Mr Dušan Regodić,
major, dipl. inž.
Vojnotehnička akademija
VJ, Beograd

PRILOG ANALIZI STRUJANJA U GRANIČNOM SLOJU PRIMENOM POLHAUSENOVE METODE

UDC: 533.69.048.001.575

Rezime:

Metod Polhausena koristi se za proračun profila brzine za laminarni granični sloj pri obstrujavanju sa spoljnim intenzitetom brzine. U računarskom programu neophodno je izračunati debljinu graničnog sloja, tangencijalni napon i druge parametre, za 50% dužine krila letelice. Proračun je izvršen za jedanaest tačaka od prednje zaustavne tačke. U programu su izmenjene bezdimenzionalne u dimenzionalne vrednosti brzine i promene brzine.

Ključne reči: granični sloj, promena pritiska, tangencijalni napon, pokretna debljina, impulsna debljina, faktor oblika, koeficijent trenja.

CONTRIBUTION TO BOUNDARY-LAYER FLOW ANALYSIS USING THE POHLHAUSEN METHOD

Summary:

The Pohlhausen method is applied to velocity profile calculation for a laminar boundary layer of a body in a stream with external velocity gradient. It is necessary to calculate boundary layer thickness, tangential stress and other parameters for 50% of aerofil length using a computer programme. The calculation is carried out for eleven points starting from the leading stagnation point. Nondimensional velocity and velocity change values are gradient into dimensional ones in the programme.

Key words: boundary layer, pressure gradient, tangential stress, displacement thickness, shape factor, friction coefficient.

Uvod

Prandtl je 1904. godine uveo pojam graničnog sloja strujanja, čime je označio početak moderne ere mehanike fluida. Pri analizi viskoznog strujanja oko tela, podelio je polje strujanja u područje relativno tankog graničnog sloja u neposrednoj blizini čvrstih granica i u području koje prekriva ostatak polja strujanja. Unutar graničnog sloja tangencijalna komponenta brzine naglo se menja u smeru normale na

zid, i to od nule na zidu do brzine slobodne struje na spoljnoj granici graničnog sloja. U tom sloju važan je uticaj viskoznosti; strujanje je vrtložno, a viskozne sile istog su reda veličina kao i inercione, pa se dinamika strujanja opisuje Navier-Stoksovim jednačinama [1].

Izvan graničnog sloja uticaj viskoznosti zbog malih poprečnih gradijenata brzine strujanja je zanemarljiv, pa se fluid može smatrati idealnim u potencijalnom (bezvrtložnom) struja-

nju, tako da se dinamika u tom području opisuje Ojlerovim jednačinama kretanja [1].

U ovom radu analizirano je strujanje u laminarnom i turbulentnom graničnom sloju, i dat numerički primer proračuna opstrujavanja krila primenom Polhausenove metode. Numeričko rešenje je urađeno u Fortranu na PC-386.

Pretpostavke i kvalitativni opis graničnog sloja

Debljina graničnog sloja definisana je kao udaljenost od zida u smeru poprečne y-ose preko koje se brzina menja od nule do vrednosti koja je za 1% manja od iznosa brzine spoljnog potencijalnog strujanja na mestu x. Na drugi način napisana debljina je:

$$\delta^* = \int_0^{\delta} \left(1 - \frac{u(y)}{u_1}\right) dy \quad (1)$$

Debljina δ^* naziva se »pokretna debljina« ili »debljina istiskivanja« i ona predstavlja odstojanje od opstrujavane površine do spoljne granice sloja duž y pravca na kome je brzina manja za 1% od iznosa brzine spoljnog potencijalnog strujanja.

Impulsna (redukovana) debljina graničnog sloja data je formulom

$$\Theta = \int_0^{\delta} \frac{u(y)}{u_1} \left(1 - \frac{u(y)}{u_1}\right) dy \quad (2)$$

Ona predstavlja lokalno smanjenje debljine graničnog sloja pri opstrujavanju površine.

Tangencijalni napon τ_w za nesabijeni strujni tok je

$$\tau_w = \rho \frac{\partial(u_1^2 \Theta)}{\partial x} + \rho u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} \delta^* \quad (3)$$

Izraženo u bezdimenzionalnom obliku [4] lokalni koeficijent trenja je:

$$\frac{c_f}{2} = \frac{\partial \Theta}{\partial x} + \frac{\partial u_1 \Theta}{\partial x u_1} (2 + H) \quad (4)$$

gde je:

$$c_f = \frac{\tau_w}{\frac{\rho u_1^2}{2}} \text{ — lokalni koeficijent trenja,} \quad (5)$$

$$H = \frac{\delta^*}{\Theta} \text{ — faktor debljine graničnog sloja.} \quad (6)$$

Osnovne karakteristike graničnog sloja prikazane su na slici 1.

Sl. 1 — Karakteristike graničnog sloja oko ravne ploče

Prednja zaustavna tačka je inicijalna za laminarni granični sloj. Tangencijalno naprezanje τ proporcionalno je raspodeli brzine struje u za poprečni presek graničnog sloja [1], i iznosi:

$$\begin{aligned} \tau &= \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=0} = f''(0) \frac{\rho u_{\infty}^2}{\sqrt{Re}} \\ &= 0,3321 \frac{\rho u_{\infty}^2}{\sqrt{Re}} \end{aligned} \quad (7)$$

gde je:

$$f(\eta) = \frac{\psi}{\sqrt{u_{\infty} vx}} \text{ — bezdimenzionalna funkcija toka,} \quad (8)$$

$$\eta = \frac{y}{\sqrt{\frac{vx}{u_{\infty}}}} \text{ — složena bezdimenzionalna promenljiva po Blaziusu,}$$

$$Re = \frac{u_{\infty} x}{\nu} \text{ — Reynoldsov broj,}$$

$\psi = \psi(x, y, t)$ (m^2/s) — funkcija toka ravnanskog nesabijalnog strujanja [2].

ν — koeficijent kinematske viskoznosti.

Za lokalnu vrednost graničnog sloja, na odstojanju od prednje ivice razvija se nestabilan laminarni granični sloj koji se naziva prelazni. Unutar njega se povećava debljina, a iza njega sledi turbulentni granični sloj. U turbulentnom graničnom sloju ostvaruje se intenzivno mešanje strujnica, realizuje se veliki prenos molekula unutar graničnog sloja što proizvodi dodatni napon, nazvan Rejnoldsovim naponom.

Razlike profila brzine za laminarni i turbulentni granični sloj prikazane su na slici 2.

Sl. 2 — Profil brzine laminarnog i turbulentnog graničnog sloja

Teorija laminarnog graničnog sloja

Pri stacionarnom laminarnom opstrujavanju ravne ploče pritisak ostaje konstantan ($p = p_\infty$) i $u_\delta = u_\infty$, pa Prandtlove jednačine dobijaju sledeći oblik [4]:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (9)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (11)$$

Za horizontalnu ravnu ploču pritisak je konstantan i bezdimenzionalne transformisane koordinate definišu se izrazom [2]:

$$\eta = \sqrt{\frac{y}{2}} \left(\frac{u_1}{\nu x} \right) \quad (12)$$

Jednačina graničnog sloja svodi se na običnu nelinearnu diferencijalnu jednačinu po Blaziusu, primenom funkcije toka ψ , bezdimenzionalne funkcije toka $f(\eta)$ i složene bezdimenzionalne promenljive η , čiji je oblik:

$$f''' + ff'' = 0 \quad (13)$$

gde je f definisano jednačinom (8), sa graničnim uslovima:

$$f = f' = 0 \quad \text{za } \eta = 0$$

$$f' = 1 \quad \text{za } \eta = \infty$$

Varijante jednačine (13) daju sledeće izraze [2, 5]:

$$u = u_1 \frac{f'}{2} \quad (14)$$

$$v = \frac{\sqrt{\nu_1 \frac{\nu}{x} (\eta f' - f)}}{2} \quad (15)$$

$$c_f = \frac{0,664}{\sqrt{\text{Re}_x}} \quad (16)$$

$$\frac{\delta^*}{x} = \frac{1,729}{\sqrt{\text{Re}_x}} \quad (17)$$

$$\frac{\theta}{x} = \frac{0,664}{\sqrt{\text{Re}_x}} \quad (18)$$

Gradijent pritiska

Ako je na spoljnoj granici graničnog sloja gradijent pritiska takav da je brzina na spoljnoj granici prikazana sa $u_1 = Kx^m$, tada se jednačina graničnog sloja svodi na Falkner-Skan jednačinu [2]:

$$f''' + (m+1)ff'' - 2mf'^2 + 8m = 0 \quad (19)$$

gde su K i m empirijski koeficijenti.

Rešavanjem jednačine dobija se:

$$u = \frac{u_1 f'}{2} \quad (20)$$

$$v = -\frac{\sqrt{u_1 \frac{v}{x}}}{2} [(m+1)f + (m-1)\eta f'] \quad (21)$$

Granični uslovi su isti kao za jednačinu (13). Granični sloj u blizini zaustavne tačke ima vrednost koeficijenta $m=1$, a u tački odvajanja sloja vrednost $m = -0,0904$ [2].

Koeficijent trenja je

$$c_f = \frac{F(m)}{\sqrt{Re_x}} \quad (22)$$

gde je empirijska funkcija $F(m) = F(-0,0904) = 0$; $F(m) = F(0) = 0,664$ i $F(m) = F(1) = 2,466$ [2].

Polhausenova metoda

Polhausen je pretpostavio opšti oblik bezdimenzionalnog profila brzine u graničnom sloju kao jednoparametarske funkcije sličnih krivulja. Ako se pretpostavi profil brzine u graničnom sloju, uz prisustvo gradijenta pritiska, i ako se opiše algebarskim odnosom između u/u_1 i $y/\delta = \eta$, tada je

$$\frac{u}{u_1} = \frac{2\eta - 2\eta^3 + \eta^4 + \lambda\eta(1-\eta)^3}{6} \quad (23)$$

gde parametar λ iznosi:

$$\lambda = \frac{\delta^2}{v} \frac{du_1}{dx} \quad (24)$$

Odvajanju graničnog sloja odgovara $\lambda = -12$. U zaustavnoj tački $\lambda = 7,052$ i

$$c_f = \frac{4v}{u_1 \delta} \left(1 + \frac{\lambda}{12} \right) \quad (25)$$

Debljina graničnog sloja dobija se za propisanu vrednost $u_1(x)$, na osnovu jednačine (3).

Prelazni granični sloj

Da bi se definisao granični sloj neophodno je odrediti njegovu prirodu na površini koja se opstrujava. Analize pokazuju da priroda graničnog sloja približno zavisi od uslova strujanja definisanih Rejnoldsovim brojem. Ako se posmatra površina oblika ploče, na njenom prednjem delu, za odgovarajuće male vrednosti Rejnoldsovog broja, formira se laminarni granični sloj. Zatim se javlja prelazna zona laminarnog u turbulentni granični sloj i, na kraju, potpuno razvijeno turbulentno strujanje na zadnjem delu kojem odgovaraju više vrednosti Rejnoldsovih brojeva $Re = 10^5$ do $5 \cdot 10^6$. Takav granični sloj na opstrujavanoj površini naziva se mešoviti (laminarno-turbulentni). Na prelazak sa laminarnog na turbulentni strujni tok utiču visok gradijent pritiska i Mahov broj. Za opšte inženjerske proračune glatkih ravnih površina može se uzeti da se pri $Re_x = 5 \cdot 10^5$ u graničnom sloju javlja umerena turbulencija.

Turbulentni granični sloj

Komponente brzine u turbulentnom graničnom sloju su $(\bar{u}+u)$ i $(\bar{v}+v)$, gde su $\bar{u}$ i $\bar{v}$ srednja odstupanja brzine. Rejnoldsov napon tada može biti izražen preko $-\rho \bar{u}v$. Prema tome, ukupni tangencijalni napon, koji se javlja u turbulentnom graničnom sloju, iznosi:

$$\tau = \mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \rho \bar{u}v \quad (26)$$

U poređenju sa laminarnim graničnim slojem, uv predstavlja dodatak jednačine za turbulentni granični sloj. Da bi se pravilno definisao turbulentni tok neophodno je definisati i druge strujne varijable. Jednačina (26) definisana je za unutrašnji region turbulentnog sloja. Fluktuacije brzine na opstrujavanoj površini omogućile su pojavu Rejnoldsovog napona koji je mali u poređenju sa $\mu \partial u / \partial y$. Za područje pune turbulencije izraz za Rejnoldsov napon dominira. U spoljnom regionu turbulencija je isprekidana i jednačina (26) ne može se primeniti, ali ovaj region može biti opisan modifikovanim razvijenim jednačinama za punu turbulentnu strujnu oblast.

Teorija prelaznog graničnog sloja

Za prelazno strujanje jednačina (24) poprima oblik:

$$\tau = (\mu + \rho l^2 \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right|) \frac{\partial u}{\partial y} \quad (27)$$

gde je:

l — prelazna dužina na kojoj nastaje vrtlog.

Za punu turbulentnu oblast prvi član ovog izraza može biti zanemaren. Ako se usvoji da je dužina l proporcionalna odstojanju od površine y , jednačina (27) može se integrisati tako da glasi:

$$\frac{u}{u_\tau} = A \log_{10} \left(\frac{yu_\tau}{\nu} \right) + B \quad (28)$$

gde je:

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad \text{— brzina trenja,}$$

$A = 5,75$ — empirijski koeficijent [2],

$B = 5,5$ — empirijski koeficijent [2].

Poznata zavisnost jednačine (28) ne može se primeniti za vrlo male vrednosti y .

Zakovitosti promene brzine strujanja

U laminarnom podsloju, Rejnoldsovi naponi su zanemarljivi, pa se koriste tangencijalni naponi između dva sloja, dati Njutnovom formulom $\tau_w = \mu \partial u / \partial y$, koji su konstantni u podsloju. Integracijom se dobija:

$$\frac{u}{u_\tau} = \frac{yu_\tau}{\nu} \quad (29)$$

Ako je turbulentni granični sloj isprekidan, izraz (28) modifikovan je i glasi:

$$\frac{u}{u_\tau} = \frac{1}{k} \log_{10} \left(\frac{yu_\tau}{\nu} \right) + \Phi \left(\frac{y}{\delta} \right) \quad (30)$$

On sadrži punu i isprekidanu turbulentnu oblast gde je vrednost $\Phi = \text{const.} = B$. Na gornjoj granici sloja $u = u_1$ za $y = \delta$, pa je

$$\frac{(u_1 - u)}{u_\tau} = \Phi(l) - \frac{1}{k} \log_{10} \left(\frac{y}{\delta} \right) - \Phi \left(\frac{y}{\delta} \right) = f \left(\frac{y}{\delta} \right) \quad (31)$$

gde je $\Phi(l)$ opšta konstanta, a $f(y/\delta)$ i Φ su dobijene eksperimentalnim putem i njihova vrednost zavisi od gradijenta spoljnog pritiska. Vrednost $\Phi(l) = 7,9$ a $k = 0,4$ [2].

Koeficijenti trenja i otpora za ravnu ploču

Lokalni koeficijent trenja, po Von Karmanu, iznosi:

$$c_f^{-\frac{1}{2}} = 1,7 + 4,15 \log_{10}(\text{Re}_x c_f) \quad (32)$$

gde je:

Re_x — lokalni Rejnoldsov broj.

Koeficijent otpora trenja je:

$$C_f^{-\frac{1}{2}} = 4,13 \log_{10}(\text{Re}_L C_f) \quad (33)$$

Rejnoldsov broj Re_L usvojen je za površinu pokrivenu turbulentnim graničnim slojem. Na osnovu Slihtingovih eksperimentalnih rezultata na bazi teorijskih rezultata Von Karmana za turbulentni granični sloj Prandl je dao obrazac pogodan za numeričko računanje koji glasi:

$$C_f = (2 \log_{10} \text{Re}_x - 0,65)^{-2,3} \quad (34)$$

$$C_f = 0,455 (\log_{10} \text{Re}_L)^{-2,58} \quad (35)$$

Ove formule koriste se za područje $10^5 < \text{Re}_L < 1,5 \cdot 10^9$ gde je granični sloj turbulentan [4, 3].

Vrednost zakona brzine

Eksperimentalni rezultati pokazuju »vrednost zakona« koji glasi:

$$\frac{u}{u_1} = \sqrt[n]{\frac{y}{\delta}} \quad (36)$$

gde je:

$n=5$ do 9 — koeficijent koji zavisi od Rejnoldsovog broja.

Odnos između »pokretne debljine«, impulsne debljine i debljine graničnog sloja dat je izrazima [4]:

$$\frac{\delta^*}{\delta} = \frac{1}{n+1} \quad (37)$$

$$\frac{\Theta}{\delta} = \frac{n}{(n+1)(n+2)} \quad (38)$$

Za $5 \cdot 10^5 < \text{Re}_x < 10^7$ može se uzeti da je $n=7$. Uobičajena vrednost odnosa faktora trenja i Rejnoldsovog broja u korelaciji je za strujnu cev i iznosi [2]:

$$\frac{\delta}{x} = \frac{0,370}{\sqrt[5]{\text{Re}_x}} \quad (39)$$

$$C_f = \frac{0,59}{\sqrt[5]{\text{Re}_x}} = \frac{0,026}{\sqrt[4]{\text{Re}_\Theta}} \quad (41)$$

$$C_f = \frac{0,074}{\sqrt[5]{\text{Re}_L}} \quad (42)$$

Za $10^6 < \text{Re}_x < 10^8$ jednačina (36) je dobro podešena za $n=9$ i daje [2]:

$$\frac{\delta}{x} = \frac{0,275}{\sqrt[6]{\text{Re}_x}} \quad (43)$$

$$C_f = \frac{0,038}{\sqrt[6]{\text{Re}_x}} = \frac{0,018}{\sqrt[5]{\text{Re}_\Theta}} \quad (44)$$

$$C_f = \frac{0,045}{\sqrt[6]{\text{Re}_L}} \quad (45)$$

Ako se profil brzine graničnog sloja izrazi jednačinom (13) za koju se uzima odgovarajuća vrednost n , tada se H može izračunati na osnovu jednačina (6) i (37,38), a C_f može biti izraženo u zavisnosti od Θ na osnovu jednačine (41) ili (44). Jednačina impulsnog integrala (2) može se rešiti po Θ , za ma koji pogodan analitički i numerički oblik za u_1 .

Primena Polhausenovog metoda za proračun laminarnog graničnog sloja

Polhausenov metod profila brzine koristi se za proračun graničnog sloja sa spoljnim gradijentom brzine [2].

Polhausenova jednačina sadrži parametar

$$\lambda = \frac{\delta^2}{\nu} \frac{du_1}{dx}$$

koji opisuje profil brzine u laminarnom graničnom sloju sa spoljnim gradijentom brzine (ili pritiska). Na osno-

vu izraza za tangencijalni napon, pokretne debljine i impulsnu debljinu (2) mogu se dobiti nove jednačine u zavisnosti od λ , koje glase:

$$\tau_w = \frac{\mu u_1}{\delta} \left(2 + \frac{\lambda}{6} \right) \quad (47)$$

$$\delta^* = \left(\frac{3}{10} - \frac{\lambda}{120} \right) \delta \quad (48)$$

$$\Theta = \left(\frac{37}{315} - \frac{\lambda}{945} - \frac{\lambda^2}{9072} \right) \delta \quad (49)$$

Zamenom u impulsni integral jednačine (2) nakon nekoliko izmena dobija se izraz:

$$\frac{d \left(\frac{\Theta^2}{v} \right)}{dx} = \frac{F(\lambda)}{u_1} \quad (50)$$

gde je:

$$F(\lambda) = 2 \left(\frac{37}{315} - \frac{\lambda}{945} - \frac{\lambda^2}{9072} \right) \left(2 - \frac{116\lambda}{315} + \frac{79\lambda^2}{7560} + \frac{\lambda^3}{4536} \right) \quad (51)$$

U jednačini (50) ostvaren je odnos između impulsne debljine Θ i odstoja nja x od početka graničnog sloja za koji se želi numerička integracija u računarskom programu. Takođe, to pokazuje jednačina za λ koja daje odnos između impulsne debljine Θ i λ koji glasi [2]:

$$\frac{\Theta^2}{v} \frac{du_1}{dx} = \left(\frac{37}{315} - \frac{\lambda}{945} - \frac{\lambda^2}{9072} \right)^2 \lambda \quad (52)$$

Jednačina (52) može se rešiti numerički ako su:

- dati spoljna brzina u_1 i njen derivativ u'_1 u funkciji x ,
- poznati početni uslovi.

Šlihting je to dokazao i za zaustavnu tačku gde je [4, 2]:

$$\lambda_0 = 7,052; \quad \left(\frac{\Theta^2}{v} \right)_0 = \frac{0,077}{u'_{10}}$$

$$\left[\frac{d \left(\frac{\Theta^2}{v} \right)}{dx} \right]_0 = \frac{-0,0652 u''_{10}}{(u'_{10})} \quad (53)$$

Izvodi su obeleženi sa rastućim odstojanjem x od zaustavne tačke.

Raspodela spoljne brzine i njenog izvoda, za deo gornje površine letelice na kojoj je na 50% dužine laminarni granični sloj, prikazana je u tabeli 1.

gde je:

- $u_0 = 60$ m/s — brzina slobodne struje,
- $c = 40$ cm — dužina aeroprofila,
- u'_1 — početna vrednost za zaustavnu tačku.

U računarskom programu neophodno je naći debljinu graničnog sloja, tangencijalni napon i druge parametre, a za 50% dužine aeroprofila od zaustavne tačke, izračunati koeficijent otpora trenja. U tabeli 2 date su proračunate vrednosti za parametre strujanja. Pri proračunu su korištene jednačine (1 do 7), (23 do 25) i (47 do 53).

Tabela 1

Raspodela spoljne brzine i njenog izvoda

$d(U_1/U_0)/d(x/c)$	25	9	1	0,5	0,35	0,25	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
U_1/U_0	0,0	0,9	1,0	1,03	1,05	1,065	1,075	1,085	1,095	1,105	1,11
x/c	0,0	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50

Proračunate vrednosti parametara strujanja

x (m)	u (m/s)	du/dx (m/sm)	δ (m)	δ^* (m)	Θ (m)	H	τ (N/m ²)	λ
0,00	0,00	3750	0,000166	0,000040	0,000017	2,31	0,00	7,05
0,02	54	1350	0,000151	0,000043	0,000017	2,46	15,05	2,11
0,04	60	150	0,000375	0,000108	0,000043	2,49	6,42	1,44
0,06	62	75	0,000515	0,000149	0,000060	2,49	4,78	1,36
0,08	63	53	0,000624	0,000180	0,000072	2,49	4,03	1,40
0,10	64	38	0,000714	0,000206	0,000083	2,49	3,55	1,31
0,12	65	30	0,000794	0,000230	0,000092	2,50	3,22	1,29
0,14	65	30	0,000869	0,000249	0,000100	2,48	3,03	1,55
0,16	66	30	0,000935	0,000266	0,000108	2,47	2,89	1,79
0,18	66	30	0,000993	0,000281	0,000114	2,46	2,79	2,02
0,20	67	30	0,001045	0,000294	0,000120	2,46	2,72	2,24

Promena brzine i gradijenta brzine struje duž opstrujavane površine prikazana je na slici 3.

Promena debljine graničnog sloja duž opstrujavane površine prikazana je na slici 4.

Sl. 3 — Promena brzine i gradijenta brzine
1 — brzina struje U , 2 — promena brzine dU/dx

Sl. 4 — Promena debljine graničnog sloja δ

Promena »pokretne« i impulsne debljine graničnog sloja duž opstrujavane površine, prikazana je na slici 5.

Promena tangencijalnog napona duž opstrujavane površine prikazana je na slici 6.

Sl. 5 — Promena »pokretne« i impulsne debljine graničnog sloja
1 — »pokretna debljina« δ^* , 2 — impulsna debljina Θ

Sl. 6 — Promena tangencijalnog napona i debljine graničnog sloja

1 — tangencijalni napon τ , 2 — debljina graničnog sloja δ

Zaključak

Na osnovu sprovedene analize strujanja u graničnom sloju može se zaključiti da debljina graničnog sloja ujednačeno raste od prednje ivice obstrujavane površine. Tangencijalni napon ima maksimalnu vrednost nepo-

sredno iza prednje ivice, a λ generalno teži padu. Gradijent pritiska je povoljan, pa faktor oblika graničnog sloja H ima ujednačene vrednosti. Analiza može poslužiti za proračun koeficijenta trenja u laminarnom graničnom sloju.

Literatura:

- [1] Krasnov, N. F.: Aerodinamika, Moskva, 1980.
- [2] Stribling, C. B.: Basic aerodynamics, London, 1984.
- [3] Alcock, D.: Illustrating Basic, Cambridge University Press, 1977.
- [4] Šlihting, G.: Teorija pograničnog sloja, Nauka, Moskva, 1974.
- [5] Regodić, D.: Uticaj vrste strujanja na ukupni aerodinamički koeficijent, VTG1, Beograd, 1995.
- [6] Regodić, D.: Aerodinamika rotacionog tela, VTA, Beograd, 1994.
- [7] Tehnička enciklopedija, JLZ, Zagreb, 1982.