

TRANSPORT TOPLOTNE ENERGIJE U SUPERKRITIČNIM USLOVIMA

P. Vukoslavčević, U. Karadžić¹

SAŽETAK:

Po prvi put je testiran transfer toplote sa zagrijanog cilindra na okolni superkritični fluid. Ispitivanja su izvedena na Univerzitetu Crne Gore, na specijalnoj instalaciji na kojoj se može ostvariti strujanje superkritičnog ugljen-dioksida na različitim pritiscima i temperaturama; 0.15-2 m/s, 15-70 °C i 1-100 bar. Eksperimenti su izvedeni duž linije konstantnog pritiska od 80 bar, na temperaturama od 25 do 65 °C. Pokazalo se da relacija Nusseltovog i Reynoldsovog broja ima klasičan oblik u oblasti iznad pseudokritične tačke sa koeficijentima koji zavise od pritiska i temperature. Za razliku od klasičnih fluida, zavisnost ovih koeficijenata od Prandtlovog broja nije jedinstvena. Pokazalo se i da u oblasti ispod pseudokritične tačke proces karakteriše izrazita nestabilnost, što može izazvati nepredvidive posledice u generatorima sa superkritičnim fluidima. Imajući to u vidu, transfer toplote u ovoj oblasti se mora izbjeći u realnim uslovima. Pored testiranja numeričkih modela, dobijeni rezultati mogu poslužiti ne samo za kvantitativnu već i kvalitativnu analizu fenomena transfera toplote u uslovima izrazitih promjena karakteristika rashladnog fluida.

Ključne riječi: *superkritični fluidi, Nusseltov broj, transfer toplote*

1. UVOD

Globalno zagrijavanje i klimatske promjene su donijele nove poglede ne samo na alternativne izvore energije već i na nuklearnu energiju, koja uz sve mane ima i jednu prednost: ne proizvodi ugljen-dioksid koji se smatra glavnim krivcem za globalno zagrijavanje. Sve češće su prisutni stavovi da je izgradnja nuklearnih elektrana realan put za rješenje ovog problema. Imajući u vidu da u globalnom

¹ Prof. dr P. Vukoslavčević, Mašinski fakultet, Univerzitet Crne Gore, 81000 Podgorica.

energetskom bilansu nuklearna energija učestvuje sa manje od 10%, postavlja se pitanje da li se na nuklearnu energiju može gledati kao na alternativu postojećoj energetskoj situaciji. U svakom slučaju, izrazito negativno mišljenje o nuklearnoj energiji, prisutno u posljednje vrijeme, polako se mijenja. Imajući to u vidu, istraživačke aktivnosti se odvijaju širom svijeta u cilju razvoja Četvrte generacije nuklearnih reaktora koji bi bili konkurentni ostalim energetskim izvorima. U odnosu na prethodnu generaciju očekuje se veća pouzdanost, manja cijena proizvedene energije i manja količina nuklearnog otpada. Jedna od varijanti Četvrte generacije nuklearnih reaktora, od koje se očekuje ispunjavanje navedenih uslova, bazirana je na alternativnom prenosu energije od reaktora do turbine, upotrebom fluida na superkritičnim uslovima. To su superkritični vodeni reaktori (Supercritical Water Reactor – SCWR), koji za razliku od klasičnih reaktora treba da imaju jednostavniji radni ciklus, manje dimenzije i generišu veću specifičnu energiju.

Transfer toplote, odnosno hlađenje reaktora u ovakvim sistemima odvija se na pritiscima većim od kritičnog u oblasti koju karakterišu izrazite promjene fizičkih osobina rashladnog fluida. Danas se raspolaže sa relativno malo pouzdanih relacija kojima se definiše transport energije u ovakvim uslovima. Određeni eksperimentalni rezultati su dobijeni krajem pedesetih godina prošlog vijeka pri analizi mogućnosti primjene superkritičnih fluida u klasičnim termoelektranama. Petukhov (1970), Hall (1971) and Hall and Jackson (1978) su publikovali pregled transfera energije u ovim uslovima. Detaljan pregled literature iz ove oblasti, uz odgovarajuću analizu, dali su Cheng and Schulenberg (2001). Najnovija istraživanja se odvijaju kroz direktnu numeričku simulaciju ovih procesa, za čiju potvrdu su neophodne eksperimentalne provjere.

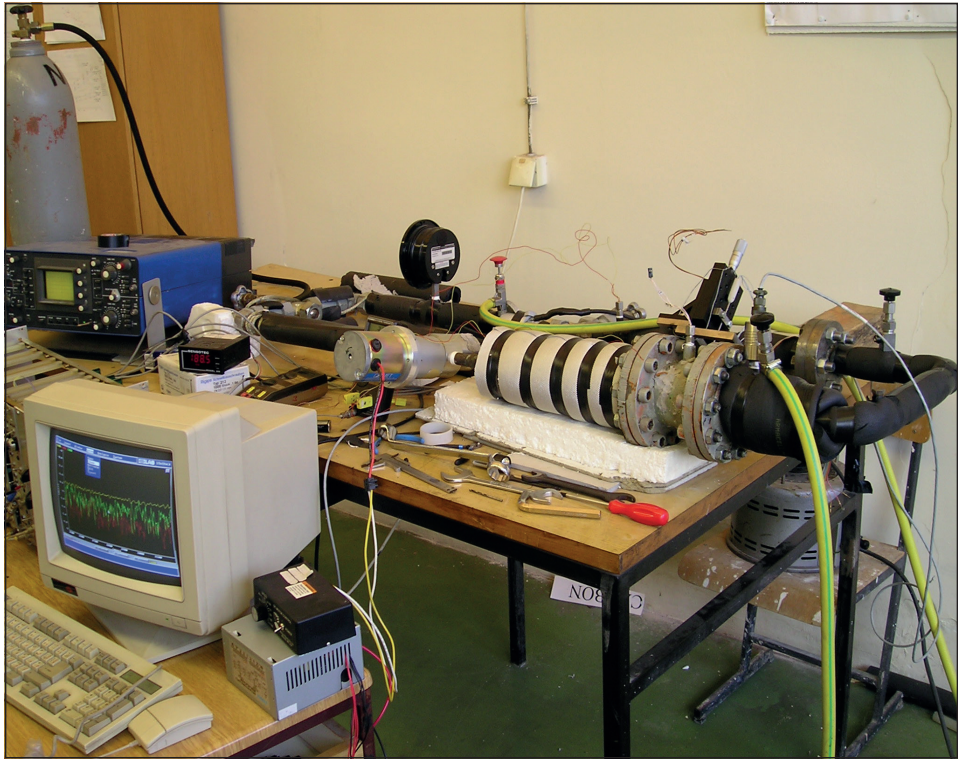
2. EKSPERIMENTALNA INSTALACIJA

Ekperimentalna instalacija za ispitivanje strujanja fluida u superkritičnim uslovima, sl. 1, konstruisana je na Univerzitetu Crne Gore.

Na ovoj instalaciji može se generisati uniformno strujno polje promjenljive brzine i temperature na pritiscima koji odgovaraju superkritičnoj oblasti. Brzina se može mijenjati pri konstantnom pritisku i temperaturi, na različitim pritiscima i temperaturama karakterističnim za superkritičnu oblast. Detaljan opis instalacije, sastavni dijelovi, mogućnost generisanja i kontrole strujnih polja, kao i pregled karakteristika superkritičnih fluida dati su u Radulović i Vukoslavčević (2007).

3. ANALIZA MEHANIZMA PRENOSA TOPLOTE

Instalacija prikazana na sl. 1 veoma je pogodna za analizu mehanizma transfera toplote sa kružnog cilindra na okolni superkritični fluid. Mada, sa praktične

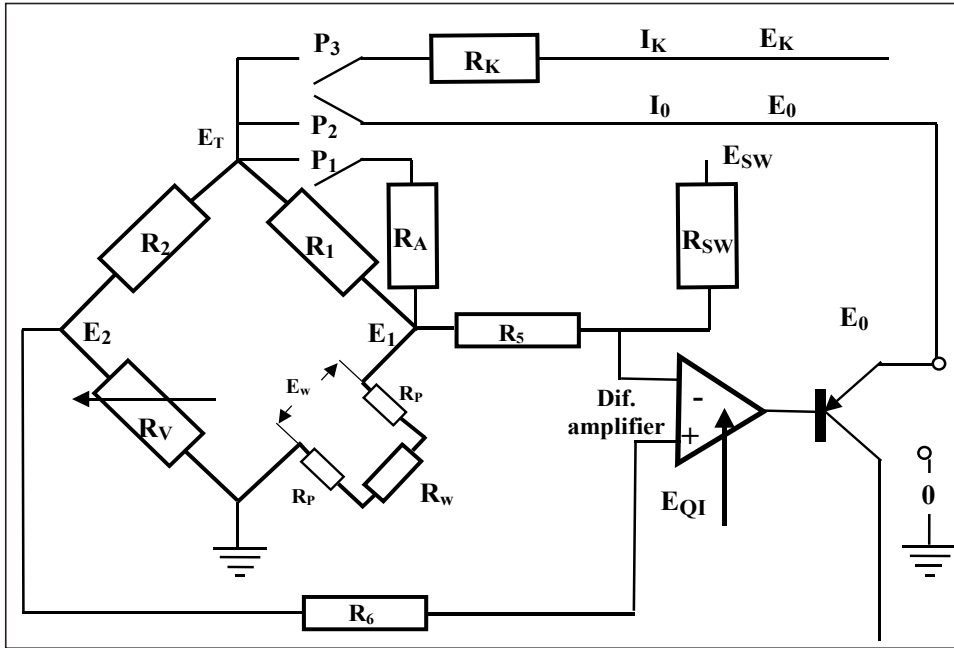


Sl. 1. Instalacija za ispitivanje strujnih parametara fluida u superkričnim uslovima

tačke gledišta, transfer toplote sa kružnog cilindra nije značajan kao npr. transfer toplote u kružnoj cijevi, izuzetno je pogodan za proučavanje mehanizma razmjene energije što, bez sumnje, može doprinijeti kvalitativnom razumijevanju fizike ovog procesa u složenijim geometrijskim uslovima. Kao kružni cilindri korišćeni su senzori sonde sa zagrijanim vlaknima napravljeni od legure platine, 90%, i rodijuma 10%. Ova legura ima odlične mehaničke, hemijske i termičke karakteristike, pogodne za ovakvu analizu. Izborom senzora različite dužine i prečnika, testiran je uticaj dimenzija cilindra na mehanizam prenosa toplote. Kao superkričan fluida korišćen je ugljen-dioksid, kod koga se superkrični uslovi mogu postići na mnogo nižim pritiscima i temperaturama u odnosu na vodu, što je od posebnog značaja kada je u pitanju bezbjednost instalacije i istraživača.

Temperatura cilindra se reguliše pomoću električnog kola u koje je povezan cilindar otpora R_w , sl. 2. Temperatura cilindra se može birati u granicama od 20°C do 500°C i održavati konstantnom pri promjenljivoj brzini strujanja superkričnog fluida. To se postiže otpornicima R_1 , R_A , potencimetrima P_1 i P_2 i diferencijalnim pojačivačem sa povratnom spregom.

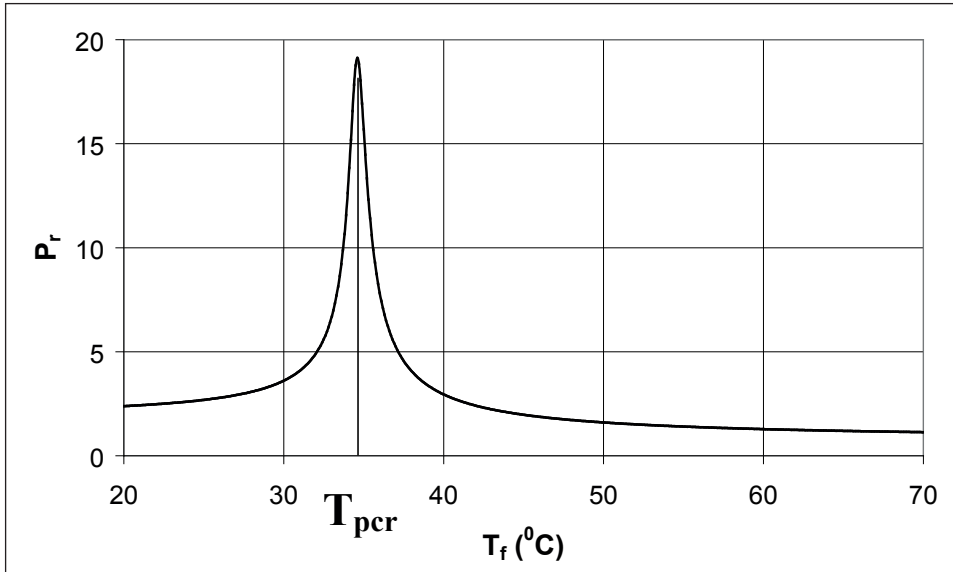
Ekperimenti su izvršeni duž linije konstantnog pritiska od $P=80^{\circ}$ bar, na različitim temperaturama od 20 do 65°C , sa korakom od 0.5 do 5°C . Ova temperaturna oblast koja odgovara okolini pseudokritične tačke ugljen-dioksida, pri pritisku od 80 bar, najinteresantnija je za proučavanje mehanizma prenosa toplote.



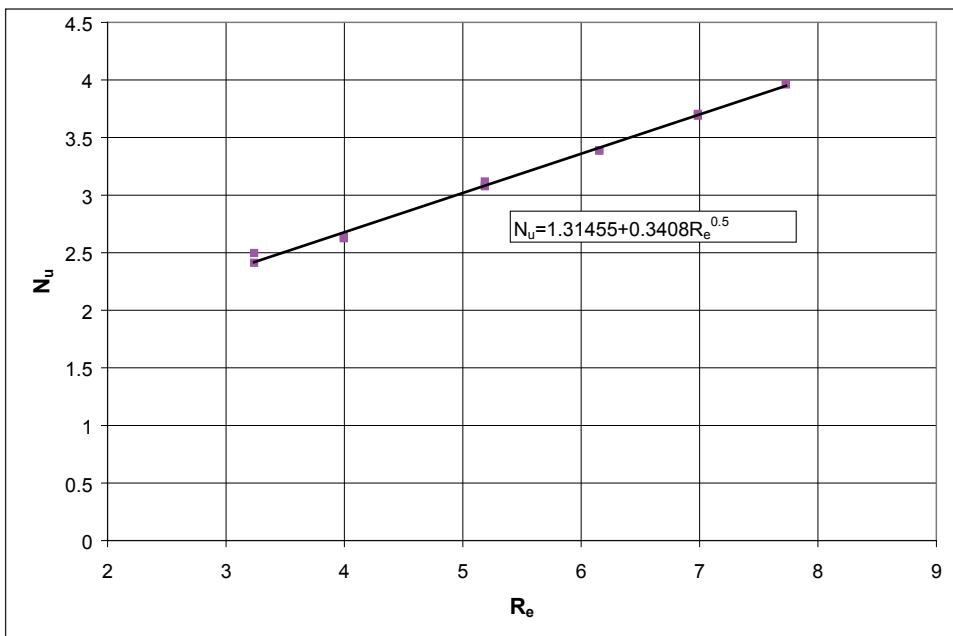
Sl. 2 Električno kolo sa Winstonovim mostom, diferencijalnim pojačivačem i povratnom spregom

Na svakom temperaturskom koraku brzina je mijenjana u granicama od 0.3 do 2 m/s. Dva cilindra istog prečnika $2.5\ \mu\text{m}$, različite dužine od 0.7 i 0.9 mm simultano su ispitivana. Na osnovu niza eksperimentalnih proba za navedeni opseg temperatura ugljen-dioksida utvrđena je optimalna temperatura cilindra od 86°C .

Svi parametri potrebni za određivanje Nusseltovog i Reznoldsovog broja, kao što su: brzina strujanja, fizičke karakteristike fluida i toplota generisana u cilindru i odvedena konvektivnim putem, mogu biti precizno mjereni. Jedan od ključnih parametara za ovakvu analizu je referentna temperatura na kojoj se određuju karakteristike fluida. Nema jedinstvenog prilaza izboru ove temperature. Veoma često se koristi temperatura filma, T_{film} , jednaka srednjoj temperaturi fluida i zida cilindra ili temperatura fluida beskonačno daleko od cilindra, T_{inf} . Imajući u vidu izrazitu zavisnost fizičkih karakteristika superkritičnog ugljen-dioksida od temperature, npr. Prandtlvog broja prikazanog na sl. 3, oba prilaza su testirana i analizirana.



Sl. 3 Zavisnost Prandtlovog broja od temperature u okolini pseudokritične tačke na pritisku od 80 bar

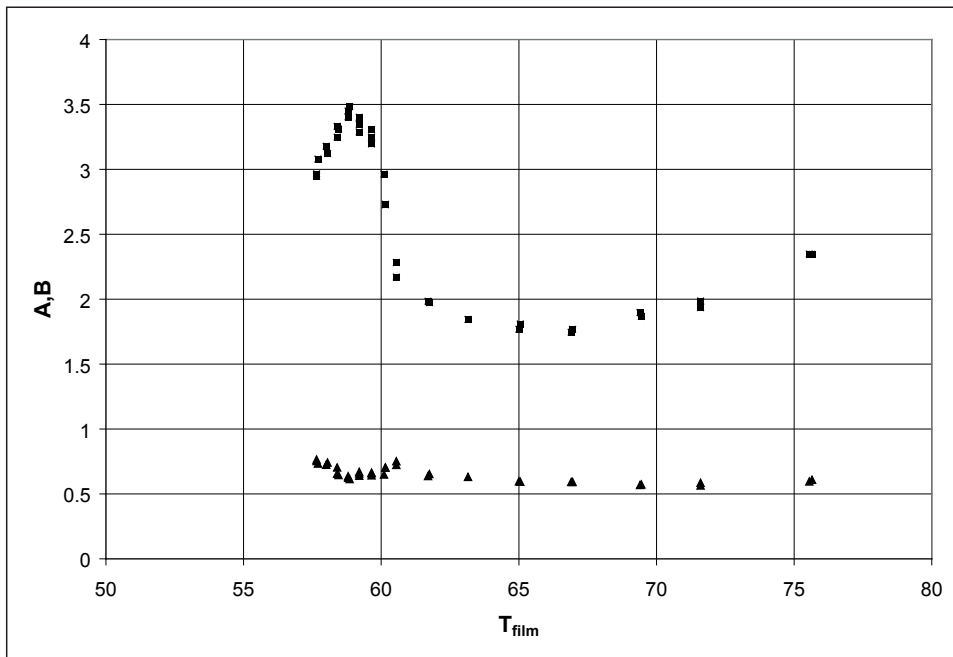


Sl. 4 Relacija $Nu = F(Re)$ za $T_{inf} = 35^{\circ}C$ i $T_c = 86^{\circ}C$, sa osobinama fluida određenim na T_{inf}

Relacija $Nu=F(Re)$, na temperaturi fluida $T_{inf}=35^{\circ}C$ i cilindra $T_c=86^{\circ}C$ je data na sl. 4. Osobine fluida su određene na temperaturi T_{inf} . Slični rezultati su dobijeni i za temperaturu filma T_{film} .

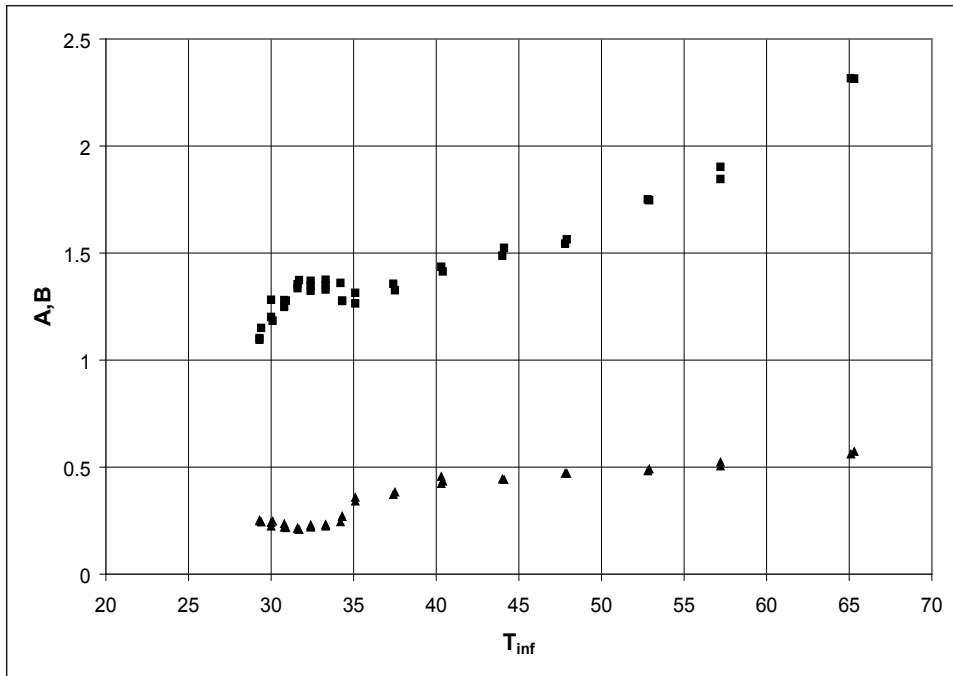
Relacija $Nu=F(Re)$ ima oblik $Nu = A + B Re^n$, karakterističan za najveći broj gasova i tečnosti pri strujanju oko kružnog cilindra. U svim ovim slučajevima parametri A i B su proporcionalni Prandtllovom broju na nekom stepenu m_1 i m_2 . Praktično su konstanti za mnoge gasove i široke opsege temperatura zbog slabe zavisnosti Prandtlvog broja od temperature. Imajući u vidu izrazitu zavisnost Prandtlvog broja od temperature za slučaj superkritičnog fluida, dalja analiza je fokusirana na zavisnost parametara A i B od Prandtlvog broja u pseudokritičnoj oblasti.

U cilju izbora najoptimalnije referentne temperature, zavisnost parametara A i B od temperature je testirana za dva slučaja. Na sl. 5 su prikazani rezultati za referentnu temperaturu jednaku temperaturi filma, T_{film} , dok su na sl. 6 dobijeni rezultati za referentnu temperaturu koja odgovara temperaturi dovoljno daleko od cilindra, T_{inf} .



Sl. 5 Zavisnost parametara A (■) i B (▲) od temperature za fizičke osobine fluida određene na temperaturi filma, T_{film}

Sa sl. 6 može se vidjeti da parametri A i B variraju sa temperaturom na sličan način kao i Prandtllov broj. U okolini pseudokritične tačke pojavljuje se mak-



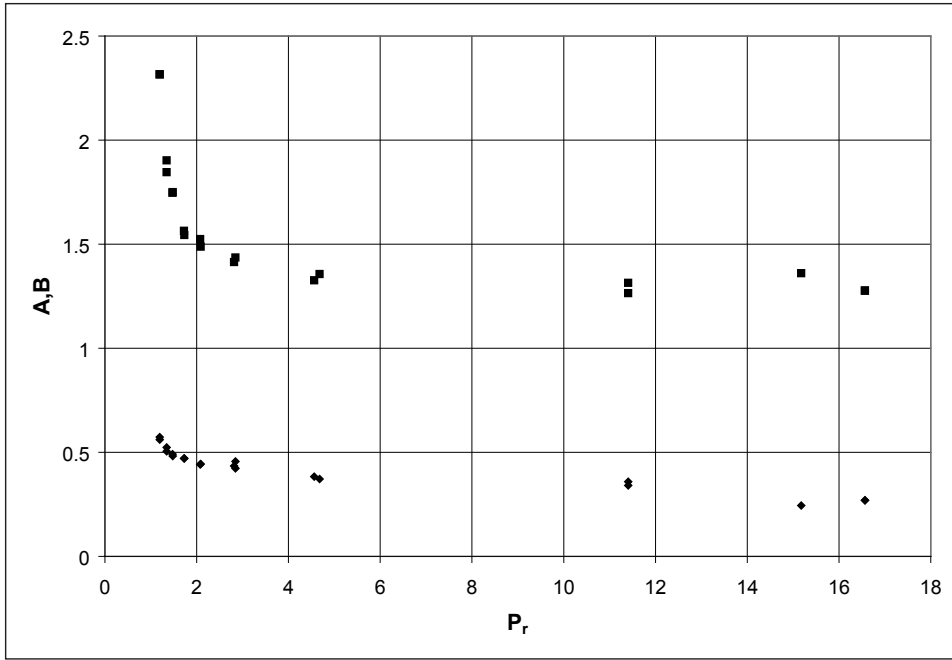
Sl. 6 Zavisnost parametara A (■) i B (▲) od temperature za fizičke osobine fluida određene na temperaturi, T_{inf}

simum, dok je promjena iznad ove tačke blago izražena. To, međutim, nije slučaj ako se osobine odrede za temperaturu filma, T_{film} , kao što se može vidjeti na sl. 5. Parametar A ima minimum oko 67°C , iako Prandtlov broj nema ekstrema u ovoj oblasti. Imajući to u vidu, najpovoljnija temperatura za određivanje fizičkih karakteristika superkritičnog fluida je temperatura dovoljno daleko od cilindra.

Takođe je jasno da na osnovu zavisnosti Prandtlovog broja od temperature, prikazanog na sl. 3, jedinstvenu zavisnost parametara A i B od Prandtlovog broja nije moguće definisati za oblast ispod i iznad pseudokritične tačke. To znači da odvojene zavisnosti moraju biti definisane za svaku oblast.

Zavisnost parametara A i B od Prandtlovog broja u oblasti iznad pseudokritične tačke je prikazana na sl. 7.

Nasuprot dobro poznatim relacijama za fluide na normalnim uslovima, oba parametra opadaju sa porastom Prandtlovog broja, naročito parametar A. Očigledno je da konvencionalne forme zavisnosti $A = C_1 P_r^{n_1}$ i $B = C_2 P_r^{n_2}$ ne mogu biti primijenjene u ovom slučaju. Odgovarajuća relacija se može dobiti na osnovu rezultata prikazanih na sl. 7. Treba istaći da su ovo preliminarni rezultati i da su istraživanja u toku.



Sl. 7 Zavisnost parametara A (■) i B (▲) od Prandtl-ovog broja iznad pseudokritične tačke

4. ZAKLJUČAK

Na osnovu izloženih rezultata može se zaključiti:

– Relacija Nusseltovog i Reynoldsovog broja u superkritičnoj oblasti, na datom pritisku i temperaturi, ista je kao i za fluide na normalnim uslovima

$$N_u = A + B \cdot e^n$$

– Nasuprot normalnim uslovima, varijacija parametara M i N u funkciji Prandtl-ovog broja nije jedinstvena za oblast ispod i iznad pseudokritične tačke.

– Najpogodnija temperatura za evaluaciju fizičkih karakteristika fluida u superkritičnim uslovima je temperatura dovoljno daleko od cilindra.

– Konvencionalna zavisnost parametara A i B od Prandtl-ovog broja nije primjenljiva u superkritičnoj oblasti.

5. LITERATURA

- [1] Cheng X., Schulenberg T. (2001) *Heat Transfer at the Supercritical Pressures-Literature*
- [2] *Review and Application to an HPLWR*, Institut für Kern und Energietechnik Programm Nukleare Sicherheitsforschung, Karlsruhe.
- [3] Hall, W. B. (1971) *Heat transfer near the critical point*. Advance Heat Transfer, 7, New York: Academic Press.
- [4] Hall, W. B. and Jackson, J. D. (1978) *Heat transfer near critical point*, Keynote lecture, 6 th International heat Transfer Conference, Toronto.
- [5] Petukhov, B. S. (1970) *Heat transfer and friction in turbulent pipe flow with variable physical properties*, Advance Heat Transfer, 6, New York: Academic Press.
- [6] Radulović, I. Vukoslavčević, P. (2007), *Kalibracija anemometarskih sondi sa zagrijanim vlaknima u superkritičnim uslovima*. CANU, Glasnik odjeljenja prirodnih nauka, (rad u štampi)

HEAT TRANSFER MECHANISM IN SUPERCRITICAL CONDITION

ABSTRACT:

The analysis of heat transfer mechanism around a circular cylinder in supercritical fluid is tested for the first time. The analysis is performed at the University of Montenegro on a special, closed flow loop, capable of inducing variable speed flow at different pressure and temperature in the range of 0.15-2 m/s, 15-70 °C and 1-100 bar. The experiment has been performed along a line of constant 80 bar pressure in the temperature range of 25-65⁰C. It has been found that at a given pressure and temperature the relation of Nusselt and Reynolds numbers has a classical form above pseudocritical point, with parameters being functions of pressure and temperature. Below pseudocritical point the heat transfer mechanism is unstable what can cause unwanted consequence in supercritical generators. Having that in mind, heat transfer mechanism in this region should be avoided. Besides the testing of various numerical models, the obtained results can be used for both, qualitative and quantitative analysis of heat transfer mechanism in a case of strong property variations.

Key words: *supercritical fluid, Nusselt, heat transfer*

