

Ispitivanje mogućnosti primene LDA metode za određivanje koeficijenta pritiska na modelu lopatice brzohode osne pumpe

Dr Slavica Ristić, dipl.inž.¹⁾
Dr Mirko Kozić, dipl.inž.¹⁾

Prikazani su rezultati teorijskog i eksperimentalnog određivanja raspodele koeficijenta pritiska C_p na modelu profila lopatice brzohode osne pumpe. Ispitivanje koeficijenta C_p je značajno zbog određivanja kavitacionog broja i ispitivanja pojave kavitacije. Hidroprofil je deo modela prave profilne rešetke postavljene u radnom delu vodenokavitacionog tunela (VKT). Koeficijent C_p je određen na osnovu brzine merene laser Doppler anemometrijom (LDA). Teorijski proračun je raden pomoću dve metode: panel metoda »MORINO« i programom »TOK«. Izvršena je komparativna analiza teorijskih i eksperimentalnih rezultata, jer je osnovni cilj ispitivanja bio da se demonstriraju potencijalne mogućnosti primene Laser Doppler anemometrije u određivanju C_p . Pokazalo se da ova metoda ima ograničenu primenu i da je pouzdana samo u pojedinim područjima strujanja oko modela, zbog indirektnog izračunavanja pritisaka i zbog nekompatibilnog anemometarskog sistema koji se koristio u eksperimentu.

Ključne reči: Koeficijent pritiska, osna pumpa, laser Doppler anemometrija, panel metoda »MORINO«, metoda konačnih razlika »TOK«.

Korišćene oznake i simboli

V_∞	– brzina u neporemećenoj struji fluida
P_∞	– statički pritisak u neporemećenoj struji fluida
P_s	– lokalni statički pritisak
V_Z	– vertikalna komponenta vektora brzine
V_h	– horizontalna komponenta brzine
\mathbf{V}	– vektor brzine
a	– lokalna brzina zvuka
C_p	– koeficijent pritiska
q_∞	– dinamički pritisak u neporemećenoj struji fluida
ρ	– gustina fluida
r	– rastojanje merne tačke do koordinatnog početka
x, y, z	– Dekartove koordinate
$\frac{\partial p}{\partial n}$	– gradijent pritiska u pravcu normale
Φ	– poremećajni potencijal brzine
σ	– kavitacioni broj
Φ	– ukupni potencijal brzine
S	– površina tela
S_w	– površina vrtložnog traga
R	– rastojanje između dve tačke
N	– broj panela
Σ_k	– površina panela
Σ_k''	– površina polubeskonačnog stripa
\vec{n}	– normala na površini profila
\vec{n}_w	– normala na vrtložnom tragu
β_p	– napadni ugao hidroprofila
β_r	– ugao između rešetke i pravca struje

t	– indeks za teorijske vrednosti
e	– indeks za eksperimentalne vrednosti

Uvod

PORED određivanja osnovnih geometrijskih karakteristika radnog kola osne pumpe, da bi pumpa mogla da ostvari zahtevane karakteristike neophodno je da se vrši detaljno proučavanje hidroprofila koji su uzeti u profilisanju lopatica. Postoje različiti pristupi pri izboru hidroprofila. Prvo se vrši proračun radnog kola, odnosno zakola pumpe, da bi se dobio optimalni oblik hidroprofila, njegova stvarna veličina i položaj. Nakon izrade, koriste se eksperimentalne metode za proveru proračuna i proveru preciznosti izrade modela hidroprofila. Pri tome se ispituju svi značajni parametri hidroprofila među kojima i koeficijent pritiska C_p , koji predstavlja bezdimenzionalni pritisak (računa se kao razlika između lokalnog statičkog pritiska i statičkog pritiska neporemećene struje, podeljena s dinamičkim pritiskom neporemećene struje).

Određivanje raspodele C_p je značajno za proračun opterećenja lopatica, ispitivanje karaktera graničnog sloja, za dobijanje kritičnog koeficijenta pritiska C_{pk} , odnosno kritičnog Mahovog broja, određivanje kavitacionog broja i za preveniranje i praćenje pojave površinske kavitacije. Poznato je [1-3] da se kavitacija pojavljuje na mestima gde pritisak tečnosti na površini modela hidroprofila postane jednak pritisku isparavanja vode, koji na toj temperaturi odgovara pritisku pare. To je složena pojava koja se tokom normalnog rada pumpi javlja u usisnom delu pumpe, na napadnoj ivici lopatica, kao i na njihovoj leđnoj strani. Pojava kavitacije kod osnih pumpi dovodi do opadanje radnih karakteristika. Na mestima sa kavitacijom dolazi do

¹⁾ Vojnotehnički institut VJ, 11000 Beograd, Katanićeva 15

znatnih oštećenja, do zamora materijala i promene strukture. Pojava kavitacije pre svega zavisi od geometrijskih karakteristika profila, a može biti izazvana i nepravilnim postavljanjem pumpe u odnosu na slobodnu površinu tečnosti, korišćenjem pumpe na većim nadmorskim visinama od projektovanih, ili smanjenjem pritiska u usisnoj instalaciji ako pumpa radi u zatvorenom sistemu. Povećanje protoka u pumpi isto tako izaziva smanjenje pritiska, a povećanja brzine i temperature fluida mogu biti važni faktori koji će ubrzati pojavu kavitacije na mestima gde postoje konstrukcioni preduslovi.

Zbog nemogućnosti da se izvrše klasična merenja vektora brzine strujanja vode kroz pravu pumpu i merenja raspodele pritiska na glavčini i lopaticama, da bi se odredio koeficijent raspodele pritiska C_p , a imajući u vidu teorijske aproksimacije [1-10], pristupilo se izradi modela prave profilne rešetke brzohode pumpe, koju proizvodi firma *Jastrebac*.

U VKT [4] je vršeno ispitivanje polja vektora brzine relativnog strujanja kroz model prave profilne rešetke brzohode osne pumpe [10]. Proširenje eksperimenta, čiji su rezultati prikazani u literaturi [10] je izvršeno da bi se odredila kriva raspodele C_p oko profila, i da se sagledaju mogućnosti koje pruža LDA u tom pogledu. LDA je metoda koja se uspešno koristi za određivanje vektora brzine strujanja u složenim strujnim poljima [7-14]. U okviru laboratorija eksperimentalne aerodinamike razvija se metoda bezkontaktnog određivanja C_p u čijoj osnovi se nalazi merenje vektora brzine LDA metodom [10,13]. Na krilu modela aviona *G4* i na njegovom hrptu određivana je raspodela C_p [13] i pokazano da su dobijeni rezultati zadovoljavajući. Međutim za uvođenje LDA metode u proces standardnih metoda koji se koriste u laboratorijama *Vojnotehničkog instituta*, neophodno je sveobuhvatnije ispitivanje i testiranje opravdanosti primene ove metode u određivanju C_p za složene modele. Zbog toga u okviru ovog ispitivanja, uporedo s eksperimentom izvršen je i teorijski proračun raspodele koeficijenta pritiska C_p panel metodom "MORINO" [5,6]. Dobijeni rezultati su provereni programskom metodom «TOK» (konačne razlike). Pri tome nije uzet u obzir međusobni uticaj profila u pravoj profilnoj rešetki, pošto je izabrani korak u rešetki to dozvoljavao.

Detaljan opis izrade izabranog modela eksperimenta i metode merenja dat je u literaturi [10].

Za određivanje C_p model je postavljen tako da se nagibni ugao profila (sl.1) u modelu prave profilne rešetke (sl.2) poklapa s napadnim uglom struje fluida. Za druge nagibne uglove [2,4,10] dolazi do otepljenja struje oko profila i ne može da se odredi C_p po celoj dužini. Merenja su vršena duž profila u središnjem delu modela, gde je strujanje praktično dvodimenzionalno. Mere se dve komponente brzine strujanja fluida (horizontalna i vertikalna).

U izračunavanju C_p koristi se brojčana vrednost vektora lokalne brzine izmerene u tačkama oko središnjeg profila [10].

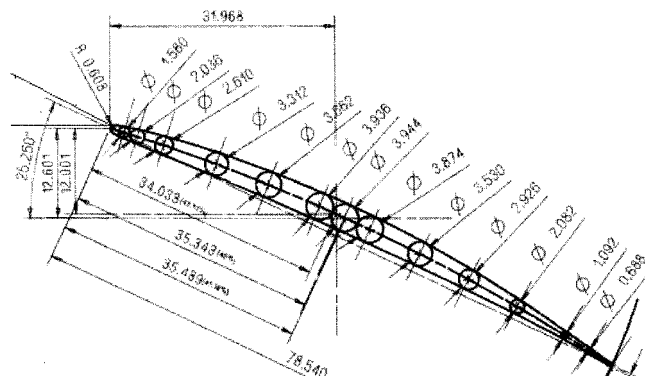
Komparativna analiza teorijskih i eksperimentalnih rezultata je pokazala prednost i nedostatak uvođenja LDA metode pri određivanju C_p u odnosu na klasičnu metodu merenja lokalnih pritiska pomoću sistema rupica i davača pritiska.

Teorijske metode proračunavanja C_p

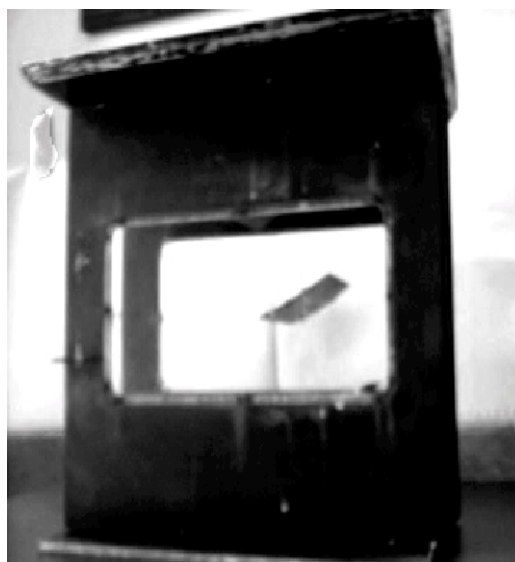
Postoji veliki broj metoda za numeričko određivanje koeficijenta pritiska C_p [5,6]. Da bi se proverile eksperimentalne vrednosti koeficijenta pritiska, korišćene su dve numeričke metode. Panel metoda »MORINO«

napravljena je u *Vojnotehničkom institutu VJ* i koristi se za određivanje podzvučnog, nevtložnog strujnog polja oko složenih konfiguracija. Potencijalno, nevtložno strujanje nestišljivog fluida opisano je Laplasovom jednačinom:

$$\nabla^2\phi = 0 \quad (1)$$



Slika 1. Hidroprofil osne pumpe



Slika 2. Model prave profilne rešetke

gde je φ poremećajni potencijal brzine. Umesto rešenja ove parcijalne diferencijalne jednačine, korišćenjem Grinove teoreme, problem se svodi na rešavanje integralne jednačine po nepoznatom potencijalu na okvašenoj površini tela. Na ovaj način je znatno olakšana primena graničnih uslova oko složenih konfiguracija. Integralna jednačina ima oblik:

$$2\pi\varphi(P) = \iint_S \left(\frac{\partial\varphi}{\partial n} \right)_Q \frac{1}{R(P,Q)} dS_Q + \iint_{S_W} \varphi_Q \frac{\partial}{\partial n_Q} \left(\frac{1}{R(P,Q)} \right) dS_Q + \iint_{S_W} \Delta\varphi_W \frac{\partial}{\partial n_W} \left(\frac{1}{R(P,Q)} \right) dS_{W_Q} \quad (2)$$

gde je R rastojanje između tačke P na površini tela u kojoj se izračunava poremećajni potencijal i proizvoljne tačke Q na površini tela ili vrtložnog traga:

$$R = \left[(x_P - x_Q)^2 + (y_P - y_Q)^2 + (z_P - z_Q)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Površina tela je označena sa S , a vrtložnog traga sa S_W , dok je \vec{n} normala usmerena u strujno polje, a \vec{n}_W normala usmerena naviše na vrtložni trag. U jednačini (2) $\Delta\varphi_W$ označava skok potencijala. Uz uslov da nema razlike pritiska na vrtložnom tragu, skok potencijala $\Delta\varphi_W$ je konstantan duž strujnice i jednak skoku potencijala na izlaznoj ivici. Sada integralna jednačina (2) povezuje nepoznati poremećajni potencijal φ na površini tela, s njegovim normalnim izvodom $\frac{\partial\varphi}{\partial n}$, koji se dobija iz graničnog uslova tangencijalnosti strujanja na površini tela datim kao:

$$\frac{\partial\varphi}{\partial n} = -V_\infty \vec{n} \quad (4)$$

Numerički postupak počinje podelom površine tela na male četvorostrane elemente—panele. Pretpostavlja se da su nepoznati poremećajni potencijal φ i njegov normalni izvod $\frac{\partial\varphi}{\partial n}$ konstantni preko svakog panela i jednaki vrednostima ovih u jednoj tački elementa (težište). Primajući metod kolokacije, integralna jednačina je zadovoljena u težištima panela $P=P_h$, i svodi se na sistem alebarskih jednačina dat kao:

$$[\delta_{hk} - c_{hk} - w_{hk}] \{\varphi_{hk}\} = [b_{hk}] \left[\left(\frac{\partial\varphi}{\partial n} \right)_k \right], \quad h, k=1,2,3,\dots,N \quad (5)$$

gde je N ukupan broj panela, a

$$\delta_{hk} = \begin{cases} 0 & h \neq k \\ 1 & h = k \end{cases} \quad (6)$$

Uticajni koeficijenti su dati kao :

$$c_{hk} = \left[\frac{1}{2\pi} \iint_{\Sigma_k} \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{R} \right) d\Sigma_k \right]_{P=P_h} \quad (7)$$

$$b_{hk} = \left[-\frac{1}{2\pi} \iint_{\Sigma_k} \frac{1}{R} d\Sigma_k \right]_{P=P_h} \quad (8)$$

$$w_{hk} = \left[\pm \frac{1}{2\pi} \iint_{\Sigma_k} \frac{\partial}{\partial n_w} \left(\frac{1}{R} \right) d\Sigma'_k \right]_{P=P_h} \quad (9)$$

gde su Σ_k površina panela, Σ'_k površina polubeskonačnog stripa vrtložnog traga, i gde se kod w_{hk} pozitivan znak uzima za panel koji dodiruje izlaznu ivicu s gornje strane, a negativan s donje strane.

Na osnovu izračunatih vrednosti poremećajnog potencijala na svim panelima, određuju se brzina i pritisak, a zatim aerodinamički koeficijenti.

Na teorijskim su dijagramima brojevima dati rezultati za $V_\infty=5.4$ m/s i napadne uglove $\beta_p=0^\circ$ i $\beta_p=12.5^\circ$ u poglavlju o analizi rezultata. S obzirom na teorijske osnove metode treba imati u vidu da poređenje raspodele pritiska dobijenih opisanom metodom s rezultatima eksperimenata ima smisla samo dok ne dođe do odvajanja struje, odnosno u linearnom domenu napadnih uglova za koje je model potencijalnog strujanja prihvatljiv; u tom slučaju mogu se uporediti koeficijenti pritiska samo do tačke odvajanja struje. Cela rešetka je zamenjena s tri profila, što je opravdano s obzirom na parametar koji daje odnos koraka rešetke prema referentnoj tetivi. Profil osne brzohode pumpe je podeljen na 500 panela, s tim što je na gornjaci bilo 25 segmenata a na donjaci isto 25. Kao rezultat data je raspodela koeficijenta pritiska C_p (bezdimenzionalna veličina) duž gornjaka i duž donjaka profila pumpe.

Rezultati dobijeni programom »MORINO« su verifikovani programom »TOK« (konačne razlike) za osamljeni profil (ne profilnu rešetku) za oba napadna ugla.

Program »TOK« rešava punu potencijalnu jednačinu metodom konačnih razlika. Pretpostavljajući bezvrtložno strujanje, može se uvesti ukupni potencijal brzine Φ , koji u oblastima glatkog strujanja zadovoljava kvazilinearnu potencijalnu diferencijalnu jednačinu, koja je za dvodimenzionalno strujanje :

$$(a^2 - u^2)\Phi_{xx} - 2uv\Phi_{xz} + (a^2 - v^2)\Phi_{zz} = 0 \quad (10)$$

a je lokalna brzina zvuka.

Na čvrstoj površini rešenje mora da zadovolji Nojmanov granični uslov:

$$\frac{\partial\Phi}{\partial n} = 0 \quad (11)$$

Treba reći da u odsustvu diskontinuiteta (udarni talas) gornja jednačina zadovoljava jednačine održanja mase i količine kretanja. Ovaj program je napravljen za određivanje transsoničnog strujanja oko krila [5].

Eksperimentalna merenja

Jednokomponentni LDA sistem koji se koristi za merenje brzine strujanja može da meri brzine fluida od 0.01 m/s do 300 m/s. Merna sonda kod ovog sistema su laserski zraci, koji se seku u jednoj tački u prostoru i definišu mernu tačku. U toj tački meri se brzina bez narušavanja složenog strujnog polja. Za sistem koji se koristi u ovom eksperimentu, "merna tačka" odnosno merna zapremina ima sledeće parametre: $dx=0.88$ mm, $dy=0.88$ mm, $dz=12.4$ mm, $N=49$. "Merna tačka", tj. njene dimenzije su najznačajniji element koji diktira kvalitet eksperimentalnih rezultata u smislu njihove primene za određivanje C_p .

Poznat, klasičan način određivanja C_p za aeroprofil ili hidropofil jeste merenje lokalnih statičkih pritiska p na

površini modela, statičkog pritiska p_∞ i dinamičkog pritiska q_∞ neporemećene struje. Za proračun se koristi jednostavna relacija:

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{q_\infty} \quad (12)$$

Iz literature [1-3,5] je poznato da se C_p može odrediti i preko lokalnih brzina. Za nestišljiv fluid se može koristiti sledeća formula:

$$C_p = 1 - \frac{V^2}{V_\infty^2} \quad (13)$$

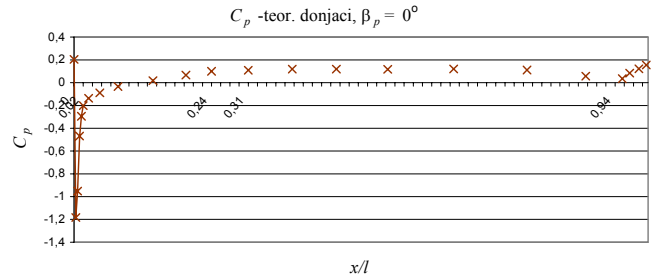
gde su V i V_∞ brzine izmerene pomoću LDA u tačkama neposredno uz površinu profila (ali izvan graničnog sloja) V i u neporemećenoj struji V_∞ .

Pošto je V lokalna brzina strujanja fluida u prostoru neposredno uz konturu modela, jako je važno da se "merna tačka" što više približi površini modela. Minimalno rastojanje na koje može da se postavi centar merne zapremine ($dx=dz=0.88$ mm $dy=1.2$ mm) iznosi oko 0.5 mm, a to znači da se mora hipotetički uzeti da je merena brzina na minimalnom rastojanju od 0.5 mm. U praksi to nije ostvarljivo po celoj konturi jer je raspon 2D profila u modelu profilne rešetke 100 mm. Ugao pod kojim se sreću laserski snopovi je 2° , a prečnik snopova 1 mm. To znači da se centar merne zapremine nalazi na minimalnom rastojanju od oko 2.0 mm, u području gde su napadna i izlazna ivica modela, a 0.5 mm na leđnoj i grudnoj strani za horizontalnu komponentu brzine. Za vertikalnu komponentu je obrnuto. Ako se merenje vrši tako da je bliže bočnim zidovima modela, onda se rastojanje od 2.2 mm može smanjiti na oko 1 mm, s tim što se uslovi merenja pogoršavaju zbog povećanog nivoa šuma u signalu i zbog graničnog sloja na bočnim zidovima modela. Ovo je element koji se mora imati u vidu prilikom interpretacije eksperimentalnih rezultata i njihovog upoređivanja s teorijskim.

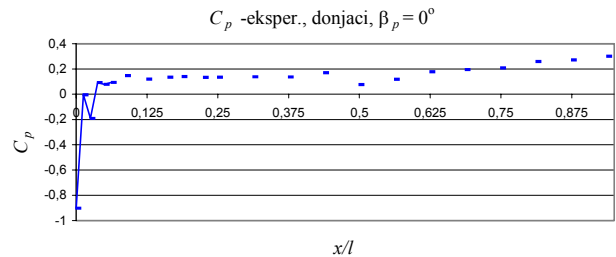
Optimalan broj signala na osnovu kojih je izračunata svaka komponenta brzine strujanja je 800. Merenja su vršena za brzinu neporemećene struje $V_\infty = 5.4$ m/s. Najkvalitetnija merenja su u vodi u kojoj nema mnogo vazdušnih mehurića. Kada dođe do «ozračavanja vode», odnosno kada se znatno uveća broj mehurića ili njihov presek, dolazi do povećanja šuma u signalu. Kada su brzine u radnom delu velike, voda se jako brzo «ozrači», pa zbog toga veće brzine neporemećene struje nisu poželjne.

Analiza rezultata određivanja C_p

Dijagrami na slikama 3 i 4 pokazuju raspored koeficijenta pritiska C_p na donjacima, odnosno na grudnoj strani profila rešetke. Odstupanja između teorijskih (sl.3) i eksperimentalnih rezultata (sl.4) su značajna oko napadne ivice profila.

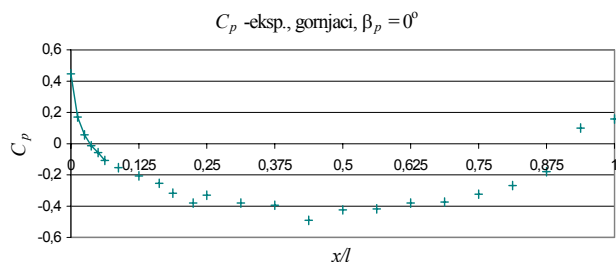


Slika 3. Teorijska raspodela koeficijenta pritiska po donjacima hidropofila $\beta_p = 0^\circ$ i $V_\infty = 5,4$ m/s

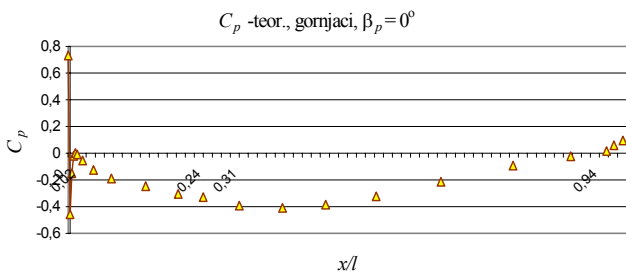


Slika 4. Eksperimentalna raspodela koeficijenta pritiska po donjacima hidropofila $\beta_p = 0^\circ$ i $V_\infty = 5,4$ m/s

Do ovih odstupanja dolazi zbog toga što merenje brzine strujanja nije moguće neposredno do površine modela, nego na rastojanju od oko 1 mm. Teorijska raspodela C_p pokazuje da za tačku sa $x=0.125$ mm $C_p=0,205$, a za $x=0.375$ mm $C_p=-1,18$, dok za $x=0.625$ mm $C_p=-0,95$ (sl.3). Eksperimentalna merenja su vršena u tačkama sa $x=0$ mm i 1 mm, a izračunati su $C_{pe} = -0.9$ i -0.004 (sl.4). Ako u delu krive između tačaka sa $x=0.875$ i $x=1.125$ mm pretpostavimo da je C_p linearna funkcija, možemo izračunati C_p u tački sa $x=1$ mm. Kao srednja vrednost za C_p pomenute tačke dobija se $C_{pi} = -0.381$. Eksperimentalno je u toj tački izmerena vrednost $C_{pe} = -0.004$. Imajući u vidu dimenzije merne zapremine i velike promene gradijenta pritiska, nemoguće je preciznije locirati mernu tačku. Oblik krive u delovima koji su iza 5% dužine hidropofila su veoma slični, a razlike u brojčanoj vrednosti C_p su prihvatljive.



Slika 5. Eksperimentalna raspodela koeficijenta pritiska po gornjacima hidropofila $\beta_p = 0^\circ$ i $V_\infty = 5,4$ m/s



Slika 6. Teorijska raspodela koeficijenta pritiska po gornjacima hidropfila $\beta_p=0^\circ$ i $V_\infty = 5,4$ m/s

Dijagrami na slikama 5 i 6 daju eksperimentalnu i teorijsku raspodelu C_p na gornjacima, odnosno na leđnoj strani profila. Karakter krive je veoma sličan, a značajne razlike se javljaju oko napadne ivice hidropfila.

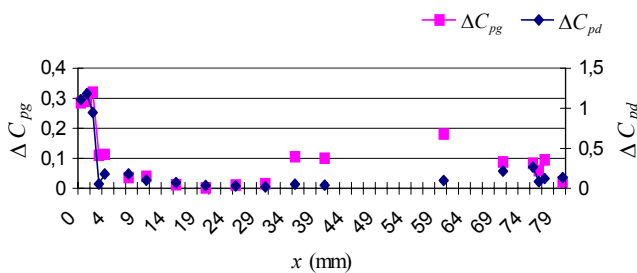
Eksperimentalno je veoma teško meriti s velikom pouzdanošću u tačkama koje su uzete prilikom teorijskog razmatranja. Zbog toga na eksperimentalnom dijagramu ne mogu da se pojave vrednosti u tačkama sa $x=0,375, 0,625, 0,875$ mm. Ovo su važne tačke jer tu dolazi do naglog povećanja brzine i pada C_p do vrednosti $C_p=-0,457$.

$$\begin{aligned} \Delta C_{pg} &= C_{pgt} - C_{pge} \\ \Delta C_{pd} &= C_{pdt} - C_{pde} \end{aligned}$$

Analiza dijagrama C_p na slikama 3-6 pokazuje da ispitivani hidropfil ima minimalnu brzinu, odnosno zaustavnu tačku za $\beta_p=0^\circ$ u tački $x=0,125$ mm. Oko ove tačke je najveća promena gradijenta pritiska.

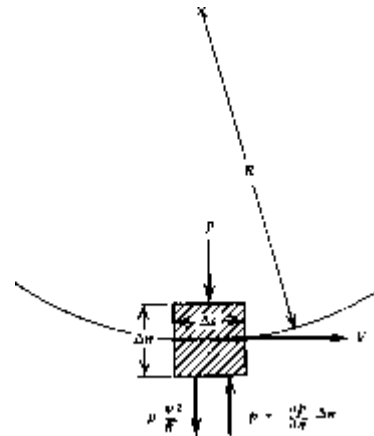
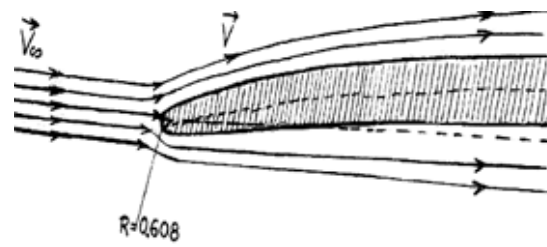
Dijagram na sl.7 prikazuje razliku između eksperimentalnih i teorijskih rezultata ΔC_{pg} i ΔC_{pd} . Treba imati u vidu da kod napadne ivice profila, fluid od zaustavne tačke naglo ubrzava (pri čemu pritisak naglo pada što se vidi po velikom potpritisaku, $C_p \approx -1,2$), a zbog malog radijusa napadne ivice ($R=0,608$), promena pritiska u pravcu normale ne može se zanemariti.

Zavisnost ΔC_{pg} i ΔC_{pd}



Slika 7. Dijagram odstupanja teorijskih i eksperimentalnih rezultata $\beta_p=0^\circ$ i $V_\infty = 5,4$ m/s

Iz jednačine kretanja u pravcu normale dobija se $\frac{\partial p}{\partial n} = \rho \frac{V^2}{r}$. Gradijent pritiska raste u pravcu normale, pa će njegova vrednost zavisiti obrnuto proporcionalno od udaljenosti tačke od površine profila r (sl.8). Kako pritisak raste, to i C_p raste. Dok teorijski model daje $C_{p\text{tmin}}=-1,2$, u merenju je $C_{p\text{emin}}=-0,9$.

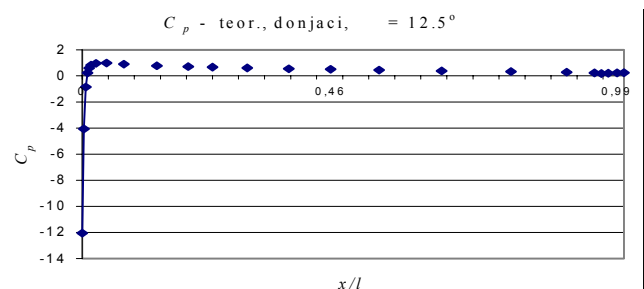


Slika 8. Strujne linije i gradijent brzine oko napadne tačke hidropfila

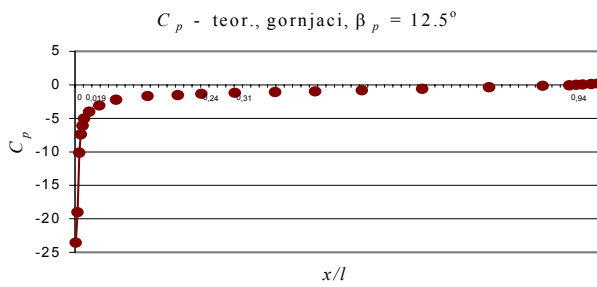
Na dijagramima se vidi da na gornjacima uslove za laminarni granični sloj (odnosno povoljni gradijent pritiska) ima do $\sim 50\%$, $x=35$ mm. Geometrija profila je takva da na donjacima dolazi do otcepljenje graničnog sloja na samoj napadnoj ivici i pri malim napadnim uglovima [10].

Na osnovu poznate literature [2,3] može da se odredi i kritični koeficijent pritiska C_{pk} . Za $C_{p\text{min}}=-1,2$ odredi se $M_{kr} = 0,6$ i $C_{pk} = -1,475$. Za eksperimentalne vrednosti $C_{p\text{min}}=-0,9$ dobija se da je $M_{kr} = 0,65$, a $C_{pk} = -1,18$. Poznato je da se za hidropfile često definiše kavitacioni broj σ . Kavitacioni broj je brojčano jednak kritičnom koeficijentu pritiska ($\sigma=C_{pk}$). Znači, za ispitivani hidropfil ugrađen u pumpu *Jastrebac* kavitacioni broj $\sigma_i=-1,2$ a $\sigma_e=-0,9$. Ovo je još jedan podatak koji se može dobiti na osnovu merenja raspodele vektora brzine strujanja oko profila. Imajući u vidu da teorijski proračun daje vrednosti s tačnošću do 5%, vrednost $\sigma_i=-1,2$ može se smatrati validnom i koristiti u projektovanju lopatice osne pumpe.

Zbog konstrukcionog rešenja modela nije bilo moguće izmeriti brzinsko polje pod uglom $\beta_p=12,5^\circ$. Ako se profil u rešetki postavi pod uglom $\beta_p=25^\circ$, a $\beta_r=68^\circ$ u odnosu na struju, onda dolazi do dodatnog komplikovanja strujnog polja oko profila [10]. Određivanje C_p ima smisla samo oko napadne ivice i na donjacima (grudna strana). Na gornjacima (leđna strana) se formira turbulentna zona s veoma visokim stepenom turbulencije koji ide i preko 35% [10].



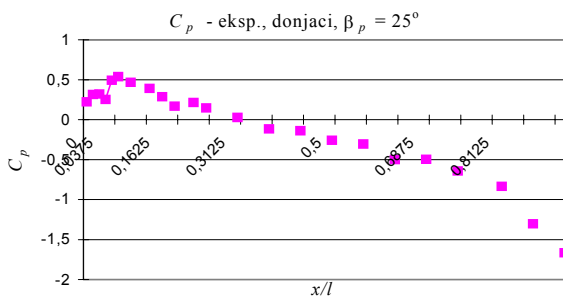
Slika 9. Teorijska raspodela C_p po donjacima za $\beta_p=12,5^\circ$ i $V_\infty = 5,4$ m/s



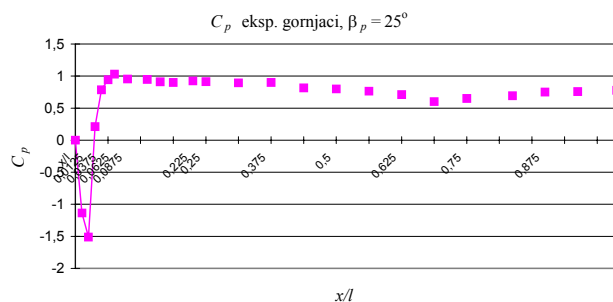
Slika 10. Teorijska raspodela C_p po gornjacima za $\beta_p=12.5^\circ$ i $V_\infty = 5,4$ m/s

Teorijski proračun takođe ima smisla samo u području gde nema otcepljenje graničnog sloja. Zbog ovoga dijagrami na slikama 9 i 10, koji prikazuju teorijske vrednosti C_p oko profila za $\beta_p=12.5^\circ$, i dijagrami na slikama 11 i 12 koji su rezultat eksperimentalnih merenja za $\beta_p=25^\circ$, mogu samo da ilustruju raspodelu koeficijenta pritiska. Očigledno je da postoje značajne razlike koeficijenta pritiska C_p u funkciji napadnog ugla profila i ose rešetke.

Analiza rezultata ispitivanja pokazuje da postoji niz ograničenja u primeni LDA metode za određivanje C_p oko složenih modela. Jedna od značajnih poteškoća s kojima se sreću eksperimentatori je pozicioniranje merne zapremine (tačke) u odnosu na model. Modeli malih dimenzija (velike razmere) i složene konfiguracije nisu pogodni za primenu postojećeg LDA sistema zbog relativne tačnosti u pozicioniranju merne zapremine koja ima svoje konačne dimenzije, i mora biti locirana na konačnu udaljenost od površine modela. Drugi problem je izbor orijentacije interferencionih linija unutar merne zapremine u odnosu na površinu modela. Poželjno je da se mere normalna i tangencijalna komponenta brzine strujanja u odnosu na površinu modela, a ne bilo koje dve komponente. Nemogućnost trenutnog ispitivanja kompletnog strujanja oko modela je nedostatak metode, pa se mora pretpostaviti da se radi sa stacionarnim poljem.



Slika 11. Eksperimentalna raspodela C_p po donjacima za $\beta_p=25^\circ$ i $V_\infty = 5,4$ m/s



Slika 12. Eksperimentalna raspodela C_p po gornjacima za $\beta_p=25^\circ$ i $V_\infty = 5,4$ m/s

LDA sistem koji je korišćen u ovom eksperimentu je rigidne konfiguracije s optikom koja ima aperturu 150 mm i traverzirajući sistem koji se pomera poluautomatski zbog nemogućnosti automatskog pomeranja prijemne optike. Složenost trajektorije laserskih snopova, od izvora svetlosti do merne tačke, takođe predstavlja izvor dodatnih grešaka. Ako se zanemare turbulencije na delu putanje u vazduhu, laserski snopovi prolaze kroz staklene prozore VKT, pa kroz vodu, do pleksi prozora modela, da bi stigli do merne tačke na modelu hidroprofila. Na toj putanji može da se dogode dinamičke promene samo u jednom ili u oba laserska snopa, zbog čega dolazi do promena u podešenosti sistema, do delimične atenuacije, ili do pomeranje merne zapremine u odnosu na projektovanu. To su trenutne pojave na koje se na može uticati u procesu merenja, a koji mnogo utiču na tačnost rezultata.

Zaključak

Rezultati ovog ispitivanja su potvrdili dosadašnja saznanja iz ove oblasti. LDA je metoda koja može da nađe primenu u ispitivanju C_p hidroprofila u slučajevima kada nije moguće koristiti metodu zasnovanu na merenju pritiska. Kompatibilnost parametara LDA sistema s ispitivanom pojavom i razmerama modela su osnovni preduslov za uspešan eksperiment.

Pokazano je da postoji niz ograničenja u primeni LDA metode za određivanje C_p oko složenih modela. Jedna od značajnih poteškoća s kojima se sreću eksperimentatori je pozicioniranje merne tačke u odnosu na model. Modeli malih dimenzija (velike razmere) i složene konfiguracije nisu pogodni za primenu postojećeg LDA sistema zbog relativno male tačnosti u pozicioniranju merne zapremine, koja ima svoje konačne dimenzije i mora biti locirana na minimalnoj udaljenost od površine. Drugi problem je izbor orijentacije interferencionih linija unutar merne zapremine u odnosu na površinu modela. Poželjno je da se mere normalna i tangencijalna komponenta brzine strujanja u odnosu na površinu modela, a ne bilo koje dve komponente. Nemogućnost trenutnog ispitivanja kompletnog strujanja oko modela je takođe nedostatak metode, pa se mora pretpostaviti da se radi sa stacionarnim poljem.

Prednosti LDA metode su u tome što može da se koristi model koji je univerzalan i koji ne zahteva posebnu obradu (bušenje rupica, ugradnju cevčica i davača pritiska). Druga prednost je to što laserski zraci ne remete strujno polje oko modela. Adekvatnim izborom komponenata LDA sistema može da se omogućiti da se merna tačka locira na nepristupačnim mestima koja nisu zaklonjena modelom. LDA metoda u osnovi ima etalonsku tačnost, a sva odstupanja i relativne greške su posledica koncipiranja eksperimenta i izbora komponenata LDA sistema.

Za uspešno određivanje C_p hidroprofila brzohode osne pumpe, odnosno za dobijanje rezultata čija greška ne prelazi 5% po celoj dužini, potrebno je izraditi model većih dimenzija, ili smanjiti dimenzije merne zapremine, tako da se merna tačka locira preciznije, neposredno uz granični sloj na površini modela. To znači da treba koristiti sistem s fiberom i sondom s primopredajnom optikom malih dimenzija i male fokusne dužine. Takođe, pokazalo se da umesto kauntera za obradu podataka treba uvesti analizator Dopplerovih signala (burstova). Eksperiment je pokazao da je neophodno automatsko, sinhrono pomeranje modela i merne tačke. Kada se ispituju dvodimenzionalna strujanja treba koristiti anemometar koji istovremeno meri dve komponente vektora brzine, a za trodimenzionalna strujanja

je neophodan trokomponentni sistem.

Kada nema odvajanja struje, numeričke metode "MORINO" i "TOK" mogu se uzeti kao pouzdane za određivanje koeficijenta pritiska na konturi profila. Greška ovih metoda je ispod 5%. Međutim, ukoliko dođe do odvajanja struje, onda se gore pomenutim metodama mogu porediti koeficijenti pritiska sve do tačke odvajanja, ili se moraju koristiti numeričke metode zasnovane na matematičkim modelima koji opisuju viskozno strujanje s otcepljenjem.

Potrebno je određeno eksperimentalno iskustvo da se merenje C_p LDA metodom sprovede korektno, a solidno teorijsko poznavanje fizikalnosti problema da bi sa dobijeni rezultati pravilno interpretirali. Najvažnije od svega je odabrati laserski anemometrijski sistem kompatibilan s modelom i osigurati optimalne uslove merenja vektora brzine strujanja u polju oko modela.

Logičan nastavak započetih ispitivanja je određivanje polja vektora brzine i C_p za kompletne pumpe u radnom režimu. U tu svrhu je neophodno izraditi pumpu, odnosno model sa svim elementima, koji će omogućiti primenu Laser Doppler anemometrijske metode.

Literatura

- [1] RISTIĆ, B. *Pumpe i ventilatori*. Naučna knjiga, Beograd, 1987.
- [2] VORONJEC, K., OBRADOVIĆ, N. *Mehanika fluida*. Građevinska knjiga, Beograd, 1980.
- [3] V3-343, *Određivanje kritičnog Mahovog broja primenom kavitacionih pojava*. int. dok. VTI VJ
- [4] NINČIĆ, G., STOJANOVIĆ, S. *Vodenokavitacioni tunel T-33*. Vs-158, VTI, 1958, Beograd.
- [5] JAMESON, A. *Transonic Flow Calculation in Numerical Methods in Fluid Dynamics*. Edt. WIRZ, H.J., SMOLDEREN, J.J. Hemisphere Publ. Corp., Washington, 1985.
- [6] KOZIĆ, M. *Paket programa "MORINO"*. int.dok., VTI VJ, 1986.
- [7] WATRASIEWICH, B.M., RUDD, J.J. *Laser Doppler Measurements*. Butterworths, London-Boston, 1976.
- [8] MERZKIRCH, W.F. *Flow Visualization*. 1st ed. Academic Press, New York, 1974.
- [9] SETTLES, G.S. *Modern Developments in Flow Visualization*. AIAA Paper 84-1599, June 25-27, 1984, p.1-16.
- [10] RISTIĆ, S., MAJSTOROVIĆ, P. Eksperimentalno ispitivanje relativnog strujanja kroz model prave profilne rešetke. *Naučnotehnički pregled*, 2000, vol.50, no.6, p.29-36.
- [11] BUCHHAVE, P. *Tree Component LDA Measurements*. DISA Information, 1984, no.29, p.3-10.
- [12] RISTIĆ, S. Laser Doppler anemometrija. *Vojnotehnički glasnik*, 1991, no.5, p.529-536.
- [13] RISTIĆ, S., VITIĆ, A., GROZDANOVSKI, D. Baždarenje vodenokavitacionog tunela i merenje raspodele brzine strujanja po tetivi krila pomoću LDA. *Vazduhoplovstvo '93*, Beograd, dec.1993, p.9-10.
- [14] RISTIĆ, S., VITIĆ, A. *Analysis of the Accuracy of the Third Component of Flow Velocity Measurements for a 3-component, 3-color Laser Doppler Anemometer*. 21. Congress of the ICAS, 1998, 13-18 sept. Melbourne, Australia.

Rad primljen: 19.9.2001.god.

