Pr_b^{0,5}} < 10^{-5} ; \quad (24)$$

- temperatura zida prelazi pseudokritičnu vrijednost

$$\frac{Gr_b}{Re_b^{2,7}} < 10^{-5} ; \quad (25)$$

$$\frac{Nu}{Nu_0} = \left[1 \pm 10^5 \cdot \frac{Gr}{Re_x^m \cdot Pr_x^n} \cdot \left[\frac{N_b}{Nu_0} \right]^{-2} \right]^{0,46} \quad (26)$$

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_w - T_b) \cdot D^4}{\nu^2} \quad (27)$$



Slika 5 - Efekat provođenja toplote u pseudokritičnoj oblasti [7]

U jednačinama od (1) do (27) prisutne su sljedeće oznake:

$$Nu - \text{Nusseltov broj } \left[\frac{\alpha \cdot L}{\lambda} \right];$$

$$Pr - \text{Prandtlov broj} \left[\frac{\mu \cdot \bar{c}_p}{\lambda} \right];$$

$$Gr - \text{Grashofov broj} \left[\frac{g \cdot \beta \cdot (T_w - T_b) \cdot D^4}{\nu^2} \right];$$

$$Re - \text{Reynoldsov broj} \left[\frac{v \cdot L}{\nu} \right];$$

$$\bar{c}_p - \text{specifični toplotni kapacitet} \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right];$$

$$a - \text{koeficijent prelaza toplote} \left[\frac{kW}{m^2 \cdot K} \right];$$

$$\lambda - \text{koeficijent provodljivosti toplote} \left[\frac{W}{m \cdot K} \right];$$

$$\mu - \text{dinamička viskoznost fluida} \left[\frac{N \cdot s}{m^2} \right];$$

$$\beta - \text{koeficijent zapreminskog širenja} \left[\frac{1}{K} \right];$$

$$\tau - \text{gustina} \left[\frac{kg}{m^3} \right];$$

$$k - \text{termalni konduktivitet} \left[\frac{kW}{m \cdot K} \right];$$

T_b - srednja temperatura fluida [°C];

T_w - temperatura zida [°C];

T_{pc} - pseudo-kritična temperatura [°C];

D - prečnik cijevi [mm];

L - dužina cijevi [mm];

ν - brzina [m/s];

g - ubrzanje zemljine teže [m²/s];

$C=0,0026$ za vodu;

Nu_0 - lokalna vrijednost Nusseltovog broja;

ξ - frikcionni koeficijent Nusseltovog broja;

n_1, n_2 - koeficijenti Prandtlovog broja

4. ZAKLJUČAK

Od termoelektrana novije generacije zahtijeva se da pored povećanja stepena korisnosti imaju smanjenu emisiju polutanata kako bi došlo do optimalnog rješenja, kako sa tehničkog tako i sa ekonomskog gledišta. Jedan od načina za postizanje većeg stepena korisnosti je rad postrojenja pri super-kritičnim (SC) ili ultra-super-kritičnim parametrima pare (USC). Međutim, postizanje visokih parametara uslovljeno je ugradnjom novih materijala, koji imaju bolje osobine na visokim temperaturama i pritiscima, korišćenju

novih tehnologija zavarivanja i rješavanjem problema korozije.

Proces proizvodnje pare u oblasti nadkritičnih parametara, spada u grupu veoma osjetljivih područja razmjene toplote. U području parametara bliskim kritičnoj tački termofizičke veličine vode imaju skokovite promjene što u uslovima velikih toplotnih opterećenja dovodi do pogoršane razmjene toplote i pregrijavanja materijala cijevi.

Proučavanjem ovih procesa i na osnovu eksperimentalnih podataka utvrđeni su kriteriji za izbjegavanje pogoršane razmjene toplote u ovoj oblasti. Utvrđivanje tih kriterija proisteklo je iz razvijanja modela razmjene toplote u pseudokritičnoj oblasti od strane više naučnika. Njihovom primjenom ublažavaju se rizici od pregrijavanja materijala i loma cijevi koji su izraženi u zoni visokih specifičnih toplota.

LITERATURA

- [1] Pioro I. and Mokry S. *Thermophysical Properties at Critical and Supercritical Conditions*, University of Ontario Institute of Technology, pp 573-591, Canada, 2011.
- [2] S. Dumonjić-Milovanović, Z. N. Milovanović, J. Jakanović, J. Škundrić, *Uslovi razmjene toplote kod energetskih blokova sa nadkritičnim parametrima pare*, Energija, ekonomija, ekologija. Broj 1 Beograd, pp 154-162, 2011.
- [3] Hladki D, Ultra super kritične termoelektrane i te plomine kao primjer najmodernije tehnologije koja koristi ugljen kao energent, *Međunarodni kongres Dani inženjera strojarstva* 2013. Šibenik, Hrvatska, pp. 1-4, 20-25. maj 2013.
- [4] Cheng X, Shulenberg T, *Heat Transfer at Supercritical Pressures - Literature Review*, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe, 2001.
- [5] Belmiloudi A. *Heat transfer theoretical – analysis - experimental investigations – and - industrial systems/ thermophysical-properties-at critical-and supercritical* [Internet] - Dostupno na: <http://www.intechopen.com>
- [6] Anderson M. *Course on Science and Technology of International Atomic Energy Agency, Heat transfer to Supercritical Fluids SCWRs*, Trieste, Italy, 27 June - 1 July 2011.
- [7] J.D. Jackson, *Fluid flow and convective heat transfer to fluids at supercritical pressure Nuclear Engineering and Design* 264, University of Manchester, Manchester, UK pp 24-40, 2013.

SUMMARY**MODELS HEAT EXCHANGE IN THE THERMAL POWER STATION WITH ULTRA-SUPER-CRITICAL STEAM PARAMETERS**

Currently the world increasingly develop and build thermal power plant with supercritical steam parameters initial work. I like to plant with these parameters are characterized by a higher degree of usefulness of what I did one of the main reasons for their application. The evaporation process is carried out in pseudo-critical area, and when reaching the temperature of the pseudo-critical when starting a continuous transition of water from liquid to gas. This change is characterized by sudden confusing site thermophysical properties such as specific heat, density, dynamic viscosity, thermal conductivity others. The problem worsened exchange of heat is studied in the field of convective heat exchange and conditions from the similarity of temperature fields to flow with no internal source of heat between them established functional dependence called Nusselt criterion of similarity.

Key words: *supercritical fluid, pseudocritical line, ,heat transfer, Nusselt similarity criterion*