

ЦРНОГОРСКА АКАДЕМИЈА НАУКА И УМЈЕТНОСТИ
ГЛАСНИК ОДЈЕЉЕЊА ПРИРОДНИХ НАУКА, 17, 2007.

ЧЕРНОГОРСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК И ИСКУССТВ
ГЛАСНИК ОТДЕЛЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК, 17, 2007

THE MONTENEGRIN ACADEMY OF SCIENCES AND ARTS
GLASNIK OF THE SECTION OF NATURAL SCIENCES, 17, 2007.

UDK 533.6.089.6

Ivana M. Radulović, Petar V. Vukoslavčević¹

KALIBRACIJA ANEMOMETARSKIH SONDI SA ZAGRIJANIM VLAKNIMA U SUPERKRITIČNIM USLOVIMA

Izvod

U radu je prikazana instalacija za kalibraciju i testiranje zagrejanih vlakana u struji ugljen dioksida na uslovima iznad kritičnih vrednosti pritiska i temperature. Po prvi put je izvršeno njihovo testiranje na superkritičnim uslovima. Promene radnih parametara, pritiska i temperature, u superkritičnoj oblasti, naročito u blizini pseudo-kritičnih tačaka, su praćene naglim i velikim promenama termo-fizičkih i transportnih karakteristika koje izrazito utiču na vrednosti kalibracionih konstanti. Promenljivo brzinsko polje je obezbeđeno mikro pumpom sa posebnim uređajem za promenu broja obrtaja motora. Za merenje brzine strujanja konstruisana je sonda sa dva zagrejana vlakna i po prvi put je dokazana mogućnost primjene King-ovog zakona hlađenja na konstantnom pritisku i temperaturi u superkritičnoj oblasti. Dat je opis ponašanja vlakana u superkritičnim uslovima kao i prikaz izvođenja procesa kalibracije na konstantnom pritisku i različitim temperaturama.

¹ Mašinski fakultet, Univerzitet Crne Gore, 81000 Podgorica, Crna Gora

HOT-WIRE PROBE CALIBRATION IN SUPERCRITICAL CONDITIONS

Abstract

The flow loop for calibration and testing of hot-wires in carbon dioxide flow at the supercritical state condition has been presented. The testing of the hot-wire anemometry has been done at this condition for the first time. The pressure and temperature variation have significant influence on the transport and thermal properties, particularly in the vicinity of the pseudo-critical points, affecting strongly the calibration's parameters. The variable velocity field was obtained by special micro pump with speed variator. The two sensors probe, for velocity measurements, has been designed and constructed. The possibility of King's cooling law applications has been presented at the constant pressure and temperature in the supercritical region, as well as the description of the calibration procedure at constant pressure and different temperatures.

1. Uvod

Istraživanja poslednje generacije nuklearnih reaktora, a posebno reaktora koji kao rashladni fluid koriste vodu na superkričnim uslovima ("Supercritical Water Reactor" – SCWR), su postala aktuelna širom sveta. SCWR reaktori su po svojoj konstrukciji i operativnosti napredniji, ekonomičniji, bezbedniji, imaju bolju performansu, efikasniji su, pouzdaniji, proizvode smanjenu količinu otpadnog materijala i imaju poboljšanu otpornost na poliferaciju u odnosu na postojeće lakovodne nuklearne reaktore: reaktore hlađene vodom pod pritiskom i ključalom vodom. Voda se u superkričnoj oblasti nalazi na pritiscima i temperaturama iznad kritičnih vrednosti za vodu; $p_c = 221$ bar i $T_c = 374^\circ\text{C}$. Njenim korišćenjem u nuklearnim sistemima veća će količina toplote, dobijene procesom fisije, biti pretvorena u električnu energiju. Osim toga, izbegavanjem faznog prelaza, smanjuju se troškovi za elemente u kojima se obezbeđuje fazni prelaz.

Ključni problem i nepoznanica pri ispitivanju ponašanja rashladnog fluida na superkričnim uslovima je njegov uticaj na dinamiku procesa u nuklearnim reaktorima, koji se pre svega odnosi na određivanje koeficijenta prelaza toplote sa struje fluida na zid elementa u jezgru reaktora, kroz koji on protiče. Pošto koeficijent prelaza toplote zavisi od režima

strujanja i karakteristika radnog fluida, analiza njegove promene u graničnom sloju na zidu elementa jezgra reaktora je izuzetno složena.

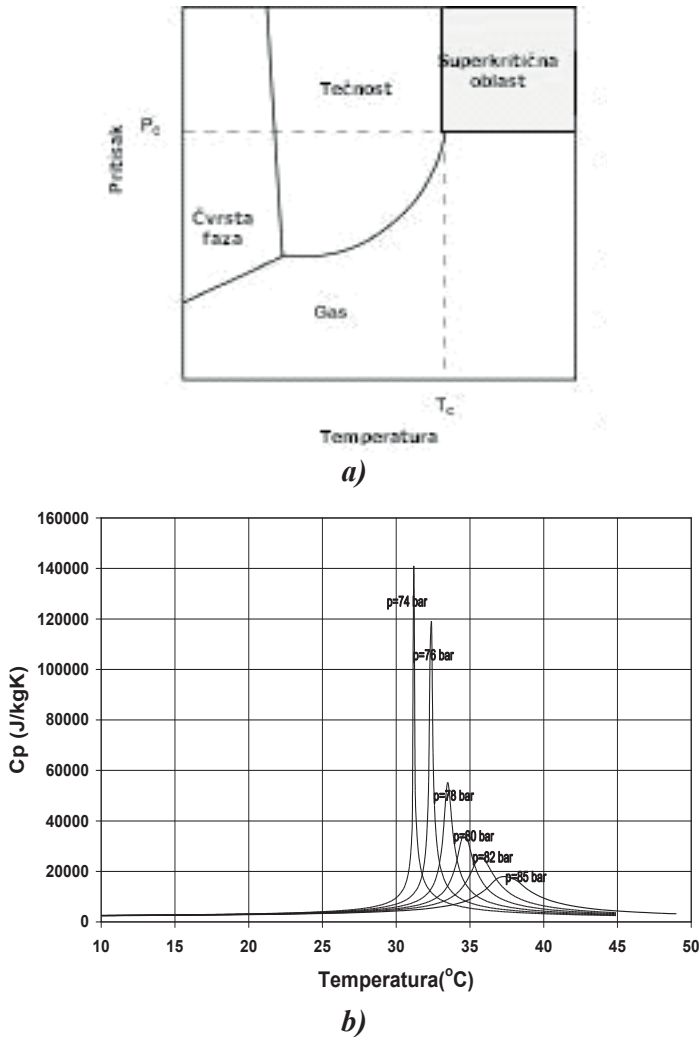
Vrlo je teško obezbediti eksperimentalne uslove u superkričnoj oblasti u kojima bi se kao radni fluid koristila voda, pre svega zbog visokog pritiska i temperature. Dinamičko ponašanje različitih fluida na superkričnim uslovima je slično. Iz tog razloga je za eksperimentalna proučavanja razmene toplote, od svih fluida, najpogodniji ugljen dioksid jer se njegova kritična tačka nalazi na pritisku 73.835 bar i temperaturi 31.06°C. Eksperimentalni podaci dobijeni u radu sa ugljen dioksidom mogu se, teorijom sličnosti, ekstrapolirati na vodu.

U ovom radu je prezentirana instalacija za kalibraciju i testiranje sondi sa zagrijanim vlaknima, odnosno senzorima, za simultano merenje brzine i temperature u superkričnim uslovima. Rezultati istraživanja, obuhvaćeni ovim radom, treba da pokažu da li je moguće koristiti anemometar sa zagrejanim vlaknima za merenje brzine strujanja superkričnog fluida.

Do sada se još uvijek nije vršilo ispitivanje ponašanja sonde sa zagrejanim vlaknima na pritiscima različitim od atmosferskog. Ponašanje senzora u struji tečnog i superkričnog ugljen dioksida, predstavlja potpunu nepoznanicu, imajući u vidu uticaj vrlo intenzivnih promena termodinamičkih i transportnih karakteristika fluida na odziv zagrejanog vlakna, problem električne provodljivosti ugljen dioksida i sl.

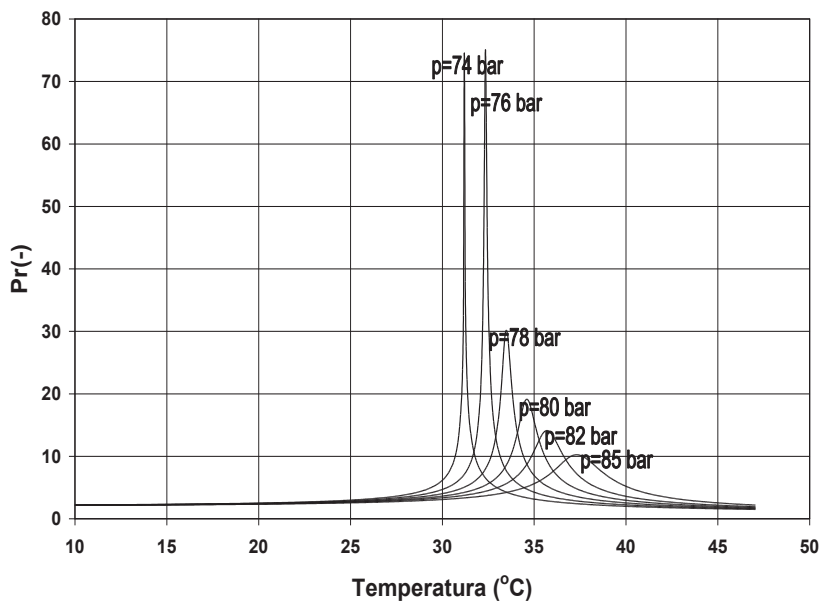
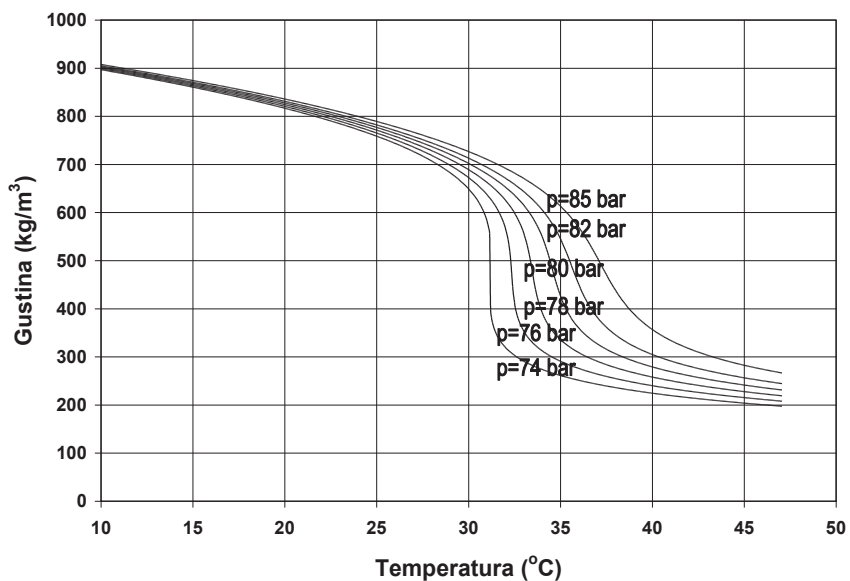
2. Karakteristike superkričnog ugljen dioksida

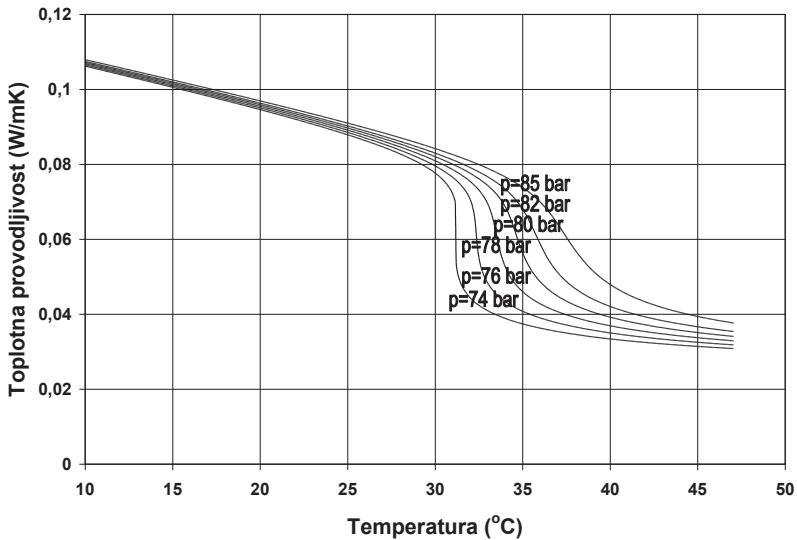
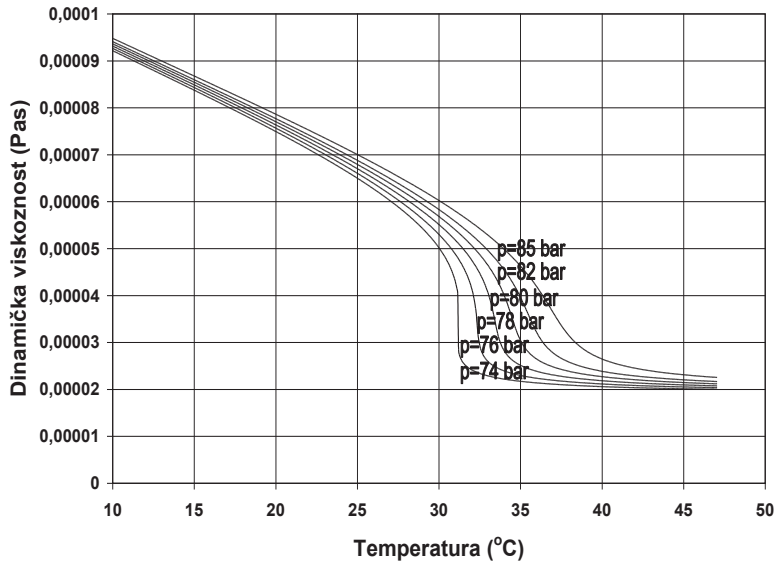
Superkričan ugljen dioksid predstavlja fluid koji se nalazi na pritisku i temperaturi iznad njihovih kritičnih vrednosti. Već u prvim istraživanjima uočeno je da su karakteristike fluida na superkričnim uslovima, izrazito promenljive, pri vrlo malim promenama pritiska i temperature [2]. Na slici 2.1. a) prikazan je fazni dijagram realnog fluida, a na sl.2.1(b), promjena specifične toplote u funkciji pritiska i temperature.



Slika 2.1. a) Fazni dijagram superkričnog fluida; b) promena specifičnog toplotnog kapaciteta na konstantnom pritisku i različitim temepearaturama u superkričnoj oblasti

Na slici 2.2. prikazana je promena karakteristika ugljen dioksida u superkričnoj oblasti na konstantnim pritiscima i različitim temperaturama.





Slika 2.2. Promene karakteristika ugljen dioksida na konstantnom pritisku i različitim temperaturama

Oblast iznad kritičnih vrednosti pritiska i temperature, sl.2.1(a), naziva se superkritična oblast, a fluid u tom stanju superkritični fluid. Zagrevanjem tečnosti u zatvorenom sistemu, ona ekspandira a para iznad

nje postaje sve gušća zbog isparavanja. Ako se zagrevanje sistema nastavi moguće je doći u tačku gde su gustine parne i tečne faze iste. U toj tački fluid postaje superkritičan. U superkritičnoj oblasti postoji samo jedna, homogena faza fluida koji poseduje istovremeno osobine i gasa i tečnosti.

Kritična tačka predstavlja tačku gde se specifični toplotni kapaciteti tečne i parne faze izjednačavaju, odnosno tačku gde se spajaju linije zasićenja parne i tečne faze. Iznad spomenute tačke se ne može više uočiti fazno razdvajanje, koje je posledica kompresije pare ili ekspanzije tečnosti. U istom, p-v dijagramu, uočava se mnogo manji nagib izoterme u superkritičnoj oblasti u odnosu na nagib izoterme van te oblasti. To znači da male promene pritiska izazivaju velike promene specifične zapremine, odnosno povećanje kompresibilnosti fluida.

Kritična izoterma u p-v dijagramu dodiruje linije zasićenja obe faze u kritičnoj tački. Kritična tačka realnog fluida se može definisati sledećim jednačinama [1]:

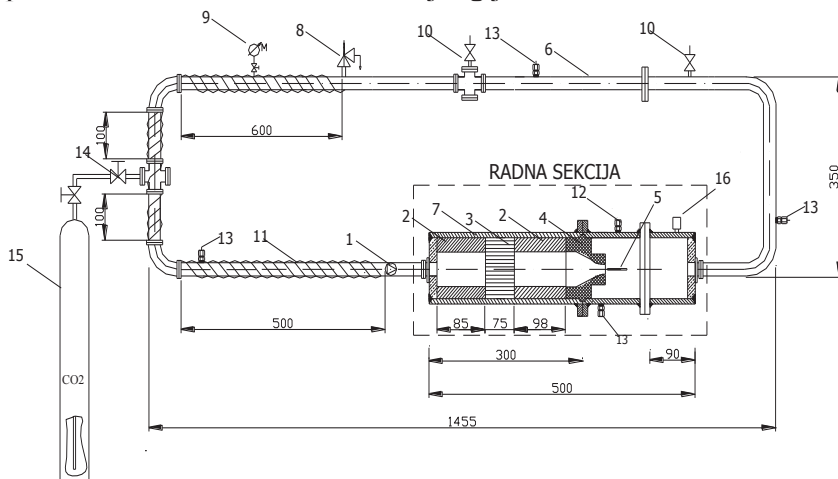
$$\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right) = 0, \quad \left(\frac{\partial^2 p}{\partial v^2}\right) = 0, \quad (2.1)$$

gde p i v predstavljaju promene pritiska i specifične zapremine duž kritične izoterme. Na superkritičnim uslovima fluidi imaju velike gustine i visoku sposobnost rastvaranja, što karakteriše tečnosti, i ujedno visoku difuzivnost, koja je karakteristična za gasove. Razmena mase na ovim uslovima se odvija relativno brzo, zbog velikog koeficijenta difuzije i male viskoznosti. Isto važi i za razmenu toplote, zbog visokih gustina i vrednosti specifičnog toplotnog kapaciteta.

Sve karakteristike fluida (gustina, viskoznost, koeficijent difuzije, specifični toplotni kapacitet, koeficijent toplotne provodljivosti) zavise u velikoj meri od pritiska i temperature. Njihove promene su mnogo izraženije u okolini kritične tačke i pseudo-kritičnih tačaka (tačke u kojoj specifični toplotni kapacitet dostiže svoj maksimum na različitim pritiscima u superkritičnoj oblasti), gde su uočene velike fluktuacije spomenutih karakteristika fluida, pri malim promenama pritiska i temperature. Iste fluktuacije vrlo brzo nestaju pošto temperatura poraste iznad kritične vrednosti [6]. Vrlo je bitno uočiti pojavu izrazitih promena specifičnog toplotnog kapaciteta fluida u ovoj oblasti, čija vrednost u samoj kritičnoj tački dostiže svoj maksimum, koji je čak nekoliko desetina puta veći nego isti na normalnim uslovima, sl.2.1 (b).

3. Kalibraciona instalacija

Prvo idejno rešenje instalacije na osnovu kojeg je konstruisana postojeća verzija predstavljeno je na slici 3.1. Ovakva konstrukcija dobijena je na osnovu činjenice da utrošena sredstva za izradu instalacije treba da budu što manja zbog nepoznanice da li zagrejano vlakno može uopšte dati funkcionalan odziv u struji ugljen dioksida.



Slika 3.1. Šema instalacije za kalibraciju sonde sa zagrejanim vlaknima u struji ugljen dioksida

1 - pumpa; 2 - aluminijumska čaura; 3 - saće; 4 - mlaznik; 5 - sonda; 6 - cev DN20 ($\varnothing 25 \times 3.2 \text{ mm}$); 7 - cev DN80 ($\varnothing 94 \times 7.1 \text{ mm}$); 8 - ventil sigurnosti; 9 - manometar; 10 - ventil za odzraku; 11 - grejač; 12 - zaptivni priključci za žice sonde; 13 - zaptivni priključci za žice termoparova; 14 - ventil za punjenje; 15 - boca ugljen dioksida; 16 - senzor za pritisak; (Izolacioni sloj nije prikazan)

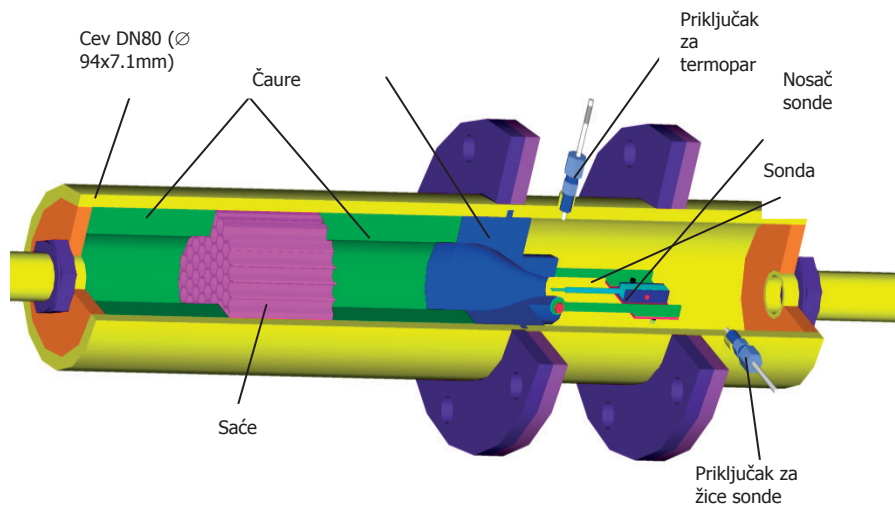
Imajući to u vidu, kao i zbog korišćenja manje količine ugljen dioksida, napravljena je kraća radna sekcija, u obliku malog tunela, u kojoj je postavljen mlaznik, saće i sonda sa svojim nosačem. Predviđene su i minimalne dimenzije povratnog voda, da bi se minimizirale promjena pritiska u radnoj sekciji pri promeni brzine strujanja fluida. U instalaciji je obezbeđena recirkulacija ugljen dioksida pumpom odgovarajućih karakteristika i definisanim maksimalnim protokom, na osnovu kog je projektovan mlaznik određenog ulaznog i izlaznog prečnika. Pored radne i kružne sekcije, mlaznika, pumpe i saća instalaciju čine i elektromotor, prirubnički spojevi, aluminijumske čaure, ventil sigurnosti, ventili za punjenje i odzraku, manometar, senzor za pritisak, specijalni zaptivni

priključci za žice sonde i termoparove. Svi nabrojani elementi su neophodni da bi se izveo postupak kalibracije.

3.1. Radna sekcija

Zadatak radne sekcije je da obezbedi uniformno strujno polje promenljive brzine i temperature na pritiscima koji odgovaraju superkritičnoj oblasti. Postoji relativno veliki broj rešenja ovog problema, koja se odnose na vazduh [3] ili vodu [7], ali na atmosferskom pritisku i sobnoj temperaturi. Pored toga, postoje i rešenja za strujno polje vazduha na promenljivoj temperaturi i atmosferskom pritisku. Međutim, do sada, još nema iskustava koje se odnosi na mjerenje strujnih polja promenljive brzine i temperature na različitim radnim pritiscima.

Imajući to u vidu, radna sekcija treba da omogući simulaciju najsloženijih strujnih uslova odnosno promenu brzine fluida pri konstantnom pritisku i temperaturi na različitim temperaturama i pritiscima, karakterističnim za superkritičnu oblast. Na slici 3.2 predstavljena je radna sekcija u CAD 3D formatu.



Slika 3.2. Radna sekcija sa odgovarajućim elementima

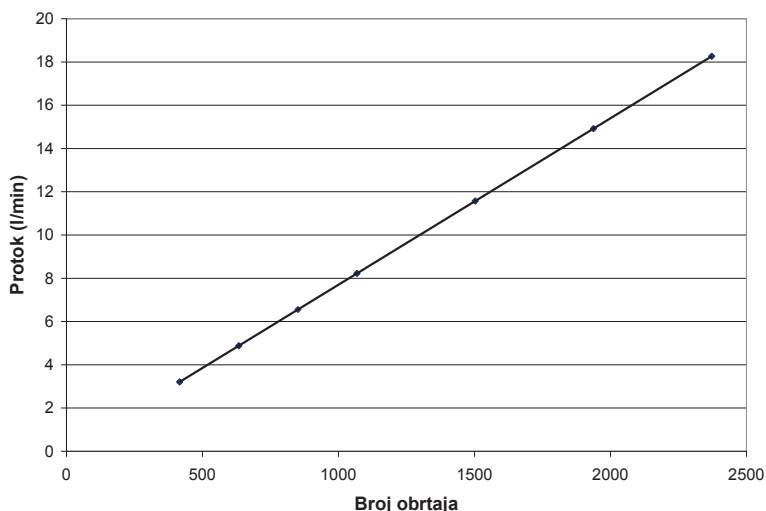
Radna sekcija je izrađena od čelične cevi dimenzija DN80 ($\text{Ø } 94.2 \times 7.1 \text{ mm}$) i dužine 500 mm. Cev je izdeljena u tri dela i spojena prirubničkim spojevima. U prvom, najdužem delu (300mm) radne sekcije

smeštene su dve aluminijske čaure i saće. Na prelazu između prvog i drugog dela, između prirubničkog spoja smešten je mlaznik. U drugom delu je smešten nosač sonde, prikačen na mlaznik. Drugi prirubnički spoj je postavljen da bi se mogla rastavljati instalacija u slučaju zamene senzora. Prečnik radne sekcije je veći od izlaznog prečnika mlaznika zbog mehanizma za pomeranje sonde koji nije prikazan u ovoj verziji instalacije.

Ključni element instalacije predstavlja zupčasta pumpa. Može da izdrži radne pritiske do 103 bar i ostvariti pad pritiska do 8 bar. Magnetni par obezbeđuje pogon pumpe preko magnetnog prenosa između pogonskog magneta, postavljenog na vratilo motora i vođenog magneta koji je potpuno zaptiven u telu pumpe i povezan vratilom sa zupčastim parom. Pogonski magnet pokreće gonjeni magnet i zupčasti par bez direktnog kontakta.

Zupčasti par čine zupčanici sa zubcima helikoidnog oblika, koji obezbeđuju uravnotežen rad, bez pulzacija. U tehničkoj specifikaciji pumpe dat je podatak o količini tečnosti koja prolazi kroz pumpu po jednom obrtu zupčastog para, tako da se merenjem broja obrtaja motora, može znati vrednost protoka fluida kroz pumpu za posmatrani broj obrtaja i izbeći upotreba merača protoka u instalaciji. Promena broja obrtaja u instalaciji obezbeđena je upotrebom varijatora broja obrtaja, koji je priključen na elektromotor na čijoj je osovini postavljen pogonski magnet. Maksimalni protok koji pumpa može da ostvari pri 3000 obrtaja u minuti je 21 l/min. Ovaj protok obezbeđuje maksimalnu brzinu od 2 m/s u kružnom poprečnom preseku prečnika 15 mm, koji je dovoljan za smeštaj sonde i termopara za merenje temperature. Smanjenjem broja obrtaja do radnog minimuma od 200 obrtaja/min, može se postići brzina od 0.15 m/s. Na taj način variranjem broja obrtaja pumpe brzina strujanja ugljen dioksida se može menjati u opsegu od 0.15 - 2 m/s, što odgovara potrebnim eksperimentalnim uslovima.

Kao što je već rečeno promena broj obrtaja motora se vrši posebnim uređajem, varijatorom snage motora. Skala na varijatoru je procentualna, a merenjem broja obrtaja stroboskopom, dobijena je zavisnost protoka od broja obrtaja motora pumpe i prikazana je na slici 3.3.



Slika 3.3. Zavisnost zapreminskog protoka od broja obrtaja motora

U tehničkoj specifikaciji pumpe data je vrednost količine fluida koja prolazi kroz pumpu po jednom njenom obrtu i iznosi 7.7 ml/obrtaju. Na osnovu ove vrednosti dobija se zapreminski protok fluida za dati broj obrtaja prema izrazu:

$$\dot{V} = \frac{\text{br.obrtaja}}{\text{min}} \cdot \frac{7.7}{1000} \left[\frac{\text{l}}{\text{min}} \right] \quad (3.1)$$

Postupak kalibracije zagrejanih vlakana nemoguće je izvršiti bez postojanja mlaznika odgovarajućeg profila, kojim se obezbeđuju potrebne karakteristike fluidnog toka. Izlazni prečnik mlaznika treba da bude što manji kako bi se ostvarila maksimalna brzina pri minimalnom protoku. Sa druge strane, poprečni presek na izlazu iz mlaznika treba da bude dovoljno veliki da bi se ispred njega mogao postaviti nosač sa zagrijanim vlaknima.

Geometrija mlaznika, odnosno oblik njegove kontrakcije, utiče na uniformnost središnjeg toka i na turbulenciju. Fluidna struja prolazi prvo kroz saće, usled čega se u velikoj meri suzbija vrtložnost, dok se dalje opet umereno pojačava do ulaska u mlaznik. Samim prolaskom kroz saće smanjuje se nivo turbulencije, ali ne potpuno. Saće, samo po sebi,

stvara nešto turbulentnog strujanja čiji su vrtlozi reda veličine prečnika ćelije.

Hussain i Ramjee su ispitivali efekat kontrakcije na nekompresibilno turbulentno strujanje [4]. Eksperiment se sastojao u ispitivanju četiri tipa mlaznica: 1) kubični mlaznik, 2) mlaznik Batchelor-Shaw-a, 3) ASME serija mlaznika sa niskim β i 4) ASME serija mlaznika sa visokim β . Sva četiri tipa mlaznika su imali isti geometrijski koeficijent kontrakcije, ali različiti oblik kontrakcije. Nakon urađenih detaljnih ispitivanja zaključeno je da najpogodnije karakteristike ima kubična mlaznica u smislu uniformnosti središnje struje i fluktuacija brzine na izlazu iz mlaznika. Ovaj mlaznik ima najmanje ulazno zakrivljenje i zbog toga najmanji gradijent pritiska. Osim toga ima i najmanju debljinu turbulentnog graničnog sloja i najmanji intezitet turbulencije u graničnom sloju.

Jednačina konture mlaznika data je kubičnim polinomom[3]:

$$R(x) = 25 - 0.021 \cdot x^2 + 0.00028 \cdot x^3 [mm], \quad (3.2)$$

Da bi se strujni tok prilagodio većem otvoru mlaznika i da bi se smanjio prostor, u kome se stvaraju vrtložne struje, na prelasku povratne sekcije u radnu ispred i iza saća postavljene su dve aluminijumske čaure, unutrašnjeg prečnika $d_{\text{ual}}=50\text{mm}$ i spoljašnjeg prečnika $d_{\text{sai}}=80\text{mm}$. Sonda sa zagrejanim vlaknima postavljena je na nosač koji je pričvršćen za mlaznik na njegovim bočnim stranama, tako da se ose senzora poklapaju sa osama izlaznog preseka mlaznika.

3.2. Povratni vod i ostali delovi instalacije

Kružni tok ugljen dioksida u instalaciji je ostvaren kroz povratni vod, izrađen od čeličnih cevi dimenzija DN20 ($\text{Ø}25 \times 3.2 \text{ mm}$). Ove dimenzije odgovaraju ulaznom i izlaznom priključku na pumpi, čime se izbegla upotreba dodatnih redukcija. Delovi povratnog cevovoda su spojeni kolenima i T-račvama. Na njemu su postavljeni manometar, ventil sigurnosti i ventil za odzraku, kao i ventil za punjenje instalacije ugljen dioksidom (slika 3.1).

Merenje radnih parametara strujnog toka ugljen dioksida, pritiska i temperature, se vrši pomoću analognog manometra sa tačnošću od $\pm 0.25\%$ u odnosu na ukupnu skalu opsega od 0 do 140 bar, električnog senzora za pritisak čija je tačnost od 0.1% predviđenog za merenje pritiska u opsegu od 1 do 103 bar i termoparova koji su provučeni kroz zid cevi uz pomoć specijalnih zaptivnih priključaka.

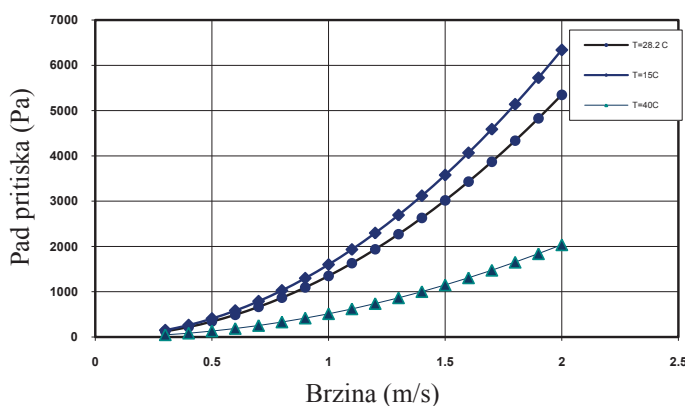
Za grejanje instalacije i radnog medijuma koristi se električni grejni kabal dužine $L=10 \text{ m}$, maksimalnog napona $E=55\text{V}$ i maksimalne snage

$P=500\text{W}$. Električna otpornost kabla iznosi $5.5\ \Omega/\text{m}$. Kabal je gusto namotan oko spoljne površine cevnog voda na delu kružne deonice pre pumpe (slika 3.1).

Zbog smanjenja toplotnih gubitaka prilikom grejanja sistema i postizanja radnih uslova, kada je potrebno za vreme snimanja održati temperaturu konstantnom, instalacija je izolovana. Izolacija je postavljena duž čitave dužine instalacije.

Pri kružnom strujanju ugljen dioksida kroz cevne delove instalacije dolazi do gubitka strujne energije, usled prolaska struje radnog fluida kroz ventile, T-račve, kolena, redukcije i proširenja kao i usled trenja koje se javlja pri strujanju kroz cevi.

Na dijagramu zavisnosti gustine od temperature na konstantnom pritisku (slika 2.2.) uočava se visoka vrednost gustine ($700\text{--}850\ \text{kg}/\text{m}^3$) u oblasti nižih temperatura gde se fluid nalazi u tečnom stanju. U oblasti viših temperatura gustina se kreće u granicama od 200 do $300\ \text{kg}/\text{m}^3$. Vrednost gustine utiče na vrednost dinamičkog pritiska, što znači da je pad pritiska u sistemu u slučaju nižih temperatura veći (slika 3.4). To može uticati na ponovljivost rezultata merenja, jer se teško može uspostaviti ravnoteža, odnosno konstantan pritisak u toku merenja, pri promenljivim brzinama. Usled promene pritiska u toku snimanja, dolazi i do promene temperature, a time i do promena karakteristika fluida koje direktno utiču na odziv senzora. Na temperaturi od $T=15^\circ\text{C}$ gustina ugljen dioksida iznosi $\rho=869\ \text{kg}/\text{m}^3$, dok na temperaturama $T=28.2^\circ\text{C}$ i $T=40^\circ\text{C}$ gustine iznose $\rho=734\ \text{kg}/\text{m}^3$ i $\rho=279\ \text{kg}/\text{m}^3$, respektivno.



Slika 3.4. Promena pada pritiska pri kružnom toku ugljen dioksida u zavisnosti od brzine strujanja na izlaznom preseku mlaznika pri različitim temperaturama i radnom pritisku od 80 bar

4. Razmena toplote između zagrejanog vlakna i okolnog fluida

Propuštanjem struje kroz zagrejano vlakno generiše se toplota koje se može odrediti na osnovu Joule-ovog zakona [8]:

$$P = I \cdot E = I^2 \cdot R_w, \quad (4.1)$$

gde je E pad napona duž vlakna, I struja koja kroz njega protiče i R_w njegova otpornost na radnoj temperaturi.

Toplota koja se generiše u vlaknu Joule-ovim efektom se prenosi na okolni fluid većim delom konvektivnim putem, a manjim delom kondukcijom na nosače vlakna i radijacijom na okolinu. Ukoliko se postavi adekvatan odnos njegove dužine i prečnika, može se zanemariti uticaj konduktivne razmene toplote kroz nosače [4]. Za većinu radnih uslova, toplotni fluks usled radijacije iznosi svega 0.1% ukupnog konvektivnog fluksa [8], pa se prema tome i uticaj radijacije može zanemariti. Imajući to u vidu, toplota koja se preda okolnom fluidu može se izraziti Newton-ovim zakonom hlađenja, koji glasi:

$$\dot{Q} = h \cdot A_w \cdot (T_w - T_f), \quad (4.2)$$

gde je h [$\text{WK}^{-1}\text{m}^{-2}$] koeficijent konvektivnog prelaza toplote, A_w [m^2] površina vlakna na kojoj se vrši razmena toplote sa fluidom temperature T_f i T_w radna temperatura vlakna.

Koeficijent h se može predstaviti u bezdimenzionom obliku preko Nusselt-ovog broja $Nu = hD_w/\lambda_f$, koji se može izraziti preko Reynolds-ovog broja $Re = U_e D_w/\nu_f$, i Prandtl-ovog broja, $Pr = \nu_f/\alpha_f$, odnosno:

$$Nu = f(Re, Pr). \quad (4.3)$$

Prema tome, razmena toplote između zagrejanog vlakna i fluida koji ga opstrujava zavisi od fizičkih karakteristika fluida (gustine ρ , dinamičke viskoznosti μ , specifičnog toplotnog kapaciteta c_p i toplotne provodljivosti λ) i od parametara strujanja (vektora brzine U , temperature fluida T_f , pritiska p itd.).

4.1 Zakon hlađenja zagrejanog vlakna

Jednačina 4.3 opisuje konvektivnu razmenu toplote između zagrejanog vlakna i fluida. Do sada je izvedeno više empirijskih formula oblika 4.3, za različite uslove strujanja i vrstu fluida. Kramers [5] se bavio proučavanjem razmene toplote između zagrejanog vlakna i struje vazduha, vode i ulja. Zaključak njegovih eksperimenata doveo je do

izvođenja Kramers-ove formule, koja daje dobre rezultate za opsege $0.01 < Re < 10000$ i $0.71 < Pr < 1000$ i koja glasi:

$$Nu = 0.42P_r^{0.2} + 0.57P_r^{0.333}R_e^{0.5}. \quad (4.4)$$

Veliki doprinos u analizi razmene toplote između zagrejanog vlakna i fluida koji ga opstrujava dao je King [4] kroz svoja eksperimentalna i teorijska proučavanja. Prema Kingu konvektivna razmena toplote između zagrejanog vlakna i fluida se može predstaviti u sledećem obliku:

$$Nu = M(P_r) + N(P_r) \cdot R_e^p, \quad (4.5)$$

gde su M i N kalibracione konstante čije vrednosti zavise od vrste fluida. Vrednost parametra p prema King-u iznosi 0.5. Kasnije su drugi istraživači došli do zaključka da je $p=f(Re)$ i da se kreće u opsegu $0.35 < p < 0.5$.

Rezultati istraživanja N_u broja za strujanja fluida na superkritičnim uslovima mogu se naći samo za strujanja u cevima, koji su predstavljeni od strane Cheng-a i Schulenberg-a (2001). Izrazi za N_u broj su slični izrazima 4.4 i 4.5 samo sa različitim vrednostima konstanti M i N i dodatnim korekcionim faktorom kojim su obuhvaćene velike promene karakteristika fluida na istim uslovima. Postojeći izrazi za N_u broj se mogu koristiti samo u slučaju kvalitativne analize da bi se optimizovali radni parametri zagrejanih vlakana. Da bi se dobili kvalitetni rezultati neophodno je svako vlakno kalibrisati na superkritičnim uslovima, na kojima se žele uraditi merenja brzinskog i temperaturskog polja, što predstavlja složen problem zbog izrazitih promena svih karakteristika fluida, naročito u okolini pseudo-kritičnih tačaka.

Unutrašnja energija U_n koja se generiše u vlaknu se izražava preko izraza:

$$U_n = mcT_w, \quad (4.6)$$

gde je m masa vlakna, c specifična toplota, T_w temperatura vlakna.

Promena ove energije u vremenu jednaka je razlici generisane toplote P i energije razmenjene sa okolinom, uglavnom prinudnom konvekcijom \dot{Q} :

$$\frac{dU_n}{dt} = P - \dot{Q}. \quad (4.7)$$

Pod pretpostavkom da je specifična toplota c konstantna vremenska promena unutrašnje energije vlakna iznosi:

$$\frac{dU_n}{dt} = c \cdot m \cdot \left(\frac{dT_w}{dt} \right) = P - \dot{Q}, \quad (4.8)$$

gde je P toplota generisana u zagrejanom vlaknu Joule-ovim efektom, a \dot{Q} toplota predata okolnom fluidu najvećim delom konvektivnim nosom toplote. Ova jednačina se može, uvodeći jednačine 4.1., 4.2 i 4.5. napisati u sledećem obliku:

$$\frac{E_w^2}{R_w} = \lambda_f \pi L_w [M(P_r) + N(P_r)] R_e^n (T_w - T_f) + c_w \rho_w \frac{D_w^2 \pi}{4} L_w \frac{dT_w}{dt} \quad (4.9)$$

Anemometri sa konstantnom temperaturom (CTA anemometri) rade sa zagrejanim vlaknima čija je radna temperatura konstantna $T_w = \text{const}$, odnosno električna otpornost vlakna je konstantna, $R_w = \text{const}$. Znači da će za datu temperaturu vlakna T_w , izlazni napon E_w na anemometru zavisi od efektivne brzine U_e , temperature fluida i njegovih fizičkih karakteristika fluida na superkritičnim uslovima. Prema tome izraz 4.9 se može napisati u sledećem obliku:

$$E_w^2 = A(p, T_f) + B(p, T_f) \cdot U_e^p. \quad (4.10)$$

Koeficijenti A i B se moraju odrediti eksperimentalnim putem.. Pošto se merenja vrše duž linije konstantnog pritiska, koeficijenti A i B zavise samo od temperature i izraz 4.10 se može napisati u sledećem obliku:

$$E_w^2 = A(T_f) + B(T_f) \cdot U_e^p. \quad (4.11)$$

Pri merenju brzine u promenljivom temperaturskom polju, što je predmet ovog rada, mogu se očekivati vrlo složene funkcije $A(T_f)$ i $B(T_f)$.

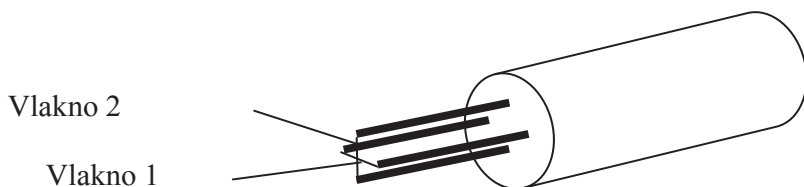
5. Ponašanje zagrejanog vlakna u struji ugljen dioksida u superkritičnoj oblasti

Merenje brzine strujanja fluida zahteva optimizaciju parametara koji utiču na osetljivost zagrejanog vlakna i fluktuacije brzine. Najvažnije fizičke veličine koje utiču na proces razmene toplote između vlakna i okolnog fluida, kao i na stabilnost anemometra su temperatura fluida T_f , vlakna T_w , koeficijent električne otpornosti vlakna i karakteristike fluida. U eksperimentima su zato korišćena vlakna različitog materijala: tangstena i legure platina-rodijum. U nastavku teksta predstavljeni su rezultati i zaključci vezani za eksperiment u kome su korišćeni zagrejana vlakna od legure platina – rodijum.

5.1. Sonda sa zagrijanim vlaknima

U eksperimentalnoj analizi, korišćena je sonda sa dva senzora od platine-rodijuma (90% Pt-10% Rd) prečnika $d = 2.5 \mu\text{m}$ i dužine $l = 0.5 \text{ mm}$. Oba senzora su se koristila kao zagrejana vlakna, odnosno za merenje brzine, kako bi se istovremeno ispitao uticaj struje fluida na odziv vlakna pri različitim faktorima pregrevanja.

Ravan u kojoj leže vlakna je normalna na osu sonde, a ose vlakana se poklapaju sa osama izlaznog preseka mlaznika, što je predstavljeno na slici 5.1. Vlakna su zavarena za vrhove igličastih, tankih nosača koji su na dnu prečnika $d_{dna} = 0.25 \text{ mm}$, a pri vrhu prečnika $d_{vrha} = 100 \mu\text{m}$. Pošto je gustina ugljen dioksida na zahtevanim radnim uslovima (na pritisku $p = 80 \text{ bar}$ i temperaturama u opsegu od $15 \text{ do } 60^\circ\text{C}$) prilično visoka, što se vidi na dijagramu 2.2, prilikom konstruisanja sonde postavljene su nosači većeg prečnika u cilju smanjenja njihovih vibracija u fluidu relativno visoke gustine. Predviđeno je korišćenje novih modela sonde sa tanjim nosačima, sve do nivoa koji može izdržati spomenute mehaničke vibracije. Prema dosadašnjem iskustvu optimalni prečnik nosača na vrhu iznosi oko $50 \mu\text{m}$. Sonda je postavljena na drugi nosač, koji je učvršćen za mlaznik na izlaznom preseku, kao što se vidi na slici 3.2. "Hladna" otpornost vlakna zajedno sa nosačima, izmerena pre njihovog aktiviranja, iznosi: za vlakno 1 $R_u = 29.4 \Omega$ i vlakno 2 $R_u = 30.4 \Omega$. Ova vrednost otpornosti je bitna za određivanje faktora pregrevanja. Zagrejano vlakno 2 se djelimično nalazi u tragu vlakna 1.



Slika 5.1. Prikaz međusobnog položaja zagrejanih vlakana

5.1.1. Faktor pregrevanja

Vrednost faktora pregrevanja, odnosno temperature vlakna, direktno utiče na osetljivost vlakna. Da bi se podesio faktor pregrevanja mora se poznavati vrednost “hladne” otpornosti vlakna, tj. električne otpornosti koju vlakno ima pre svog zagrevanja. Stvarni faktor pregrevanja a se određuje prema izrazu:

$$a = 1 + \alpha(T_w - T_f) \quad (5.1)$$

U posmatranoj eksperimentalnoj analizi za jedno vlakno je usvojena temperaturna razlika $T_w - T_f = 35^\circ\text{C}$, a za drugo, koje se nalazi u tragu spomenutog, ta razlika iznosi 55°C . Različiti faktori pregrevanja su uzeti da bi se videlo kako njegova vrednost utiče na dobijene rezultate merenja, odnosno na vrednosti kalibracionih koeficijenata A i B. Uticaj stepena pregrijavanja može biti posebno izražen u superkritičnim uslovima, usled izrazitih varijacija osobina fluida sa promjenom emperature naročito u zoni oko pseudokritične tačke.

Temperaturski koeficijent električne otpornosti za vlakno od platine – rodiuma iznosi $0.0016 \text{ 1/}^\circ\text{K}$. Prema izrazu 5.1. stvarni koeficijent pregrevanja za prvo vlakno iznosi:

$$a_1 = 1.056 \quad (5.2)$$

a za drugo:

$$a_2 = 1.088 \quad (5.3)$$

Vrednosti termo-fizičkih i transportnih karakteristika ugljen dioksida uzimaju se za referentnu temperaturu koja se definiše prema relaciji:

$$T_{ref} = \frac{T_w + T_f}{2} \quad (5.4)$$

gde je:

T_w - temperatura vlakna i

T_f - temperatura fluida.

5.1.2. Provera King-ovog zakona hlađenja pri promenljivoj brzini strujanja ugljen dioksida

Nakon dobijanja, svih gore navedenih radnih parametara, što podrazumeva da je postignut pritisak u sistemu od 80 bar, konstantna vrijednost temperatura u opsegu od 15 do 40°C i izbalansirano anemometarsko kolo, pristupa se merenju brzine strujanja i napona na zagrijanim vlaknima. Rezultat posmatranog eksperimenta treba da da međusobnu zavisnost izlaznog napona anemometra i brzine strujanja. Sa poznatom vrednošću zapreminskog protoka, dobijenog iz izraza 3.1, brzina strujanja ugljen dioksida se dobija iz sledeće relacije:

$$U = \frac{\dot{V}}{A_{izl}} = \frac{4\dot{V}}{60000D_{izl}^2\pi} \left[\frac{m}{s} \right], \quad (5.5)$$

gde je $A_{izl} = \frac{D_{izl}^2\pi}{4}$ površina izlaznog preseka mlaznika.

Merenja su izvedena nakon što je u instalaciji postignut pritisak od 80 bar, pri temperaturi od 28.2°C.

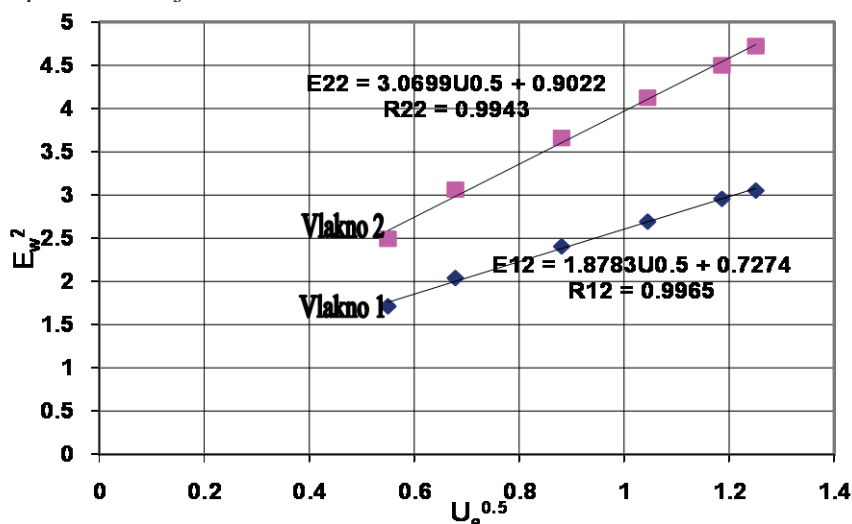
Brzina se, preko varijatora snage motora, menjala od 0.6 do 1.5 m/s, pri čemu su za svaku promenu brzine snimljeni odgovarajući naponi. Metodom najmanjih kvadrata dobijene je sledeća zavisnost između kvadrata izlaznog napona i kvadratnog korena brzine strujanja, za vlakno sa manjim stepenom pregrijavanja

$$E_1^2 = 1.8783U^{0.5} + 0.7274 \quad (5.6)$$

dok je za veći stepen pregrijavanja dobijeno,

$$E_2^2 = 3.0699U^{0.5} + 0.9022 \quad (5.7)$$

Rezultati merenja su prikazani na slici 5.2, gde se uočava linearna zavisnost kvadrata izlaznog napona i kvadratnog korena brzine strujanja, koja karakteriše King-ov zakon. Dobijenu zavisnost karakteriše visok stepen korelacije $R^2 \sim 0.995$.



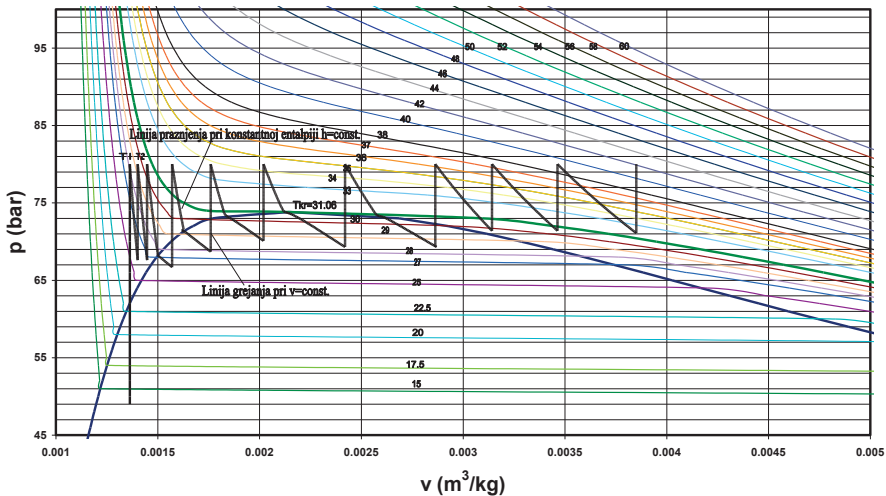
Slika 5.2. King-ov zakon hlađenja izveden za struju ugljen dioksida na pritisku $p=80$ bar i temperaturi $t=28.2^\circ\text{C}$ za vlakna 1 i 2

Izrazi 5.6 i 5.7 očigledno predstavljaju **King-ove zakone** hlađenja zagrejanog vlakna. Poznato je da se ovaj zakon može primeniti za merenje brzine strujanja vazduha, vode, ulja i još nekih tečnosti na normalnim uslovima (pritisku $p \cong 1\text{bar}$). Dobijanjem izraza 5.6 i 5.7 po prvi put je dokazano da King-ov zakon važi i za ugljen dioksid koji se nalazi u zoni tečnosti na pritisku većem od atmosferskog.

6. Regulacija promenljivog temperaturskog polja pri konstantnom pritisku

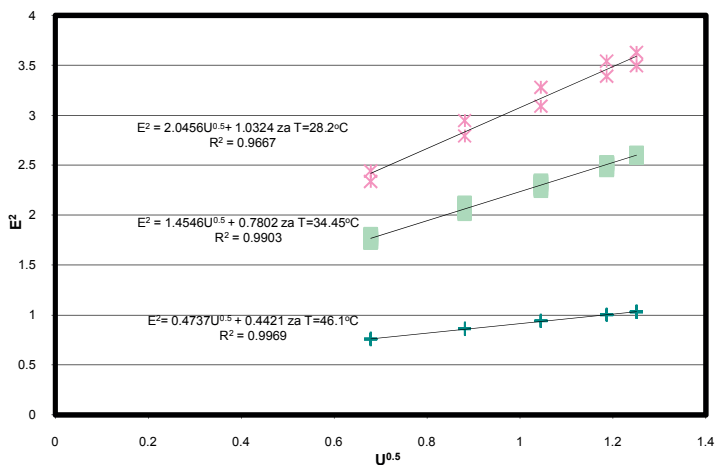
Cilj kalibracije je izvođenje King-ov zakona na uslovima konstantnog pritiska i različitih temperatura. Pošto koeficijenti A i B iz jednačine King-ovog zakona zavise od temperature, treba očekivati da će se u toku promene radnih uslova oni takode menjati. Na slici 6.1. prikazan je postupak kojim se postiže pritisak od 80 bar, odnosno radni pritisak na kome treba da se izvrši kalibracija. U tački 2 na istom dijagramu izvršeno je merenje na temperaturi od $T_1=28.2^\circ\text{C}$. Nakon ovog radnog

stanja treba na istom pritisku postići temperaturu veću od T_1 . Delimičnim pražnjenjem instalacije raste specifična zapremina ugljen dioksida, a radni pritisak opada. Kada se ugljen dioksid u instalaciji ponovo zagreje do pritiska od 80 bar uspostavlja se nova radna temperatura $T_2 > T_1$ i pritisak $p_1 = p_2$. Sada se na temperaturi T_2 , nakon uspostavljanja stacionarnih uslova menja brzina i vrši merenje. Postupak parcijalnog pražnjenja i ponovnog grejanja se može ponoviti sve do vrednosti temperature fluida pri kojoj vlakna pokazuju bar najmanju osetljivost dok se približno ne izjednače temperature vlakna i ugljen dioksida tj. $T_w = T_f$. Nekoliko merenja se vrši na svakoj uspostavljenoj radnoj temperaturi, kako bi se proverila ponovljivost rezultata i izveli King-ovi zakoni za svaku radnu tačku. Opisani postupak kalibracije predstavljen je na slici 6.1 u pv dijagramu za ugljen dioksid.

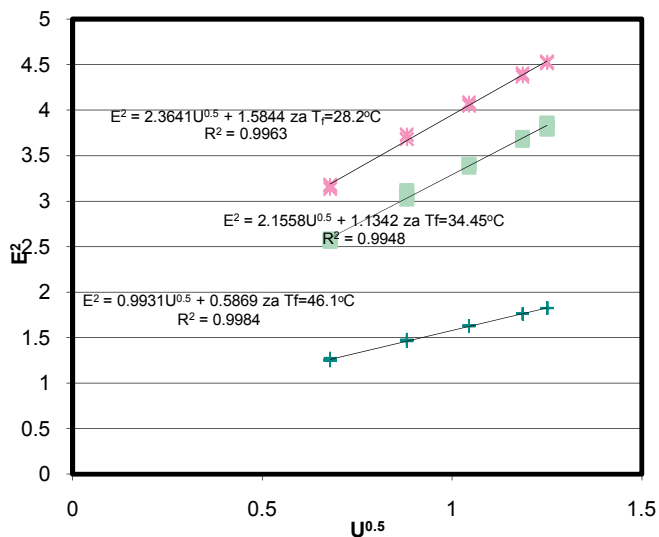


Slika 6.1. Postupak regulacije pritiska i temperature predstavljen u pv dijagramu

Rezultati snimanja na dvije različite temperature u superkritičnoj oblasti za oba vlakna predstavljeni su zajedno sa rezultatima dobijenim na temperaturi od 28.2°C na slikama 6.2 i 6.3.



Slika 6.2. Izvedeni King-ovi zakoni hlađenja za tri tačke pri merenju na konstantnom pritisku i različitim temperaturama za vlakno sa nižim faktorom pregrevanj.



Slika 6.3. Izvedeni King-ovi zakoni za tri radne tačke pri merenjima na konstantnom pritisku i različitim temperaturama za vlakno sa višim faktorom pregrevanj.

Na osnovu dobijenih rezultata slijedi da Kingov zakon važi i za temperature od 34.45 i 46.1⁰C, koje se nalaze u superkritičnoj zoni. Uočava se izraženije rasipanje rezultata za vlakno sa nižim faktorom pregrevanja na temperaturama ispod pseudo-kritične vrednosti. Već je rečeno da na rasipanje rezultata takođe veliki uticaj imaju izrazite promene karakteristika ugljen dioksida u blizini pseudo-kritične tačke, gde usled vrlo malih temperaturnih promena (reda 0.1⁰C) dolazi do značajnih promena skoro svih karakteristika superkritičnog fluida čime se značajno utiče na vrednost kalibracionih koeficijenata A i B, a time i na osetljivost vlakana. Na osnovu izloženog sledi da je za uspešnu kalibraciju sondi u superkritičnim uslovima neophodna pažljiva optimizacija svih strujnih i mjernih parametara.

7. Zaključak

Analizom interakcije zagrejanih vlakana sa strujom ugljen dioksida dobijen je King-ov zakon hlađenja po prvi put u superkritičnim uslovima u kojima do sada nisu vršena ispitivanja i merenja primenom anemometra sa zagrejanim vlaknima. Time je dokazano da za merenje brzine strujanja ugljen dioksida na konstantnom pritisku i različitim temperaturama može da se primeni ova metoda. Kalibraciona instalacija obezbeđuje potrebne uslove za izvođenje kalibracione procedure, što podrazumeva:

- Promenljivo brzinsko polje (0.15 – 2 m/s) na izlazu iz mlaznika, gde su postavljena vlakna, upotrebom pumpe sa kontrolisano promenljivim brojem obrtaja;
- Promenu polja pritiska u opsegu od 1 – 100 bar;
- Promenljivo temperaturno polje (15-67 °C) upotrebom električnog grejnog kabla i ventila za odzraku;
- Promenu brzine pri konstantnom pritisku i temperaturi;

Na osnovu preliminarnih eksperimenata na različitim temperaturama uočena je ponovljivost rezultata merenja na temperaturama iznad pseudo-kritične tačke i dobro slaganje kalibracionih koeficijenata sa teorijskim predviđanjima.

Nedostatke postojeće konstrukcije kalibracione instalacije, koji nisu imali kvalitativnog uticaja na dobijene rezultate, predstavljaju:

- Relativno visok nivo turbulencije (reda 4%) - dobre kalibracione instalacije poseduju nivo turbulencije niži od 1%;

- Relativno veliki lokalni gubici, što ima za posledicu priličan pad pritiska na kružnom toku ugljen dioksida, naročito u zoni nižih temperatura, gde su varijacije pritiska prilično izražene i ne može se postići njegova stabilnost, a time i stabilnost rezultata merenja.
 - Prilična toplotna inercija sistema, zbog upotrebe spoljašnjeg grejača.
- Ove nedostaci se mogu eliminisati promjenom geometrijskih parametara instalacije. Naredni koraci biće usmereni na izvođenje procesa kalibracije, i to prvo sonde sa dva senzora (jednog temperaturskog i jednog brzinskog), a kasnije i sa pet senzora, u struji ugljen dioksida sa promenljivim brzinskim i temperaturskim poljem na konstantnom pritisku, kao i na projektovanje novog idejnog rešenja instalacije čime će se eliminisati navedeni nedostaci postojeće instalacije.

LITERATURA

- [1.] Arai Y., Sako T., Takebayashi Y., "SUPERCRITICAL FLUIDS – Molecular Interactions, Physical Properties and New Applications", Springer – Verlag Berlin Heidelberg, 2002.
- [2.] Dickinson N.L., Welch C.P., "Heat Transfer to Supercritical Water", ASME, 80, 746 1958.
- [3.] Hussain A.K.M.F., Ramjee V., "Effect of the Axsymmetric Contraction Shape on Incompressible Turbulent Flow", Trans. ASME, 58, 1976.
- [4.] King, L.V., "On the Convection of Heat from Small Cylinders in the Stream of Fluid", Phil. Trans. of Roy. Soc.(London), Ser.A.Vol. 214, No.14, pp. 373-432., 1914.
- [5.] Kramers,H. "Heat transfer from spheres to flowing media", Physica, 12, 61-80, 1946.
- [6.] Okamoto K., Ota J., Skurai K., Madarame H., "Transient Velocity Distribution for the Supercritical Carbon-Dioxide Forced Convection Heat Transfer", Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 40, No.10, str. 763-767., 2003.
- [7.] Schubauer G.B., "Advances in Hot-Wire Anemometry", University of Maryland, College Park, Md.,1968.
- [8.] Vukoslavčević P., Petrović D., " MULTIPLE HOT-WIRE PROBES-Measurements of Turbulent Velocity and Vorticity Vector Field", Montenegro Academy of Science and Art, Podgorica, 2002.