

Laser-Dopler anemometrijska merenja u cevima različitih oblika, dimenzija i kvaliteta stakla

Dr Slavica Ristić, dipl.inž.¹⁾
Mr Jelena Ilić, dipl.inž.²⁾

Merenja raspodele brzine strujanja i nivoa turbulencije u staklenim cevima različitog oblika, dimenzija i kvaliteta stakla su izvršena metodom *laser-Dopler anemometrije*. Osnovni cilj eksperimenta je da se ilustruju mogućnosti koje pruža ova metoda i da se skrene pažnja na neke probleme prisutne u praksi, koji mogu da degradiraju kvalitet i tačnost merenja. Akcenat je stavljen na dislokaciju merne zapremine, dekalibraciju sistema i povećanje odnosa signal/šum.

Ključne reči: Mehanika fluida, optičke metode, laser - Dopler anemometrija, cilindrične cevi.

Uvod

SAVREMENA nauka i tehnika zahtevaju razvoj sve savršenijih mernih sistema. Aktuelna istraživanja u aero i hidrodinamici vezana su za dobijanje dovoljno pouzdane informacije o parametrima protoka fluida. Zahtevima savremenih istraživanja najbolje mogu udovoljiti beskontaktno metode u koje spada i Laser-Dopler Anemometrija (LDA). Ona se zasniva na činjenici da je razlika frekvencija upadnog laserskog zračenja i rasejanog na pokretnim nehomogenostima sredine, posledica Doplerovog efekta i proporcionalna je brzini toka. Većina fluida u sebi sadrži male čestice na kojima se može rasejavati svetlost. Ako tih čestica nema, neophodno je u ispitivani fluid dodati neku vrstu markera. Kad neka od ovih čestica uđe u mernu zapreminu, laserski snop se na njoj rasejava u svim pravcima. Usled kretanja čestice, odnosno usled Doplerovog efekta, frekvencija rasejane svetlosti se menja za iznos koji je poznat pod nazivom *Doplerov frekventni pomeraj* ili *Doplerova frekvencija*. Doplerova frekvencija (f_D) direktno je proporcionalna komponenti brzine, koja je u pravcu normalnom na simetralu tupog ugla preseka laserskih snopova. Detaljnija analiza teorijskih osnova ove metode je obrađena u [1-12].

U standardne metode za merenje lokalne vrednosti srednje brzine pokretnog fluida spadaju: Pitotova cev, zagrejana žica, zagrejani film itd. Ove metode zahtevaju ubacivanje nekog objekta unutar toka fluida, koji izazove njegovo remećenje. Za razliku od njih, laser-Dopler anemometrija (LDA) ne ometa tok i meri gotovo trenutnu brzinu u jednoj tački. Može da daje niz informacija o toku, kao što su brzinsko polje, nivo turbulencije unutar fluida i dr. Zbog toga je laser-Dopler anemometrija pogodno sredstvo za istraživanje toka fluida i nivoa turbulencije.

Prvi komercijalni laser-Dopler anemometri su se pojavili 1970. god. Ovi anemometri su odmah prihvaćeni kao koris-

na merna tehnika sa brojnim prednostima u odnosu na konvencionalne metode. Osnovne prednosti LDA su:

- beskontaktnost – nema remećenja toka,
- izuzetno mala sonda (preseka laserskih snopova ili samo jedan snop) i relativno jednostavno biranje i menjanje položaja merne zapremine, što obezbeđuju visoku rezoluciju,
- ne zahteva kalibraciju, zato što je kalibraciona konstanta jednoznačno određena talasnom dužinom snopa i uglom pod kojim se seku snopovi.

Ove prednosti su učinile da LDA postane jedna od najpogodnijih metoda za bolje upoznavanje brzinskih polja fluida u ogromnom broju tehničkih problema kao što su vodeni i aerotuneli, pumpe, propeleri, motori, modeli krila aviona, centrifugalni kompresori, komore za sagorevanje, ispitivanja u korozivnim i plamenim sredinama, mlaznicima, merenje brzine vetra i mnogi drugi. Posebno prilagođenim LDA sistemima može se meriti veličina čestica u plamenu ili u aerosolima.

Ovom prilikom su prikazana merenja brzinskog polja u cilindričnim cevima različitog oblika i dimenzija, koje se sreću u složenim tehničkim sistemima, kao njihov vitalni deo za koji je od posebne važnosti poznavanje strujnih karakteristika. Na osnovu poznatih teorija, može se veoma precizno proračunati strujni tok u horizontalnim cevima cilindričnog preseka sa konstantnim i promenljivim prečnikom. Eksperimentalni rezultati, s druge strane, mogu da ukažu na određene nedoslednosti u primeni korišćene metode. Laser-Dopler anemometrija je etalonska metoda, pa se očekuje da su eksperimentalni rezultati u potpunosti saglasni sa teorijom.

Pošto su veoma često u literaturi [1-5] potencirane prednosti ove metoda u odnosu na druge, a zanemarivani veoma važni momenti u korišćenju ove metode, u radu su prikazane primene ove metode s aspekta prisutnih problema, koji umanjuju njene prednosti.

¹⁾ Vojnotehnički institut VJ, 11000 Beograd, Katanićeva 15

²⁾ Mašinski fakultet, 11000 Beograd, 27. marta 80

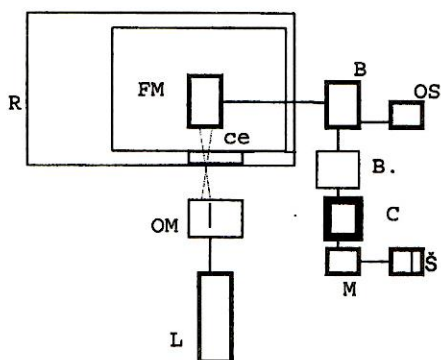
Nedostaci primene LDA pri dijagnostici strujanja u cilindričnim cevima su:

- fluid mora da bude providan,
- metoda zahteva optički pristup fluidu, odnosno bar deo zida cevovoda mora biti providan,
- zaprljanost zidova cevi može da proizvede jak šum, što se posle obrade signala registruje kao lažno visok nivo turbulencije i
- zakrivljenost zidova kod određenih konfiguracija dovodi, usled prelamanja svetlosti, do dislokacije merne zapremine, čak i do dekalibracije, koje moraju da se uzmu u obzir pri merenju brzine fluida.

Uticao poslednje dve stavke na kvalitet merenja koji je analiziran u radu zavisi od načina i kvaliteta izrade cevi unutar kojih se ispituje tok. Merenja su vršena na cevima različitih oblika, različitih kvaliteta izlivanja i različite vrste stakla. Posebno je razmatrana i određena dislokacija merne zapremine za konkretne cevi, gde je vršeno merenje, iznos dekalibracije, kao i područja u kojima dolazi do promena pravca izmerene komponente brzine zbog različitih uglova prelamanja laserskih snopova, ponašanje LDA signala kod mernih zapremina u blizini zidova cevi i uticaj kvaliteta stakla na njega.

Opis eksperimenta

Blok-dijagram na sl.1 prikazuje sistem na kojem su obavljana merenje [8-12]. Protok fluida se uspostavlja pomoću rezervoara R kapaciteta 50l i pumpe. L je 5mW He-Ne laser, koji daje svetlosni snop talasne dužine 633nm. Optički modul OM deli svetlosni snop na dva snopa jednakih intenziteta i usmerava ih tako da se seku u tački u kojoj se želi da se izmeri brzina toka. Rasejana svetlost se prihvata fotomultiplikatorom FM od koga se signal vodi na brojač B, gde se vrši primarna obrada signala. Signal se sa brojača, preko bafer interfejsa (B.I.), odvodi na osciloskop OS i računar C gde se vrši konačna obrada podataka. Rezultati merenja se mogu prikazati na monitoru M i štampati na štampaču Š.

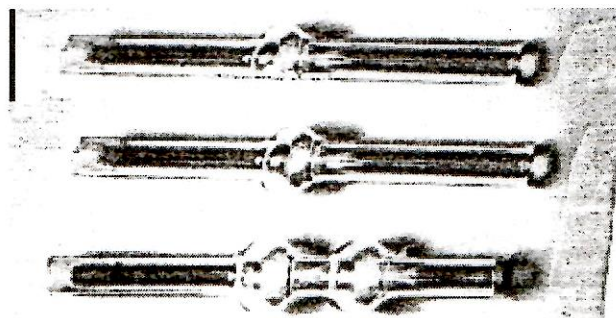


Slika 1. Blok-šema LDA sistema korišćenog u merenjima opisanim u ovom radu

Sistem je jednokomponentni, može da radi u povratnom modu i da detektuje rasejanje unapred. U ovim merenjima je korišćena varijanta sa detektorom (FM) postavljenim pod uglom $\approx 20^\circ$ u odnosu na optičku osu LDA sistema. Iako su merenja vršena na jednokomponentnom laser-Dopler anemometru, zahvaljujući mogućnosti rotacije sistema prizmi u optičkom modulu mogu se vršiti merenja i horizontalne i vertikalne komponente brzine. Unutar kućišta optičkog modula se nalazi delitelj snopova. Dva sistema prizmi se podešavaju da bi se dobio željeni presek snopova

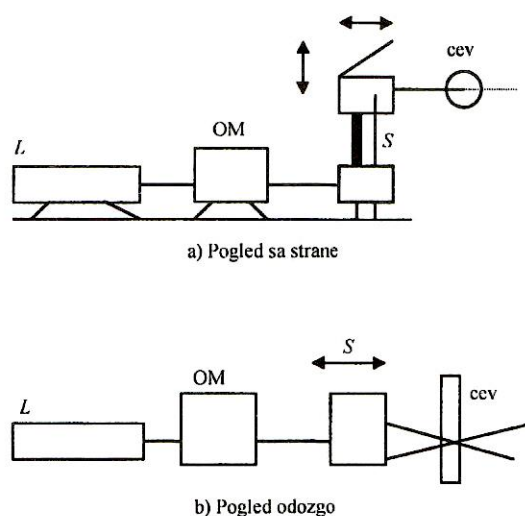
u mernoj zapremini. Omogućena je kontrola vertikalnog i horizontalnog pozicioniranja snopova (čime se određuje komponenta brzine, koja će biti merena), kao i rastojanja između njih.

Parametri toka su ispitivani za strujanje vode kroz cevi od dve različite vrste stakla – običnog i pirex. Cevi od običnog stakla su izliveno iz primarno cilindrične cevi spoljašnjeg prečnika 18 mm i debljine zida 1,5 mm. Dve cevi imaju proširenja sfernog oblika spoljašnjeg prečnika od 32 mm do 34 mm. Od pirex stakla, debljine 1,25 mm, je izlivena cev, spoljnog prečnika 18 mm, sa proširenjem samo sa jedne strane. U radu su prikazani dobijeni rezultati za cevi na sl.2.



Slika 2. Cevi za koje je ispitivan protok pomoću LDA sistema

Ispitivana cev se postavlja na nosač tako da je njena osa horizontalna i normalna na pravac prostiranja laserskog snopa (sl.3).



Slika 3. Mogućnosti kretanja predajne optike LDA sistema radi promene položaja merne zapremine

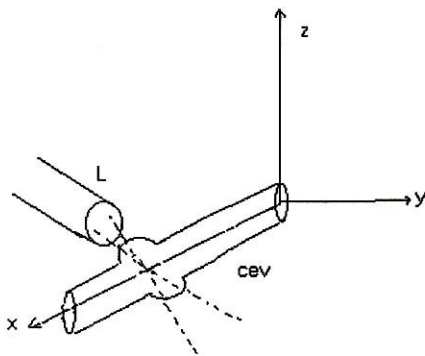
Sistem ogledala S, koji se nalazi zajedno sa laserom L i optičkim modulom OM na istoj optičkoj klupi, može da se pokreće na osu cevi normalno u dva pravca: a) horizontalno, duž pravca laserskog snopa i b) vertikalno, normalno i na osu cevi i na pravac laserskog snopa. Ta pokretanja vrši sistem za traverziranje kojim može da se upravlja pomoću tastera ili preko računara. Položaj duž vertikalnog pravca (z komponenta) može da se očitava na vertikalnom lenjiru, koji je ugrađen u sistem S. Horizontalno pomeranje (traverziranje), tj. y komponenta položaja merne zapremine se kontroliše pomoću lenjira, koji je ugrađen na horizontalnu optičku klupu.

Da bi se izmerile brzine toka fluida u različitim tačkama duž pravca ose cevi (x ose), potrebno je pomerati samu cev u tom pravcu, što se postiže ručnim pomeranjem nosača ce-

vi. Radi kontrole x komponente položaja merne zapremine, konfiguracija je dopunjena lenjirom pričvršćenim za cev. Tačnije rečeno, lenjir je postavljen neposredno ispod cevi paralelno sa njenom osom. Ravan, normalna na osu cevi, kroz koju prolazi direktan laserski snop ima fiksiran položaj. Snop može samo da se pomoću sistema S podiže ili spušta u okviru te ravni.

Izabrani koordinatni sistem je prikazan na sl.4. Traverziranje u x pravcu se vrši transliranjem cevi u odnosu na fiksiran LDA sistem, a traverziranje u y i z pravcu se vrši pomoću sistema za traverziranje.

Za merenje brzine toka fluida i nivoa turbulencije birane su tačke duž ose cevi – x pravca, na rastojanjima od po nekoliko milimetara (obično 5 mm) kao i na karakterističnim poprečnim preseccima (proširenje, suženje, prepreka...) duž y pravca, na rastojanjima od po 1 mm.



Slika 4. Definisane koordinatnog sistema

LDA sistem radi u poluautomatskom režimu. Pomeranje nije kompletno upravljano računarom zbog toga što je, s obzirom na postojeći hardver, to moguće samo u dve ravni. Minimalni broj uzoraka za svaku mernu tačku se menjao tokom merenja od 640 do 2000. Zavisno od uslova merenja, vreme akvizicije se kretalo od 0.1 s do 3 s. Obrada podataka i prikazivanje u obliku histograma ili preko srednje brzine se obavlja automatski.

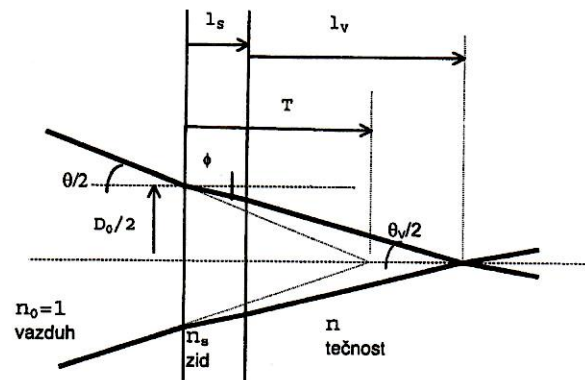
U toku eksperimenta, pored merenja brzinskog toka, izvršena je i vizualizacija bojama i vazдушnim mehurićima, kako bi se pojasnili neki rezultati.

Korekcije merne zapremine i kalibracione konstante

Položaj preseca snopova (merne zapremine), rastojanje između pruga, pa i pravac merene komponente brzine mogu biti nelinearno povezani sa geometrijom mernog sistema usled razlike u indeksima prelamanja vazduha, cevi i tečnosti. Postavljanje takve cevi u pravougaonu providnu kutiju može da kompenzuje neke efekte prelamanja svetlosti [6].

Pogodno bi bilo da sistem ima računarski kontrolisano traverziranje, koje automatski uzima u obzir korekcije u pozicioniranju merne zapremine. Greške usled promene ugla presecanja snopova i promene pravca vektora osetljivosti bi se mogle kompenzovati korekcijom izlaznih podataka U ovim merenjima korekcije su vršene na izlaznim podacima anemometra (na vrednostima brzine). Merenje brzine na delovima cevi van proširenja i zakrivljenja zida, duž popre-

čnog preseca (duž y pravca) u horizontalnoj ravni simetrije cevi se mogu analizirati pomoću sl.5.



Slika 5.: Putanja snopa u delovima cevi van proširenja

Kalibraciona konstanta u ovom slučaju iznosi:

$$C_1 = \frac{\lambda_0}{2 \sin \frac{\theta_v}{2} n}$$

gde je λ_0 talasna dužina svetlosti snopa u vakuumu (vazduhu). Oznake uglova, indeksa prelamanja i dužina su date na sl.4. Kako je prema zakonu prelamanja svetlosti:

$$n_0 \sin \theta/2 = n_s \sin \phi = n \sin \theta_v/2$$

pa je

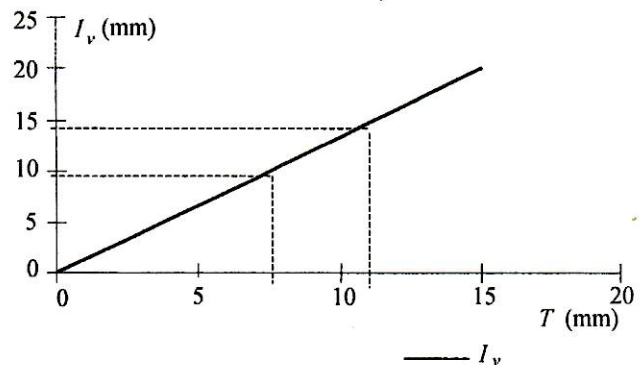
$$C_1 = \frac{\lambda_0}{2 \sin \frac{\theta}{2}} = C$$

gde je C kalibraciona konstanta u vazduhu. Promena ugla presecanja snopova se u potpunosti kompenzuje promenom talasne dužine svetlosti, što znači da ne dolazi do dekalibracije.

Međutim, položaj merne zapremine nije linearno zavisno od položaja predajnog sočiva. Veza između stvarnog rastojanja merne zapremine od zida cevi I_v i prividnog $T-I_s$ (sl.6) data je izrazom:

$$T \operatorname{tg}(\theta/2) = I_s \operatorname{tg} \phi + I_v \operatorname{tg}(\theta_s/2)$$

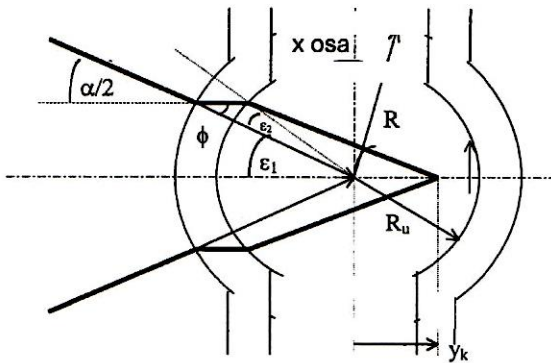
Kada se proračunaju vrednosti uglova prema Sneliusovom zakonu i dimenzijama cevi korišćenih u eksperimentu, dobija se zavisnost prikazana dijagramom na sl.6.



Slika 6. Kvantitativni prikaz dislokacije merne zapremine za slučaj ravnog zida. Veza između stvarnog (I_v) i prividnog (T) položaja merne zapremine.

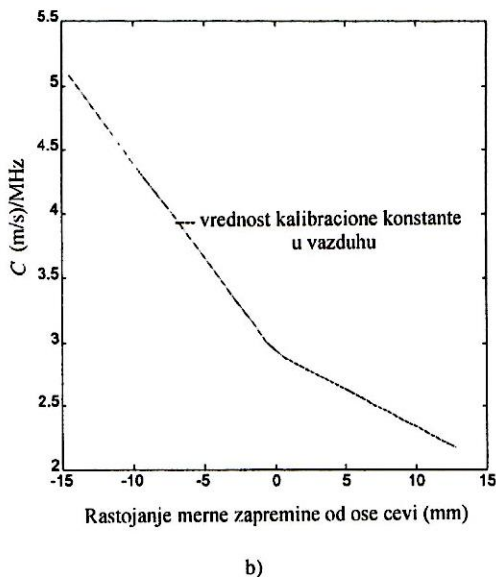
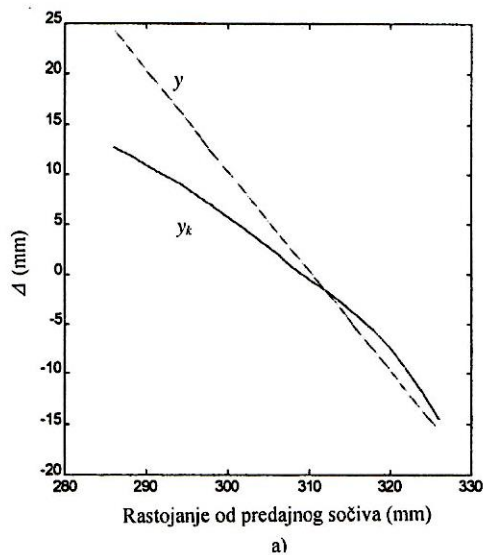
Prilikom merenja brzine po poprečnom preseku u horizontalnoj ravni ose simetrije, na mestu proširenja cevi,

stvarni položaj merne zapremine i vrednost kalibraciona konstante se određuju na osnovu sl.7



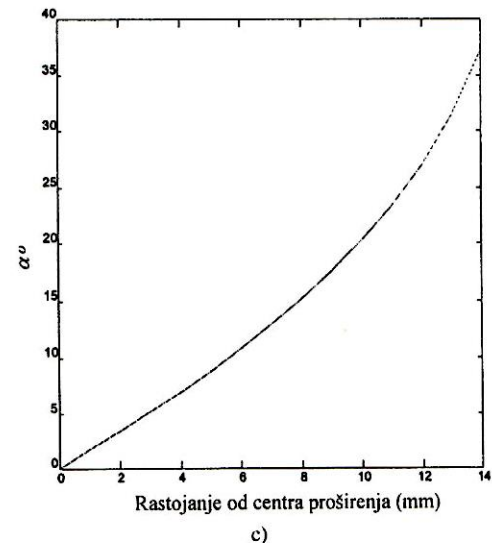
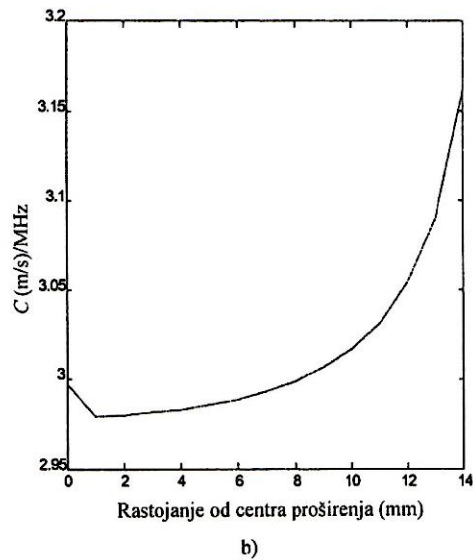
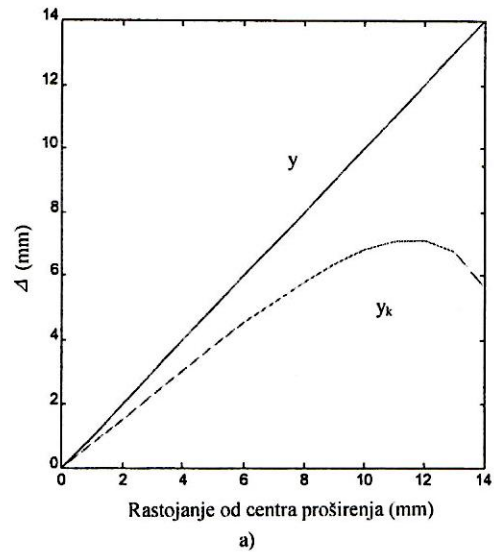
Slika 7. Put svetlosnog snopa pri merenju horizontalne komponente brzine po poprečnom preseku

Proračun stvarnog položaja merne zapremine (y_k) (sl.8a) pokazuje relativno mala odstupanja realnog od prividnog položaja merne zapremine u oblasti između ose cevi i predajnog sočiva (žižne daljine 310 mm). U toj oblasti su pomeraji predajnog sočiva približno jednaki odgovarajućim



Slika 8. Kvantitativni prikaz dislokacije merne zapremine i dekalibracije za slučaj merenja preko sfernog zida duž y pravca.: a) poređenje prividnog (y) i stvarnog (y_k) položaja merne zapremine, b) prikaz vrednosti kalibracione konstante

pomerajima merne zapremine. Međutim, u oblasti sa druge strane ose cevi, za konstantne pomeraje predajnog sočiva pomeraji položaja merne zapremine postaju sve manji, što je veća njena udaljenost od ose cevi.



Slika 9. Kvantitativni prikaz dislokacije merne zapremine i dekalibracije za slučaj merenja preko sfernog zida duž x pravca: a) poređenje stvarnog (y_k) i prividnog (y) položaja merne zapremine; b) zavisnost kalibracione konstante od rastojanja predajnog sočiva od centra proširenja; c) zavisnost promene pravca merene komponente brzine od rastojanja predajnog sočiva od centra proširenja

Vrednosti uglova pod kojima se seku snopovi, odnosno kalibracione konstante, za razliku od merenja kroz ravan zid, se značajno menjaju zavisno od položaja merne zapremine (sl.8b). Zbog toga treba korigovati vrednosti brzine koje pokazuje laser-Dopler anemometar. Ugao presecanja snopova $\theta_v > \theta$ i direktno dovodi do promene kalibracione konstante, jer se menja širina interferencionih pruga u mernoj zapremini. Za konfiguraciju korišćenog sistema, u ovom eksperimentu kalibraciona konstanta C_v se menja od 2.2 do 5.1 (m/s)/MHz. Na sl.8b je naznačena vrednost C u vazduhu.

Prethodni proračun se odnosio na pomeranje predajnog sočiva duž pravca y ose. Za slučaj merenja brzine duž x ose (ose simetrije cevi) na mestu proširenja cevi princip proračunavanja položaja merne zapremine je isti, ali je proračun nešto složeniji, zato što snopovi padaju pod različitim uglovima na površinu cevi, pod različitim se uglovima prelamaju i nastavljaju da se kreću asimetrično u odnosu na osu LDA sistema.

Zbog toga se, pored položaja merne zapremine i ugla presecanja snopova menja i pravac merene komponente brzine. Rezultati proračuna su prikazani na dijagramima na sl.9. Razlika između prividnog (y) i stvarnog položaja merne zapremine (y_k), za najudaljenije tačke iznosi i do 100%. Promena ugla između prividne i stvarne komponente brzine, koja se meri iznosi i do 35%.

Pregled i analiza rezultata

Merenja su vršena duž horizontalne ose cevi (x) i u poprečnim presecima u ravnini yz po osi y . Merenja po osi z su izbegnuta obzirom na probleme objašnjene u prethodnom poglavlju i nemogućnost da se cevi ugrade u staklene kutije oblika pravougaonog paralelopeda, koje bi izvršile kompenzaciju nastalih promena. Rezultati su prikazani preko srednjih vrednosti brzina i stepena turbulencije.

Merenja u cevi sa simetričnim proširenjem

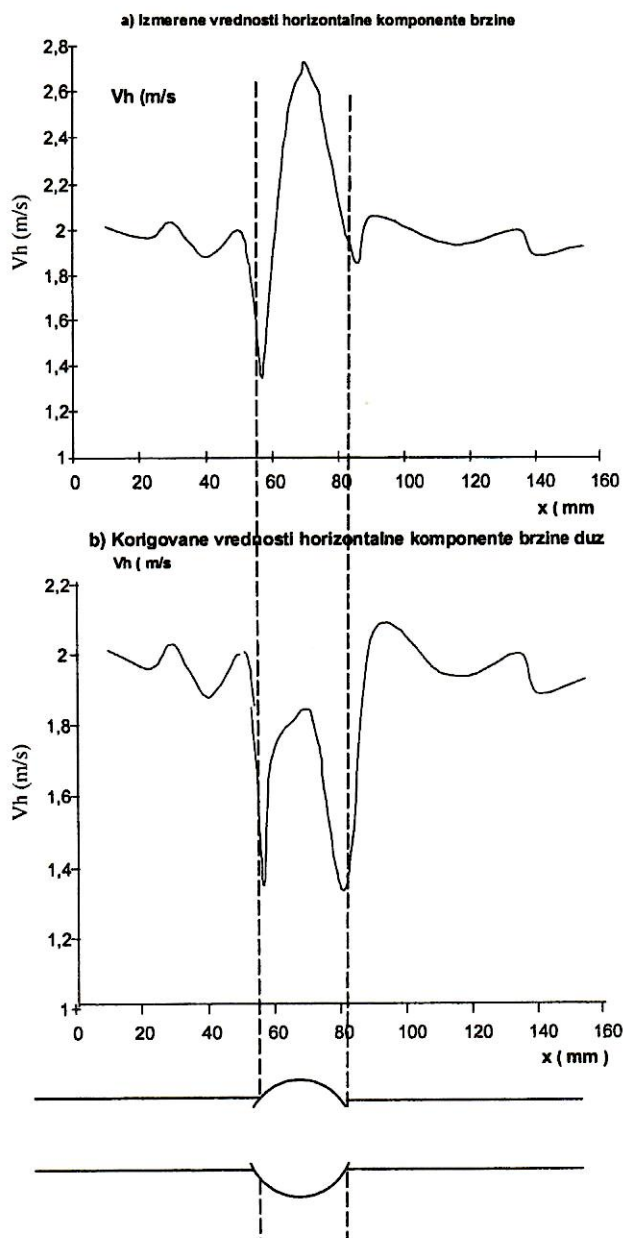
Na sl.10a je prikazana promena izmerene vrednosti brzine duž ose x cevi. Prema tom dijagramu, na mestu proširenja dolazi do neočekivanog porasta brzine, kao da se smanjuje efektivni prečnik toka. Međutim, kada se izvrši korekcija izmerenih vrednosti brzine dobija se dijagram na sl.10b. Prema njemu, kako se i očekivalo, vrednosti aksijalne komponente brzine na krajevima proširenja imaju oštar minimum, a brzina u centru proširenja je manja nego van njega.

Profil horizontalne komponente brzine van proširenja je uniforman, što je prikazano na sl.11. Reynoldsov broj na ovom preseku je blizu 1500. Na sl.11 data je, isprekidanom linijom, eksperimentalna zavisnost nivoa turbulencije od rastojanja od ose cevi.

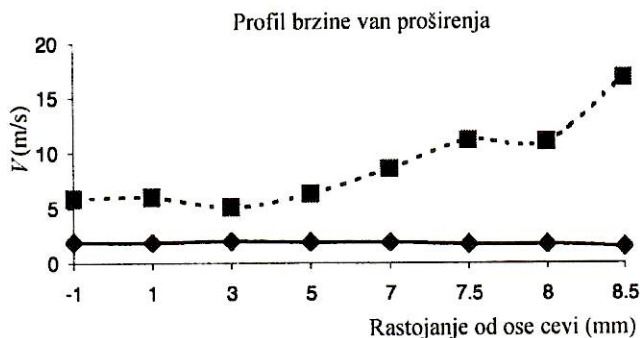
Merenje horizontalne komponente brzine u samom proširenju duž y pravca (po poprečnom preseku) dalo je vrednosti koje su na dijagramu na sl.12a prikazane isprekidanom linijom. Kada se uzmu u obzir stvarni položaji merne zapremine u toku merenja i uračuna promena ugla pod kojim se seku snopovi, dobijaju se vrednosti koje su na dijagramu prikazane krstićima. Da bi se istakla pravilnost te linije, na istom dijagramu je, punom linijom, prikazana raspodela brzina prema Poiseillevom zakonu.

Ovo potvrđuje da je na mestu proširenja laminaran tok okarakterisan Poiseillevom raspodelom brzina po poprečnom preseku. Na najvećem poprečnom preseku proširenja cevi Reynoldsov broj se smanjuje na blizu 1300, pa je tu i očekivan veći stepen laminarnosti toka. Konačno, tačnost

korigovane vrednosti brzine potvrđuje se i jednačinom kontinuiteta primenjenom na presek cevi van proširenja i na na najveći presek proširenja cevi.



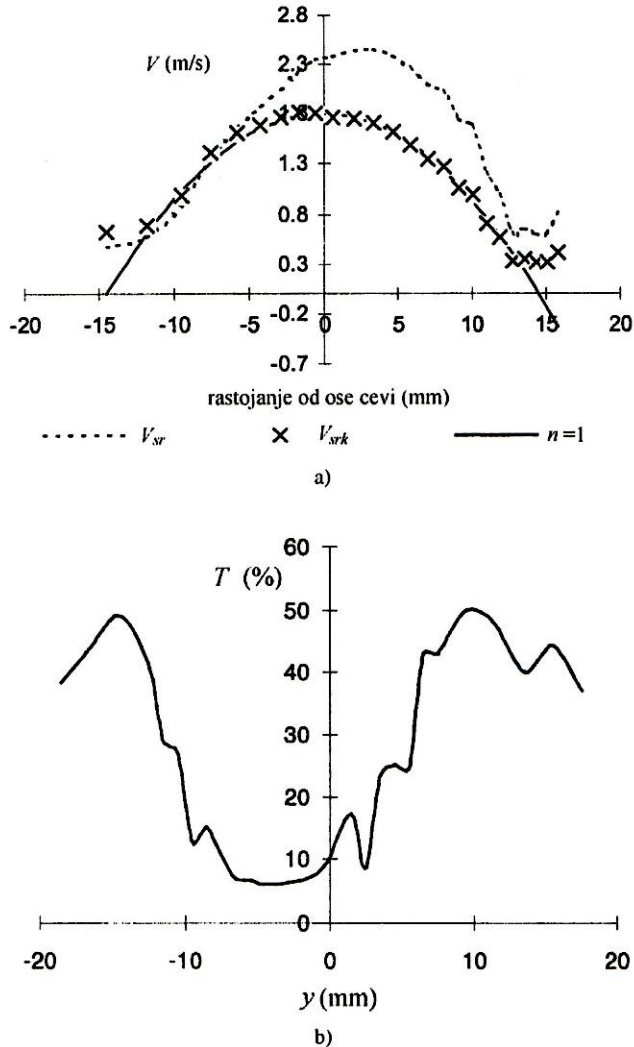
Slika 10.:Merenje horizontalne komponente brzine po uzdužnoj osi cevi



Slika 11. Merenje horizontalne komponente brzine po poprečnom preseku, van proširenja

Na sl.12b je prikazana turbulencija u funkciji rastojanja po y osi. Očigledno je da se o laminarnom kretanju može govoriti za područje oko centra proširenja (do 10 mm sa

svake strane centra proširenja). Prostor izvan ovog rastojanja ima izrazito visoku turbulenciju (do 50%), što govori da se tu stvorila mrtva zona, odnosno "džepovi", gde ne postoji strujanje laminarnog tipa. To su recirkulacione zone koje ogradauju laminarni tok i praktično ograničavaju prostor u proširenju gde prolazi glavna struja. Umesto nominalnih 32 mm u prečniku, realno se dobija 18-20 mm. Zbog toga, brzina u proširenju u centru iznosi 1,6 m/s, a u delu cevi sa konstantnim prečnikom (18 mm) iznosi 1,9 m/s.



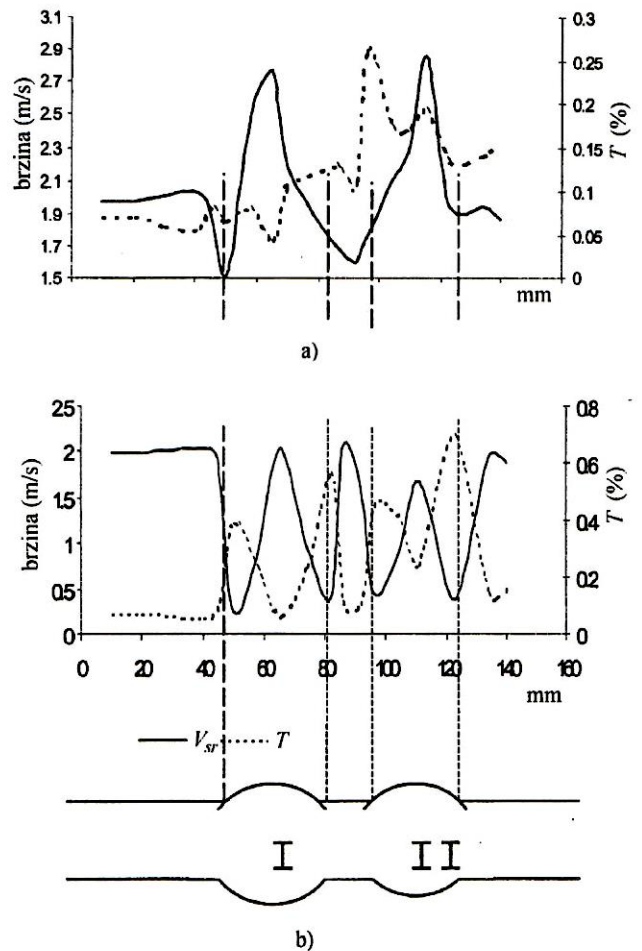
Slika 12. a) vrednosti brzine po najvećem poprečnom preseku proširenja: V_{sr} - izmerena srednja vrednost brzine, V_{srk} - korigovana vrednost srednje brzine; $n=1$ - raspodela brzine prema Poiseilleovom zakonu; b) nivo turbulencije horizontalne komponente merene unutar proširenja duž y pravca

Pomoću vazдушnih mehurića i anilinskih boja je izvršena vizualizacija strujanja. Snimci pokazuju [10-12] da postoje područja sa visokom turbulencijom, jer se tu zadržavaju mehurići i boje i da se realno veoma malo povećava prečnik toka na mestu fizičkog proširenja.

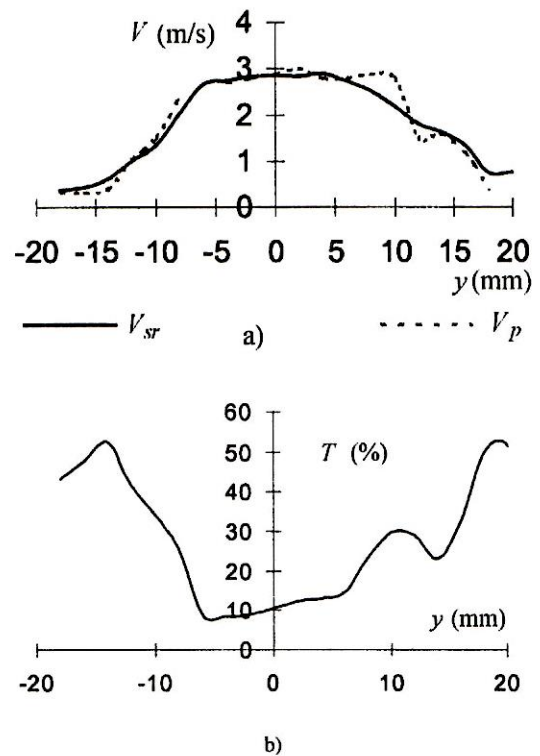
Merenje u cevi sa dva proširenja

Dijagram rezultata merenja brzine duž ose cevi, kao i profili brzina na najvećim poprečnim presecima proširenja, istog su oblika kao kod cevi sa jednim proširenjem. Primećuje se jedino da je nivo turbulencije u drugom proširenju znatno povećan (~30%) u odnosu na isti u prvom proširenju i proširenju u cevi sa jednim proširenjem.

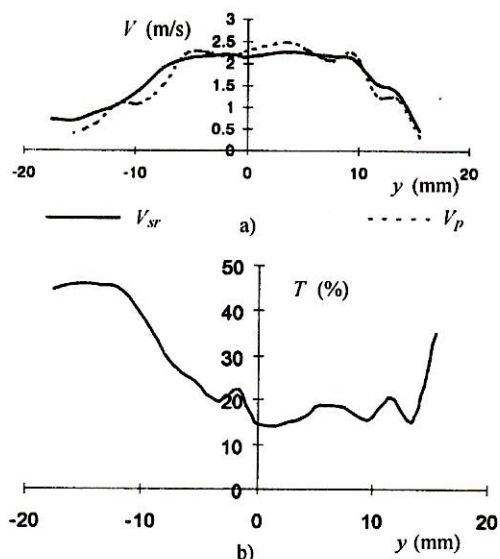
Na sl.13a prikazane su, bez korekcije, izmerene vrednosti brzine, a na sl.13b korigovane vrednosti brzine.



Slika 13. a) izmerene vrednosti brzine duž ose cevi sa dva proširenja, b) korigovane vrednosti brzine ose cevi sa dva proširenja, V_{sr} - srednja brzina, T - nivo turbulencije



Slika 14. a) horizontalna komponenta brzine merena duž y pravca na sredini prvog proširenja, b) nivo turbulencije horizontalne komponente brzine toka meren duž y pravca na sredini prvog proširenja



Slika 15. Brzina i nivo turbulencije u drugom proširenju: a) horizontalna komponenta brzine toka merena duž y pravca na sredini drugog proširenja; b) nivo turbulencije horizontalne komponente brzine toka meren duž y pravca na sredini drugog proširenja

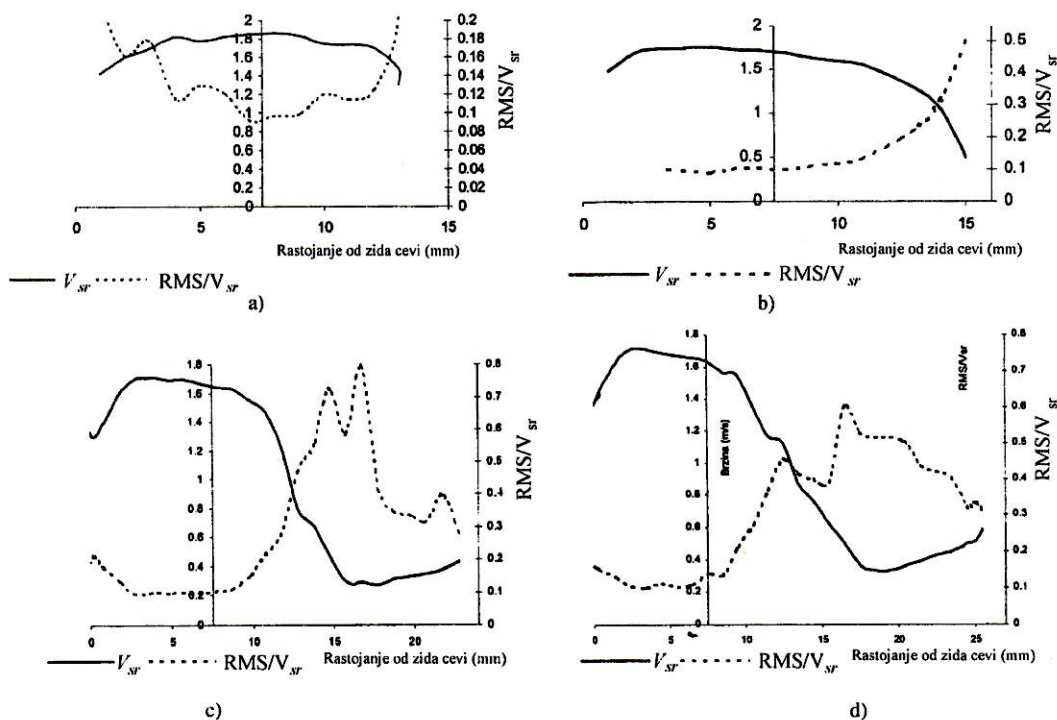
Merenja u cevi s asimetričnim proširenjem

Merenja u cevi s asimetričnim proširenjem se razlikuju od prethodna dva slučaja zbog toga što je ova cev od pirex stakla i što je zid proširenja veoma nehomogen. Pored neregularnog oblika, prilikom livenja došlo je i do pojava unutrašnjih naprezanja i deformacija, odnosno do izrazite neuniformnosti indeksa prelamanja svetlosti. Sve pobrajane neregularnosti su vidljive golim okom, a još su uočljivije kada se laserski snopovi i merna zapremina posmatraju kroz zidove proširenja.

Zbog toga je bilo nemoguće kao ulaznu ravan koristiti zid proširenja i izvršiti merenje brzinskog toka. Merenja su vršena tako da su laserski snopovi u cev uvedeni kroz suprotni zid. Problemi su se pojavili i pri odabiru ugla detekcije rasejane svetlosti. Izrazite nehomogenosti su deformisale sliku koju prijemna optika formira na fotomultiplikatorskoj cevi. Povećan je šum u odnosu na korisni signal i pogoršan je kvalitet merenja. Na to ukazuje i приметно povećanje nivoa turbulencije u oblasti proširenja (sl.16c i d). Komparativna analiza rezultata za sva tri tipa cevi pokazuje da je RMS najveći za cev sa asimetričnim proširenjem. To nije rezultat povećane turbulencije nego uticaj lošeg kvaliteta livenog zida proširenja.

Dijagram na sl.16a je snimljen u delu cevi sa konstantnim spoljnim prečnikom u tački sa koordinatima $(0,y,0)$ gde je y menjano od 0 do 13 mm, u tački na početku proširenja $(20,y,0)$ za y od 0 do 15 mm. Sledeći dijagrami su u samom proširenju, u tačkama sa $x=30$ mm i $x=40$ mm. Koordinata $z=0$ je u oba slučaja, a y se menja do 23, odnosno 26 mm u samom centru proširenja.

Analiza dijagrama izmerene turbulencije pokazuje da se ona kreće do 0.2 u delu cevi sa konstantnim prečnikom, a da se povećava na ≈ 0.8 za strujanje u proširenom delu, u tačkama neposredno uz zid cevi. Pored doprinosa nehomogenosti na povećanje vrednosti RMS, postoji i realni porast turbulencije u "džepovima" koji se formiraju unutar proširenja. Ovi džepovi, u stvari, predstavljaju mrtve zone u kojima ne postoji strujanje. Oni sužavaju tok na fizičkom proširenju cevi na dimenzije veoma bliske dimenzijama dela sa konstantnim prečnikom. Zbog toga ne dolazi do linearnog pada brzine strujanja u području proširenja u skladu sa jednačinom kontinuiteta, već do veoma blagog pada i suženja glavnog toka, što je indicacija da ne postoji pravo proširenje toka, kakvo se očekuje na osnovu fizičkog proširenja cevi.



Slika 16. Profil brzine na karakterističnim poprečnim presecima: a) profil brzine i nivo turbulencije u delu cevi sa konstantnim presekom ($x=0$ mm), b) profil brzine na kraju proširenja - 20 mm, c) profil brzine u tački na polovini rastojanja od ulaza u proširenje do najvećeg poprečnog preseka ($x=30$ mm), d) profil brzine u tački na najvećem poprečnom preseku ($x=40$ mm)

Zaključak

Kako je istaknuto u uvodnom delu, cilj autora je bio da ukažu na neke od problema koji se javljaju pri merenju brzine strujanja laser-Dopler anemometrijom. Poenta je stavljena na merenje brzine protoka u staklenim cevima različitog prečnika, oblika i kvaliteta zidova, odnosno na uticaj konfiguracije merene sredine na tačnost izmerenih vrednosti.

Iako je LDA metoda etalonske tačnosti, njena efikasna primena je diktirana postignutim uslovima merenja. Pokazano je da veoma značajnu ulogu ima kvalitet stakla od kojeg su izrađene cevi. Izražene lokalne nehomogenosti u staklu mogu dovesti do toga da se laserski snopovi mimođu u prostoru i da uopšte ne formiraju mernu zapreminu. U takvom slučaju, merenje je nemoguće. Nehomogenosti utiču i na pojavu visokog šuma i pogoršanje odnosa signal/šum, što, sa svoje strane, virtualno povećava nivo turbulencije.

Uticaj geometrija zidova cevi se ne sme zanemariti. Pokazano je da je neophodno odrediti korekcije za izmerene vrednosti brzine zbog dislokacije merne zapremine, promene kalibracione konstante i promene pravca merene komponente brzine strujanja. Izabrani metod korekcije se pokazao veoma dobrim, jer se posle njegove primene može govoriti o jednačini kontinuiteta duž staklene cevi.

Pored navedenih uticajnih faktora, na tačnost merenja LDA metodom utiču: izbor LDA sistema (njegove performanse), izbor geometrije primopredajnog modula, optička podešenost sistema, izabrana širina frekventnih filtara, način akvizicije i obrade podataka.

Svi faktori, od značaja za tačnost merenja LDA metodom, se mogu uzeti u obzir i uračunati u finalne vrednosti. Nepovoljan uticaj se može delimično ili potpuno prevazići, tako da se može smatrati da je LDA metoda od izuzetne važnosti u laboratorijama eksperimentalne aerodinamike, termodinamike, mehanike fluida i mnogim drugim oblastima nauke, tehnike i savremenog života.

Literatura

- [1] WATRASIEWICH, B.M. *Laser Doppler Measurement*. Butterworths, London, 1976.
- [2] BUCHAVE, P. Three Components LDA measurements. *DISA Information*, 1984, no.29, p.3-10.
- [3] RINKEVIČIUS, B.S. *Lazernaja anemometrija*. Energija, Moskva, 1978.
- [4] RISTIĆ, S., VITIĆ, A., GROZDANOVSKI, D. Baždarenje aerodinamičkog tunela pomoću IDLDA sistema. *Naučnotehnički pregled* 1989, vol.39, no.39, p.8-13.
- [5] RISTIĆ, S., VITIĆ, A., GROZDANOVSKI, D. Ispitivanje strujnog polja oko kugle pomoću LDA i Schlieren metode. *Naučnotehnički pregled*, 1990, vol.40, p.34-40.
- [6] GARDAVSKY, J., HRBEK, J., CHARA, Z., SEVERA, M. Refraction Corrections for LDA Measurements in Circular Tubes within Rectangular Optical Boxes. *Dantec Information*, Nov 1989., p.2-5.
- [7] RISTIĆ, S. Laser Doppler anemometrija. *Vojnotehnički glasnik*, 1991, no.5, p.529-536.
- [8] RISTIĆ, S., VITIĆ, A., GROZDANOVSKI, D. Ispitivanje strujnog polja u cilindričnoj cevi pomoću IDLDA. *Naučnotehnički pregled*, 1992, vol.42, no.7, p.3-13.
- [9] RISTIĆ, S., VITIĆ, A. Baždarenje aerodinamičkog tunela pomoću 3D LDA. XXXIII Etan u pomorstvu, Zadar, zbornik radova 26-28 juni 1991.
- [10] RISTIĆ, S., ILIĆ, J. *Merenje brzine strujanja u krvnim sudovima*. ETRAN, Zlatibor, zbornik radova, 1995, p.174-178.
- [11] RISTIĆ, S., SREČKOVIĆ, M., ILIĆ, J., ARANDJELOVIĆ, S. Laser Doppler Flow Velocity Measurement in normal and Blood Vessel Model with Atherosclerotic Protuberance and Obstacle. *Laser*, 1995 p.777-782.
- [12] Ristić, S., Ilić, J., Mladenović, M. *Odredjivanje parametara toka fluida u modelima krvnih sudova različitog oblika*. ETRAN, Budva, juni 1996, zbornik radova, no.4, p.208-211.
- [13] RISTIĆ, S., VITIĆ, A. *Analiza tačnosti merenja treće komponente brzine strujanja u trisoničnom aerotunelu pomoću 3D LDA*. Vazduhoplovstvo '97, 11-12. dec. 1997. zbornik radova, s.A100-A106

Rad primljen: 11.11.1999.god.