

UDK: 533.6.07(047)=861
 COSATI: 20-04, 01-02, 14-02

Analiza uticaja perforiranih zidova okozvučnog radnog dela aerotunela sa natpritiskom prekidnog dejstva pri ispitivanju u aerotunelu

Mr Borivoj Bliznac, dipl.inž.¹⁾

Definisanje uticaja perforiranih zidova okozvučnog radnog dela aerotunela sa natpritiskom prekidnog dejstva pri aerotunelskim ispitivanjima modela letelica i aeroprofila je pitanje njihove korektno eksperimentalne i matematičke simulacije. Pri aerodinamičkim ispitivanjima nije moguće izbeći njihov neželjeni uticaj na tačnost merenih aerodinamičkih veličina- uzgon, otpor, gradijent uzgona, moment propinjanja, kvalitet strujnog polja. Kombinovanjem eksperimentalnih rezultata ispitivanja njihovog ponašanja u toku eksperimenta i korektna matematička simulacija u toku proračuna njihovog uticaja na izmerene veličine su jedina mogućnost za egzaktnu stručnu analizu.

Ključne reči: Aerotunel, perforirani zidovi okozvučnog radnog dela, granični uslovi.

Korišćene oznake i simboli

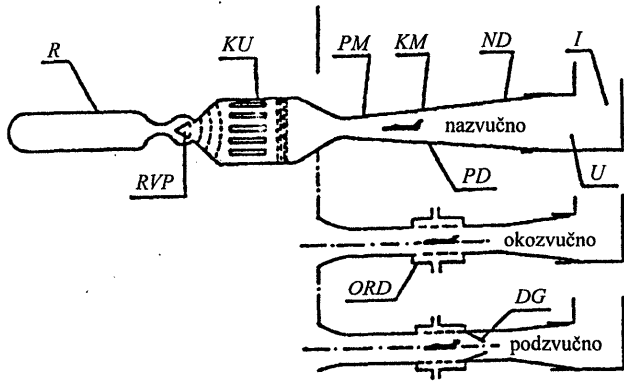
R – rezervoar za vazduh,
 RVP – regulacioni ventil pritiska duvanja,
 KU – komora umirenja,
 PM – podešljivi mlaznik,
 ORD – okozvučni radni deo,
 KM – kolica za nošenje i držanje modela,
 PD – pokretni difuzor,
 ND – nepokretni difuzor,
 U – utišivač aerodinamičke buke,
 I – izduvnik,
 DG – drugo grlo,
 RVO – regulacioni ventil odsisavanja vazduha iz ORD ,
 P_0 – zaustavni pritisak vazduha u KU (Pa),
 P'_0 – pito-pritisak (Pa),
 T_0 – zaustavna temperatura vazduha u KU (K),
 ρ_0 – gustina vazduha u KU (kg/m^3),
 R – gasna konstanta, za vazduh $R=287$ (J/kgK),
 P_∞ – statički pritisak neporemećene struje vazduha (Pa),
 M_∞ – Mahov broj neporemećene struje vazduha,
 ρ_∞ – gustina vazduha neporemećene struje (kg/m^3),
 v_∞ – brzina vazduha neporemećene struje (m/s),
 \dot{m}_∞ – maseni protok neporemećene struje vazduha (kg/s),
 V_∞ – zapremina neporemećene struje vazduha u ORD (m^3),
 A_∞ – poprečni presek neporemećene struje vazduha (m^2),
 q_∞ – dinamički pritisak neporemećene struje vazduha (Pa),

A_{ORD} – poprečni presek ORD (m^2),
 V_{KO} – zapremina KO ORD (m^3),
 \dot{m}_{DG} – maseni protok vazduha kroz DG (kg/s),
 A_{DG} – poprečni presek DG (m^2),
 \dot{m}_{ODS} – odsisana masa vazduha iz ORD (kg/s),
 A_z – površina perforiranih zidova ORD (m^2),
 a_0 – lokalna brzina zvuka (m/s),
 κ – odnos specifičnih toplota, $\kappa = C_p/C_v$; za vazduh $\kappa=1.4$,
 C_p – koeficijent pritiska u strujnom polju ($\text{Pa m}^2/\text{kg}$),
 $C_{p,KO}$ – koeficijent pritiska u KO ($\text{Pa m}^2/\text{kg}$),
 v_y – komponenta brzine strujanja vazduha normalna na zidove ORD (m/s),
 R_z – otpornost perforiranih zidova ORD ($\text{Pa}/(\text{kg/s})$).

Uvod

JEDNO od osnovnih pitanja pri definisanju uticaja perforiranih zidova okozvučnog radnog dela aerotunela sa natpritiskom prekidnog dejstva pri aerodinamičkim ispitivanjima je pitanje njihove korektno eksperimentalne i matematičke simulacije. Kako pri aerodinamičkim ispitivanjima nije moguće potpuno izbeći njihov neželjeni uticaj na tačnost merenih aerodinamičkih veličina (uzgon, otpor, gradijent uzgona, moment propinjanja, kvalitet strujnog polja i dr), to su kombinovanje eksperimentalnih rezultata ispitivanja njihovog ponašanja u toku ispitivanja i korektna matematička simulacija u toku proračuna njihovog uticaja na izmerene veličine, jedine mogućnosti za stručnu analizu. Na sl.1 je dat funkcionalni prikaz realizacija konfiguracija aerotunela sa natpritiskom prekidnog dejstva.

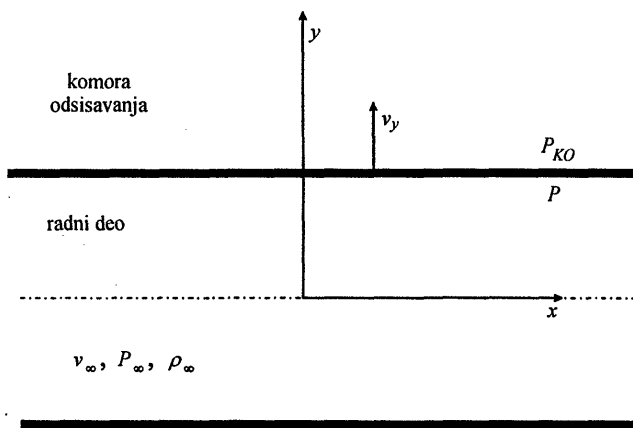
¹⁾ Vojnotehnički institut VI, 11000 Beograd, Katanićeva 15



Slika 1. Konfiguracija aerotunela sa natpritiskom prekidnog dejstva

Grafični uslovi- opšte definicije

Pod grafičnim uslovima zidova podrazumeva se relacija između normalne komponente brzine v_y i razlike pritiska kroz zid $P - P_{KO}$, kako je to pokazano na sl.2.



Slika 2. Koordinatni sistem aerotunela

Koeficijenti pritiska u strujnom polju i u komori odsisavanja su dati izrazima:

$$C_P = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2} \rho v_\infty^2} \quad (1)$$

$$C_{P,KO} = \frac{P_{KO} - P_\infty}{\frac{1}{2} \rho v_\infty^2} \quad (2)$$

Odnos brzine prostrujavanja v_y i brzine neporemećene struje vazduha v_∞ se može predstaviti pomoću potencijala poremećajne brzine ϕ izrazom:

$$\frac{v_y}{v_\infty} = \frac{\partial \phi}{\partial n} \quad (3)$$

gde je n - spoljašnja normala na zid.

Ako se pretpostavi da postavljeni model u radnom delu aerotunela generiše male poremećaje pritiska na zidovima, tada je saglasno linearizovanoj Bernoullijevoj teoriji:

$$C_P = -\frac{2}{v_\infty} \frac{d\phi}{dt} \quad (4)$$

gde je:

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v_\infty \frac{\partial}{\partial x} \quad (5)$$

linearizovani totalni diferencijal po vremenu t , a x je koordinata tangenta na zid. Shodno situaciji, grafični uslovi zida mogu se postaviti zavisno od odnosa v_y / v_∞ i koeficijentna pritiska C_P , ili derivatima od ϕ . Za proračune nestacionarnog strujanja može da se koristi linearizovani potencijal ubrzanja dat izrazom:

$$\psi = \frac{P - P_\infty}{\rho_\infty} \quad (6)$$

koji se razlikuje od C_P datim jednačinom (1).

Perforirani zidovi- grafični uslov

Grafični uslov poroznog zida, koji se koristi za perforirane zidove, dobija se pod pretpostavkom da je srednja brzina strujanja (normalna na zid) linearna funkcija pada pritiska kroz zid. U bezdimenzionalnom obliku ova se relacija može napisati u formi:

$$\frac{v_y}{v_\infty} = p_{por} \frac{P - P_{KO}}{\rho_\infty v_\infty^2} \quad (7)$$

gde se konstanta proporcionalnosti p_{por} naziva parametar poroznosti. Njega ne treba poistovećivati sa geometrijskom poroznošću zida (odnos otvorenih površina).

Recipročna vrednost,

$$R = \frac{1}{p_{por}} \quad (8)$$

je otpornost zida pri prostrujavanju. U funkciji koeficijentna pritiska jednačina (7) može se napisati u obliku:

$$\frac{v_y}{v_\infty} = p_{por} \frac{C_P - C_{P,KO}}{2} \quad (9)$$

ili

$$\frac{v_y}{v_\infty} = p_{por} \frac{C_P}{2} \quad (10)$$

ako je $P_{KO} = P_\infty$.

Grafični uslov (9) u literaturi je poznat kao Darcyjev zakon, a izvodi se za strujanje fluida u poroznom medijumu. On obuhvata viskozno strujanje, tj. proporcionalnost sile (preko pritiska) i brzine.

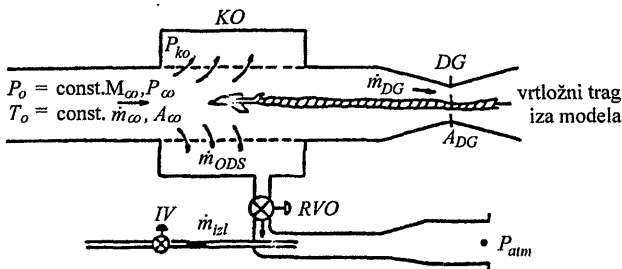
Strujanje vazduha kroz perforirane zidove okozvučnog radnog dela aerotunela sa natpritiskom prekidnog dejstva s aspekta regulacije Mahovog broja

Mahov broj u aerotunelu sa natpritiskom prekidnog dejstva izračunava se korišćenjem merenih vrednosti statičkog i zaustavnog pritiska u podzvučnom i okozvučnom režimu strujanja vazduha i iz odnosa merenih vrednosti zaustavnog i pito-pritiska u nadzvučnom režimu strujanja vazduha u aerotunelu:

$$M = 5 \left[\left(\frac{P_0}{P_\infty} \right)^{\frac{2}{7}} - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

$$\frac{P_0'}{P_0} = \left(\frac{6M^2}{M^2 + 5} \right)^{3.5} \left(\frac{6}{7M^2 - 1} \right)^{2.5} \quad (12)$$

Nominalna vrednost M -broja za podzvučni - okozvučni režim strujanja vazduha u aerotunelu zadaje se pomoću položaja DG , kako je to prikazano na sl.3.



Slika 3. Sistem upravljanja i regulacija M-broja

Punjenje ORD vazduhom je definisano jednačinom kontinuiteta:

$$V_{\infty} \frac{d\rho_{\infty}}{dt} = \dot{m}_{\infty} - \dot{m}_{ODS} - \dot{m}_{DG} \quad (13)$$

Ako se pretpostavi da se radi o politropskom procesu, može se staviti da je $p/\rho^n = \text{const}$. Kako se proces odvija veoma brzo, $n = \kappa$ i za $T_0 = \text{const}$ dobija se:

$$\frac{d\rho_{\infty}}{dt} \equiv \frac{1}{a^2} \frac{dP_{\infty}}{dt} \equiv \frac{1}{a_0^2} \frac{dP_{\infty}}{dt} \quad (14)$$

gde je $a_0 = (\kappa RT_0)^{1/2}$ brzina zvuka za date uslove (P_0 , T_0).

Takođe je:

$$\frac{V_{\infty}}{a_0^2} \frac{dP_{\infty}}{dt} = \dot{m}_{\infty} - \dot{m}_{ODS} - \dot{m}_{DG} \quad (15)$$

gde je P_{∞} srednja vrednost statičkog pritiska neporemećene struje vazduha u ORD.

Alternativno, ako se ORD puni vazduhom trenutno, dobija se:

$$\dot{m}_{\infty} = \dot{m}_{ODS} + \dot{m}_{DG} \quad (16)$$

Karakteristika perforiranih zidova ORD, u aerodinamičkom smislu, može se aproksimirati izrazom:

$$\frac{P_{\infty} - P_{KO}}{q_{\infty}} = k \frac{\rho_{\infty} v_y}{\rho_{\infty} v_{\infty}} - Q \quad (17)$$

Kako je:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{ODS} &= \rho_{\infty} v_y A_z \\ \dot{m}_{\infty} &= \rho_{\infty} v_{\infty} A_{\infty} \end{aligned} \quad (18)$$

jednačina (17) dobija sledeći oblik:

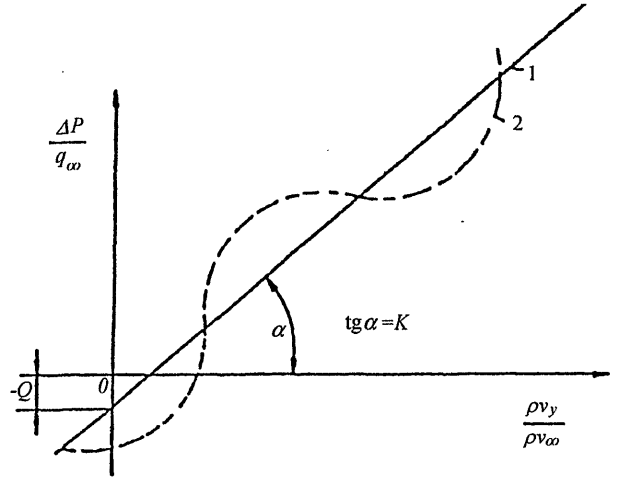
$$\frac{P_{\infty} - P_{KO}}{q_{\infty}} = k \frac{A_{\infty}}{A_z} \frac{\dot{m}_{ODS}}{\dot{m}_{\infty}} - Q \quad (19)$$

Može se staviti da je $\Delta P = P_{\infty} - P_{KO}$, pa je:

$$\frac{\Delta P}{q_{\infty}} = k \frac{A_{\infty}}{A_z} \frac{\dot{m}_{ODS}}{\dot{m}_{\infty}} - Q \quad (20)$$

Vrednosti k i Q se menjaju sa M_{∞} geometrijom izvedenih perforacija zidova ORD, i dobijaju se eksperimentalnim putem. Na sl.4, radi ilustracije, prikazana je eksperimentalno dobijena karakteristika perforiranih zidova ORD zavisno

od $\frac{\Delta P}{q_{\infty}} = f\left(\frac{\rho v_y}{\rho v_{\infty}}\right)$ kao i njena linearna aproksimacija.



Slika 4. Karakteristika perforiranih zidova ORD $\Delta P / q_{\infty} = f(\rho v_y / \rho v_{\infty})$ i njena linearna aproksimacija: 1- linearna aproksimacija; 2- izmerena karakteristika

Ako se stavi da je $k_1 = k \left(\frac{A_{\infty}}{A_z} \right)$, jednačina (20) dobija oblik:

$$\frac{\Delta P}{q_{\infty}} = k_1 \frac{\dot{m}_{ODS}}{\dot{m}_{\infty}} - Q \quad (21)$$

Ako su promene M_{∞} dovoljno male, može se smatrati da se k i Q ne menjaju, tj mogu se smatrati konstantnim.

Matematičko modeliranje perforiranih zidova okozvučnog radnog dela aerotunela sa natpritiskom prekidnog dejstva za analognu električnu simulaciju dinamike sistema regulacije M-broja

Aerotunel sa natpritiskom prekidnog dejstva je nelinearan sistem za realizaciju sistema regulacije M-broja korišćenjem konvencionalnih metoda, što implicira korišćenje linearizovanog matematičkog modela. To znači da je potrebno linearizovati dinamiku procesa oko date radne tačke.

Kako dobijanje jednačina procesa i u pojednostavljenom jednodimenzionalnom obliku može biti veoma komplikovano, uputno je koristiti analognu električnu simulaciju za analizu osobina i doprinosa pojedinačnih komponenata aerotunela na dinamiku procesa.

Perforirani zidovi ORD deluju kao otpornost za struju vazduha koja prolazi kroz njih, a koja je generisana potencijalnom razlikom pritiska između ORD i KO:

$$\partial(P_{\infty} - P_{KO}) = R_Z \partial \dot{m}_{ODS} \quad (22)$$

ili zapisano u formi;

$$R_Z = \frac{\partial(P_{\infty} - P_{KO})}{\partial \dot{m}_{ODS}} \quad (23)$$

Za male poremećaje oko radne tačke otpornost perforiranih zidova je data izrazom:

$$R_Z = \frac{k_1}{\dot{m}_{\infty}} q_{\infty} \quad (24)$$

odnosno,

$$R_z = \frac{k_1 M_\infty}{2} \sqrt{\frac{\kappa R T_0}{1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_\infty^2}} \quad (25)$$

Zaključak

Problem tačnog formiranja graničnih uslova aerotunelskih zidova i dalje egzistira kao otvoren problem. Složenost fenomena strujanja u blizini zidova aerotunela, posebno u ORD gde se nalazi model letelice za 3-D ispitivanja ili aeroprofil za 2-D ispitivanja, uticaj graničnog sloja, Mahovog broja, Reynoldsovog broja i dr. su svakako doprineli tome. Veliki doprinos u rešavanju ovog problema daju eksperimentalni podaci koji se dobijaju za različite geometrijske oblike poroznosti zidova okozvučnog radnog dela.

Literatura

- [1] RAŠUO, B. *Uticaj zidova transsoničnih aerotunela na aerodinamička ispitivanja*. doktorska disertacija, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 1988.
- [2] BLIZANAC, B. Prikaz i analiza primarnih parametara koji definišu kvalitet strujnog polja vazduha u radnom delu aerotunela. *Naučnotehnički pregled*, 1996, vol. XLVI, no. 4-5, p. 92-97.
- [3] BLIZANAC, B. Matematičko modeliranje i analogna električna simulacija sistema regulacije Mahovog broja u trisoničnom aerodinamičkom tunelu T-38. *Naučnotehnički pregled*, 1996, vol. XLVI, no. 9-10, p. 38-43.

Rad primljen: 22.7.1999.god.