

ODREĐIVANJE PARAMETARA TOKA FLUIDA U MODELIMA KRVNIH SUDOVA RAZLIČITOG OBLIKA

Slojica Ristić, VTI Beograd

Jelena Ilić, Mašinski fakultet u Beogradu

Miša Mladenović, Elektrotehnički fakultet u Beogradu

Sadržaj - U radu se teorijski i eksperimentalno razmatra primena LDA merenja brzine strujanja u različitim modelima krvnih sudova. Određeni su parametri toka fluida, koji se prema teoriji sličnosti mogu primeniti u istraživanjima i dijagnostici oboljenja krvnih sudova ili u kreiranju veštačkih.

1. UVOD

Laserska Doppler Anemometrija (LDA) omogućava beskontaktno i vrlo efikasno merenje lokalne brzine u toku fluida [1], [2], [3]. Ako se ostvari geometrijska sličnost modela i krvnog suda i sličnosti strujnih linija ili pritiska u odgovarajućim tačkama, eksperimentalni rezultati merenja na modelima postaju primenivi na istraživanja fizioloških karakteristika strujanja krvi u krvnim sudovima. Sakupljanje lokalnih podataka može da da detaljniju sliku laminarnog ili turbulentnog kretanja fluida.

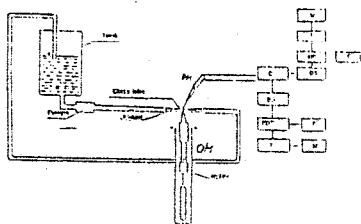
LDA ima nekoliko aspekata. Prvi se odnosi na nalaženje veze između parametara sredine i rasejanog zračenja i razvoj optimalnih rešenja za formiranje, transformaciju i obradu optičkih signala i interpretaciju rezultata. Drugi podrazumeva stvaranje etalonskih uređaja za merenje Dopplerovog pomeraja frekvencije. Konačno, zbog statističkog karaktera merenja neophodno je nalaženje srednjih vrednosti i disperzije parametara. Svaki pojedinačni praktični problem zahteva adekvatnu LDA konfiguraciju i postojanje centara rasejanja u prazračnom fluidu. Mogu se meriti jedna, dve ili tri komponente strujanja, nivo turbulencije kao i dimenzije i oblik čestica koje rasejavaju svetlost.

LDA sistemi se koriste u različitim oblastima nauke i tehnike. Najčešće nalaze primenu u aero i vodenim tunelima i u ispitivanju strujanja oko modela ili plovih objekata u eksploatacionim uslovima. Ali se takođe koriste i u drugim oblastima metrologije, zatim, u medicini, biologiji, ekologiji, meteorologiji, astronomiji, dinamici fluida, kod ispitivanja plamena mlaznika itd.

U eksperimentu su za modele korišćene staklene cevi pogodnih oblika. Za normalni krvni sud, kao model je korišćena cilindrična cev (prava ili sa krivinom- jednostrukom ili dvostrukom). Kao modeli obolelih krvnih sudova korišćeni su: cilindrična cev sa umetnutom preprekom (model ateroma) i cev so jednom ili dva proširenja (model aneurizme). Unutrašnji prečnik ovih cevi (van proširenja) iznosi 16mm što odgovara, približno, uobičajenom prečniku humane aorte. [4]

2. STRUKTURA LDA SISTEMA I EKSPERIMENT

Merenja su vršena jednokomponentnim LDA sistemom (1D LDA) čija je šema prikazana na sl.1. Na sl.2 prikazani su stakleni modeli krvnih sudova. Strujanje obezbeđuje rezervoar sa vodom i pumpom. Kao centri rasejanja služe mehurići vazduha.



Sl.1. Eksperimentalna konfiguracija 1D LDA sistema

Izvor svetlosti je He-Ne laser (15mW, $\lambda=633\text{nm}$, „Spectra Physics“). Pomoću optičkog modula OM (DANTEC) laserski snop se razdvaja na dva dela i ponovo fokusira na mernu zapreminu. Osnovne komponente [5] ovog modula su: zaštitni poklopec sa $\sqrt{4}$ pločicom, optika za podešavanje širine laserskog snopa, delitelj snopa, optički sistem za translaciju snopa i prednja optika. Za rad se ponekad koristi i tehnika rasejanja unazad tzv. „back scatter“ mod, i tada optičkom modulu treba dodati polupropusno ogledalo i prostorni filter i prijemnu optiku. PM je fotomultiplikatorska cev sa pripadnom optikom, interferencionim i prostornim filterima. Centri rasejanja moraju da imaju prečnik veći od $0,5\mu\text{m}$, da bi se izbegao uticaj Brownovog kretanja na Dopplerovu frekvenciju, a istovremeno on mora biti manji od $3\mu\text{m}$ radi vernog praćenja strujnog toka.

Da bi se postigla potrebna sličnost sa protokom krvi kroz krvni sud, brzina strujanja vode, uz jednake dimenzije modela i krvnog suda, mora biti tri puta manja od brzine strujanja krvi, čime se ostvaruje isti Reynoldsov broj.

3. KRATAK TEORIJSKI OSVRT

Rasejana svetlost, teorijski, može biti detektovana pod bilo kojim uglom u prostoru. Dopplerova frekvencija ne zavisi od ugla rasejanja, temperature i

gustine fluida. Indikatrisa rasejanja daje prostornu raspodelu snage rasejanog zračenja. Na osnovu relativne dimenzije čestica $\rho = 2\pi a/\lambda$, gde je a dijametar čestice, a λ talasna dužina upadnog zračenja. Rasejanje na sfernim, otički homogenim česticama je opisano Mieovom teorijom rasejanja [3]. Prema toj teoriji indikatrisa rasejanja ima složenu zavisnost od ugla posmatranja, pri čemu se ona usložnjava sa povećanjem dimenzije a i tada se povećava rasejanje u smeru upadnog zračenja, a smanjuje u suprotnom. Na osnovu zavisnosti faktora efikasnosti rasejanja Q ($Q = \sigma/\pi a^2$, σ - totalni presek rasejanja) od relativne dimenzije čestica, zaključuje se da čestice najefikasnije rasejavaju kada im je radijus reda veličine talasne dužine zračenja. Obično iz praktičnih razloga nije moguće ostvariti ugao $\theta = 0$, pa se fotodetektor postavlja pod različitim uglovima, tj. bira optimalni [6].

Signal sa fotodetektora dolazi na brojač C u kome se vrši primarna obrada signala. Na osnovu zadatih parametara na pojedinim modulima brojača selektuju se signali po frekvenciji i amplitudi. Zatim se preko buffer interfejsa BI podaci prosledjuju u računara. Rezultati se prikazuju u obliku histograma ili u obliku izmerenog signala u vremenskom domenu.

Srednja brzina strujanja i nivo turbulencije su osnovni parametri koji karakterišu svako strujanje. Za stacionarno strujanje tečnosti kroz cev konstantnog prečnika može se teorijski odrediti profil brzine, tj. raspodela brzine $V(r)$, korišćenjem Navier-Stokesovih jednačina. Ako se osa cevi poklapa sa x-osom, brzina tečnosti V orijentisana je po x-osi i zavisi samo od y i z

koordinate pod uslovom da je $\frac{dP}{dx} = -\frac{\Delta P}{l} = \text{const}$,

ΔP je razlika pritiska na krajevima cevi dužine l .
Kako je $\frac{\partial P}{\partial y} = \frac{\partial P}{\partial z} = 0$, Navier-Stokesova jednačina se svodi na:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = \frac{1}{\mu} \frac{dP}{dx} \quad (1)$$

odnosno u polarnim koordinatama:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dV}{dr} \right) = -\frac{\Delta P}{4\mu l} \quad (2)$$

čijim se rešavanjem dobija:

$$V = \frac{\Delta P}{4\mu l} (R^2 - r^2) \quad (3)$$

U konkretnom eksperimentu izmereni su ΔP i / pri čemu je $\Delta P = 18,1 \text{ Pa}$, $\mu = 1,75 \cdot 10^{-3} \text{ N s/m}^2$, $l = 0,15 \text{ m}$, $R = 18 \text{ mm}$. Dakle profil brzine ima paraboličnu zavisnost rastojanja od sredine cevi.

Eksperimentalno se brzina centara rasejanja određuje kao $V = C f_d$, gde je C kalibraciono

konstanta 1D LDA sistema i iznosi $C = \lambda/2 \sin \frac{\alpha}{2}$, pri

čemu je α ugao pod kojim se presecaju snopovi u mernoj zapremini, a f_d je Dopplerov frekventni pomeraj u rasejane svetlosti. Za određivanje prave vrednosti srednje brzine, zbog uticaja slučajnih signala i šumova treba vršiti što veći broj merenja. U ovom eksperimentu merenja i obrada sa PDP sistemom su rađeni na osnovu 10 blokova, odnosno 2048 signala.

Turbulencije su ocenjene na osnovu srednjeg kvadratnog odstupanja brzine:

$$RMS = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N |\Delta V_i|^2} \quad |\Delta V_i| = |V_{sk} - V_i| \quad (4)$$

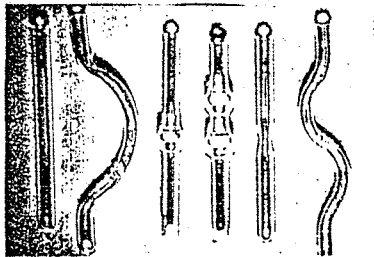
Tada je nivo turbulencije:

$$T_u(\%) = \frac{RMS}{V_{sr}} \cdot 100 \quad (5)$$

Mogućnost nastojanja turbulencija u modelima krvnih sudova je od značaja, jer one u kvretaku povećavaju rizik stvaranja tromba. Kritično konfiguracija za nastojanje turbulencija je grananje širokog krvnog suda, gde se već pri $Re = 200$ javljaju turbulencije. Karakterističan primer je grananje aorte abdominalis na levu i desnu iliace communalis, gde pojava tromba sprečava dovod krvi u donje ekstremitete.

4. REZULTATI MERENJA I DISKUSIJA

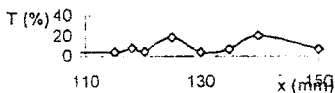
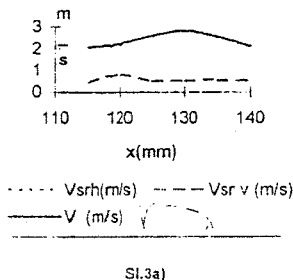
Na slici 2. su prikazane cevi koje su korišćene kao modeli krvnih sudova. Načinjeno su od kvarcnog stakla, a naša saznanja su pokazala da je od većeg interesa za buduća ispitivanja koristiti cevi od prozračnog elastičnog materijala kako bi se obezbedilo maksimalna sličnost sa pripodom krvnih sudova [7], [8].



Sli.2. Staklene cevi korišćene kao modeli krvnih sudova.

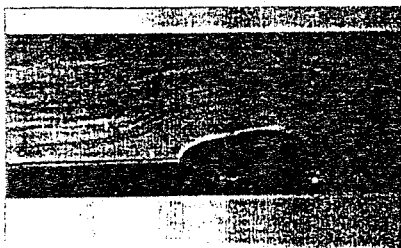
Rezultati merenja toka fluida oko prepreke u cilindričnoj cevi konstantnog prečnika, prikazani su na slici 3. Na slici 3a) su uporedo date srednje vrednosti horizontalne komponente (gusto isprekidana linija- $V_{x, \text{sr}}$), vertikalne komponente (ređe isprekidana linija- $V_{z, \text{sr}}$) i vektora brzine (puna linija- V). Dijagram koji prikazuje nivo turbulencije (slika 3b) se odnosi na horizontalnu komponentu, a nivo ukupne turbulencije je još viši.

Ovi rezultati ilustruju kretanje krvi u okolini ateroma i ukazuju na eventualne posledice izmenjenog protoka krvi usled promena na krvnim sudovima, kao i na mesta povećanja turbulencije na kojima je povećan rizik nastajanja tromba (sl.3b).



Sl.3b) Nivo turbulencije horizontalne komponente brzine

Na slici 4. je fotografija sa snimljenim efektima vizualizacije strujanja oko prepreke. Vizualizacija je vršena ubacivanjem rastvora anilinskih boja ili mehurića vazduha uzvodno od merne zapremine.

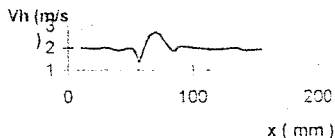


Sl.4. Vizualizacija strujanja fluida oko prepreke

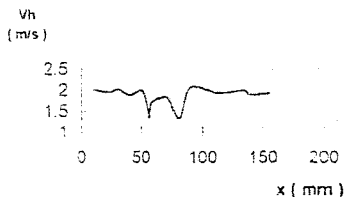
Još jedan primer je vrlo ilustrativan. To je slučaj cevi sa proširenjem koje modeluje aneurizmu. Ispitivanje karakteristike strujanja je ograničeno na merenje komponente brzine strujanja paralelne sa x osom (horizontalna komponenta). Postoji više faktora koji utiču na tačnost izmerenih rezultata. Pre svega, treba naglasiti složenost strujanja u predelu početka i kraja proširenja i formiranje turbulentnih džepova u

blizini zidova cevi zbog velikog ugla skretanja struje fluida. Rezultati merenja prikazani na slici 5a) se odnose na tačke duž ose cevi sa proširenjem. U predelu proširenja, na dužini između 60 i 80mm, dolazi do povećanja brzine umesto smanjenja, što bi se realno očekivalo na osnovu jednačine kontinuiteta. Paradoksalne vrednosti su delimično rezultat uticaja zakrivljenosti zidova cevi, koji u predelu proširenja utiču na promene kalibracione konstante sistema. Zakrivljeni stakleni zidovi menjaju pravac prostiranja laserskih snopova i otežavaju preciznu lokaciju mernu zapreminu. Takođe se menja i ugao presicanja snopova. Na osnovu literature [9] unešene su korekcije izmerenih vrednosti, a dobijeni rezultati su prikazani na slici 5b). Očigledno je da u predelu proširenja dolazi do smanjenja brzine (tu je oko 1,8 m/s umesto oko 2m/s što predstavlja brzinu u predelu sa konstantnim prečnikom), međutim ne u očekivanom iznosu. To upućuje na zaključak da je stvarno proširenje strujnica manje od proširenja same cevi, zbog složenosti strujanja i stvaranja mrtvih zona, naročito na bočnim delovima početka proširenja. U ovom predelu je nivo turbulencije takođe povećan.

a) Izmerene vrednosti horizontalne komponente brzine duž ose cevi



b) Korigovane vrednosti horizontalne komponente brzine duž ose cevi



Sl.5.

Da je uvedena korekcija izmerenih rezultata od bitnog značaja, pokazuje i slika 6. Izmerene vrednosti srednje brzine po najvećem porednom preseku proširenja, u zavisnosti od rastojanja od ose cevi, su predstavljene isprekidanom linijom. Korigovani rezultati, prikazani krstićima na sl.6., se skoro idealno poklapaju sa očekivanim Poiseuille-ovom raspodelom,

koja je prikazana punom linijom. Nekorigovane vrednosti V_r odstupaju od nje i do 30%.

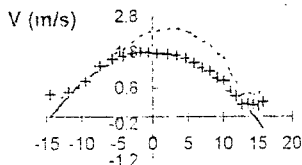
5. ZAKLJUČAK

Ispitivanja, čiji su rezultati prikazani u ovom radu, su preliminarno ispitivanja koja obuhvataju veoma kompleksan problem. Pokazalo se da karakterizacija strujanja u modelima krvnih sudova može dati veoma korisne informacije o strujanju u krvnim sudovima ili u sistemima gde postoji promena konfiguracije osnovne cevi.

Dobijeni rezultati mogu se koristiti za modeliranje veštačkih krvnih sudova, odnosno umetaka.

Sledeća etapa obuhvata merenja strujnih parametara u cevima koje će biti, prema fizičkim karakteristikama, još sličnije krvnim sudovima i merenja sa fluidima različite viskoznosti.

Vrednosti brzine po najvećem poprečnom preseku proširenja: V_{sr} - izmerena srednja vrednost brzine; V_{srk} - korigovana vrednost srednje brzine; $n=1$ - raspodela brzine prema Poiseuille-ovom zakonu



rastojanje od ose cevi
(mm)

..... V_{sr} + V_{srk} — $n=1$

Sl.6.

Merenja sve tri komponente brzine strujanja, obezbedila bi određivanje vektora brzine, odnosno pravu sliku vektora brzine. U tu svrhu je neophodno koristiti 3D LDA sistem (ili, u najmanju ruku 2D LDA za asimetrične profile cevi).

Posebnu pažnju treba obratiti na generatore šuma i njihove uticaje na rezultate.

LITERATURA

- [1] B.S. Rinkevičius, *Lazerna anemometrija*, Moskva: Energija, 1978.
- [2] B.M. Watrasiewicz, M.J. Rud, *Laser Doppler Measurements*, London-Boston: Butterworths, 1976.
- [3] F. Durst, A. Mellling, J.H. Whitelaw, *Principles and Practice of Laser Doppler Anemometer*, London: Academic Press Inc., 1976.
- [4] A.G. Guyton, *Medicinska fiziologija*, Beograd-Zagreb: Medicinska knjiga 1990.
- [5] DISA, *Laser Doppler Anemometer*, katalog.
- [6] S. Ristić, J. Ilić, "Merenje brzine strujanja u modelima krvnih sudova pomoću 1D LDA", *Zbornik radova ETRAN 1995.*, 174-178.
- [7] M.H. Koelink et al., "Laser Doppler blood flowmetry using two wavelengths: Monte Carlo simulations and measurements", *App. Opt.* Vol.33, No.16, 1 June 1994., 3549-3555.
- [8] S. Ristić, M. Srecković, J. Ilić, S. Arandelović, "Laser Doppler Flow Velocity Measurement in Normal and Pathological Blood Vessel Models", *Proc. of the International Conference on Lasers 95.*
- [9] J. Gardavsky, J. Hrbek, Z. Chora, M. Severa, "Refraction Correction for LDA Measurements in Circular Tubes within Rectangular Optical Boxes", *Dantec Information*, Nov 1989., 2-5.

Abstract - The paper considers experimentally and theoretically the application of the LDA measurement to various blood vessels models. The parameters of the fluid flow were determined which through the similarity theory could be applied in researches and diagnostic of the disease of blood vessels or in the creation of artificial ones.

THE DETERMINATION OF FLUID FLOW PARAMETERS IN THE BLOOD VESSEL MODELS OF A VARIOUS SHAPE

Slavica Ristić, Jelena Ilić, Miša Mladenović