



A XVI-a Conferință internațională – multidisciplinară  
„Profesorul Dorin PAVEL – fondatorul hidroenergeticii românești”  
SEBEȘ, 2016

## **CONSIDERAȚII PRIVIND FACTORII CARE DETERMINĂ REZISTENȚA LA ÎNAINARE A CORPURILOR AERODINAMICE ÎN FLUID INCOMPRESIBIL**

Constantin AVĂDANEI

### **CONSIDERATIONS FACTORS DETERMINING RESISTANCE IN SPEED ÎNAINARE BODIES INCOMPRESSIBLE FLUID**

This paper addresses issues concerning the influence on friction and detachment aerodynamic drag bodies in incompressible fluid. The results of investigations contribute to a more rigorous calculation of flight trajectories of projectiles and missiles.

Keywords: rocket, projectile, flight path, speed gradient, fluctuations, similar speeds, aerodynamic force

Cuvinte cheie: rachetă, proiectil, traiectorie de zbor, gradient de viteză, fluctuații, profil de viteze, forță aerodinamică

#### **1. Introducere**

Studiul fenomenului mișcării corpurilor de revoluție în aer, precum și factorii care influențează această mișcare se regăsește în capitolul balistică exterioară, ramură a mecanicii generale.

Această ramură dispune de mijloace proprii de investigare teoretică și experimentală [1] [2]. De la bun început, balistica exterioară s-a ocupat de mișcarea corpurilor de revoluție sub acțiunea forței gravitaționale și în prezența rezistenței la înaintare opusă de mediul înconjurător (fluid).

Pătrunderea în tainele fenomenului mișcării (zborului) corpurilor presupune abordarea unor delicate probleme de mecanică, aerodinamică, propulsivă, reactivă, fizica atmosferei și teoria probabilităților, utilizând un aparat matematic adecvat.

Dezvoltarea științei și tehnicii a pus la dispoziția specialiștilor instrumente mereu mai perfecționate de proiectare balistică și de apropiere dintre rezultatele investigațiilor teoretice și fenomenele reale ale zborului pe traiectorie.

Răspunzând la problemele amintite, se elaborează de fapt metodele pentru determinarea datelor de proiectare necesare pentru realizarea performanțelor tehnice impuse: o traiectorie de zbor corectă, un program de dirijare conform cu calculele teoretice și rezultatele simulărilor de laborator, precizia și efectul la țintă eficace.

## 2. Vâscozitatea aerului și stratul limită din jurul corpurilor de revoluție subțiri

În timpul zborului există o mișcare relativă a aerului față de corpul de revoluție (proiectil, rachetă - figura 1), fenomenele fiind studiate de aerodinamică [2] [3].

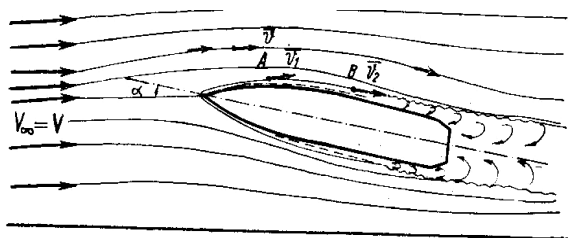


Fig.1  
Corp de revoluție  
în curent de aer

Curgerea  
aerului în jurul  
corpurilor gene-  
rează efecte prin  
apariția forțelor și

cuplurilor aerodinamice.

În jurul corpului viteza fluidului are valori și direcții diferite. În figura 1 este reprezentată mișcarea aerului prin linii de curent, iar dacă în două puncte A și B situate de-a lungul aceleiași linii viteza și presiunea statică a aerului sunt  $v_1$ ,  $p_1$  și respectiv  $v_2$ ,  $p_2$ , relația dintre acestea este dată de ecuația lui Bernoulli, de forma [5] [6]:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2}v_1^2 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{1}{2}v_2^2 = const. \quad (1)$$

în care  $\rho$  este densitatea aerului.

Relația (1) este valabilă în ipoteza unei curgeri permanente și incompresibile, cu viteze ale aerului de până la 200-240 m·s<sup>-1</sup>.

În timpul curgerii pe lângă corp, aerul se comportă ca un fluid vâscos.

Vâscozitatea aerului se poate explica prin schema din figura 2, analizând variația vitezei aerului față de corp după normala într-un punct la suprafața acestuia [2].

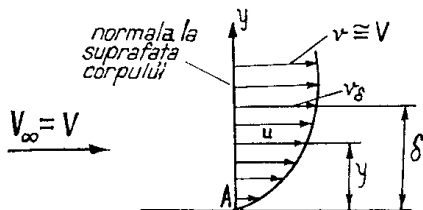


Fig. 2 Strat-limită la suprafața corpului de revoluție

Particulele de aer din contact direct cu corpul aderă la acesta sub acțiunea forțelor de coeziune moleculară, iar viteza acestor particule față de

corp este nulă. Aderența este cu atât mai mare cu cât gradul de rugozitate al suprafeței este mai mare. În punctele de pe normala Ay, situate față de suprafață dincolo de o distanță suficient de mare, viteza curentului,  $v$ , devine practic egală cu viteza de la infinit ( $v = V_{\infty}$ ).

Datorită vâscozității apar forțe interne de frecare - tensiuni tangențiale, paralele cu direcția de curgere - sub acțiunea cărora vitezele particulelor din interiorul fluidului se micșorează pe măsură ce particulele respective sunt mai apropiate de corp. În felul acesta, datorită vâscozității, fiecare strat de aer se deplasează cu o anumită viteză proprie,  $u$ , care depinde de distanța  $y$  a stratului față de suprafața corpului (figura 2).

Experimental s-a constatat că variația vitezei  $u$  a fluidului după normala la suprafața corpului, cauzată de forțele interne de frecare, se manifestă numai până la o mică distanță de suprafața corpului, într-un strat de grosime  $\delta$ , care în cazul aerului are dimensiuni de ordinul milimetrilor [1] [3].

Stratul de fluid din vecinătatea corpului în care se manifestă puternic forțele de vâscozitate și în care viteza variază după normala la suprafața corpului este tocmai stratul-limită.

În interiorul stratului-limită mișcarea fluidului poate fi laminară, turbulentă sau mixtă. Caracterul mișcării se apreciază cu ajutorul numărului Reynolds, definit de relația [4] [6]:

$$R_e = \frac{V_{\infty} \cdot l}{\nu} = \frac{V_{\infty} \cdot l}{\mu} \rho \quad (2)$$

în care,  $V_\infty$  - este viteza curentului la infinit amonte (în acest caz este viteza corpului),  $l$  - este lungimea corpului de revoluție,  $\nu$  - este coeficientul de vâscozitate cinematică a aerului,  $\mu$  - este coeficientul de vâscozitate dinamică a aerului,  $\rho$  - densitatea aerului. Între cei doi coeficienți există relația [2] [3]:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (3)$$

Valorile numărului Reynolds pentru cele trei tipuri de mișcări se determină experimental.

### 3. Frecarea și desprinderea, fenomene principale care influențează rezistența la înaintare

Frecarea și desprinderea reprezintă două caracteristici importante ale stratului-limită, care influențează rezistența la înaintare a corpurilor de revoluție în timpul zborului pe o anumită traiectorie.

La viteze de zbor subsonice, în general se formează lângă peretele corpului un strat-limită de tip mixt (figura 3).

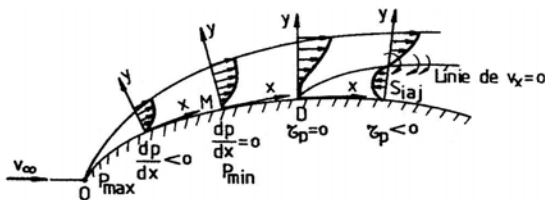


Fig. 3 Frecarea și desprinderea în stratul-limită

Mărimea forței de frecare care se manifestă în interiorul

stratului limită este legată de gradientul normal al vitezei printr-o relație de forma [2] [5]:

$$\tau = \tau_l + \tau_t = \mu_f \left( \frac{\partial V}{\partial y} \right) \quad (4)$$

cuprinzând un termen laminar datorat vâscozității și un termen turbulent datorat fluctuațiilor mișcării. Întrucât la peretele corpului fluctuațiile se anulează, frecarea are formal aceeași expresie, atât pentru cazul laminar, cât și pentru cel fluctuant [2] [5]:

$$\tau_w = \mu \left( \frac{\partial V}{\partial y} \right)_{y=0} \quad (5)$$

în care  $\mu$  - este vâscozitatea moleculară.

În figura 3 se prezintă schematic mișcarea fluidului pe suprafața corpului de revoluție și momentul desprinderii de perete, ca urmare a acțiunii combinate a forțelor de vâscozitate și variația presiunii.

Astfel, o particulă de fluid situată în vecinătatea suprafeței unui obstacol pornind de la punctul O de viteză nulă, va avea viteze mai mari și prin urmare presiunile vor fi mai mici în zona respectivă,  $\frac{dp}{dx} < 0$ . Presiunea continuă să scadă până la o valoare minimă (punctul M,  $\frac{dp}{dx} = 0$ ) după care începe din nou să crească  $\frac{dp}{dx} > 0$ . Mișcarea particulei devine încetinită datorită forțelor de presiune și vâscozitate și particula își modifică traiectoria spre exterior.

În acest mod particulele din stratul limită se desprind de perete, iar particulele din afară se deplasează în sens invers.

Rezultă că în punctul de desprindere (linia de desprindere) tensiunea de frecare este nulă și prin urmare condiția de desprindere va fi [4] [6]:

$$\tau_p(x_0, 0) = \mu \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} \right)_{(x_0, 0)} = 0 \quad (6)$$

unde  $x_D$  - este abscisa punctului în care se realizează desprinderea stratului-limită.

Dacă  $v_x(x, y)$  se determină prin integrarea ecuațiilor de mișcare în stratul limită, atunci determinarea poziției punctului de desprindere se calculează cu relația (6).

Din ecuațiile de mișcare, considerând  $y = 0$  și condițiile la limită se obține relația [2] [6]:

$$v \left( \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \right)_{y=0} = -U_0 U_0' = \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx}, \quad (7)$$

cea ce arată că în vecinătatea suprafeței solide profilul vitezei depinde de gradientul de presiune.

## 4. Concluzii

■ După desprinderea stratului-limită, particulele de aer încep să se rotească, dând naștere așa-numitelor vârtejuri.

■ În cazul corpurilor de revoluție subțiri, stratul-limită este laminar sau mixt, dacă numărul Reynolds,  $R_e$ , are valori până la  $5 \cdot 10^6$ . Peste această limită mișcarea este turbulentă.

■ Antrenarea fluidului în mișcare în stratul-limită, precum și formarea și întreținerea vârtejurilor, necesită un consum de energie pe seama energiei cinetice a corpului aflat pe traiectoria de zbor. Ca urmare, viteza de zbor a corpului scade, ca și cum asupra acestuia ar acționa o forță de sens contrar mișcării. Acest consum de energie este mai mic în cazul stratului-limită laminar.

■ Rezistența la înaintare este cea mai importantă forță aerodinamică care acționează asupra corpurilor de revoluție aflate pe traiectoria de zbor. Efectul rezistenței la înaintare este micșorarea vitezei corpului și, implicit, mărirea curburii traiectoriei.

## BIBLIOGRAFIE

[1] Avădanei, C., *Contribuții în studiul optimizării fenomenelor gazodinamice din dispozitivele armamentului de calibrul redus*, Teză de doctorat, Academia Tehnică Militară, București, 1999.

[2] Moraru, Fl., *Manual de balistică exterioară*, Editura Militară, București, 1976.

[3] Niță, M.M., ș.a., *Avioane și rachete. Concepte de proiectare*, Editura Militară, București, 1985.

[4] Săvulescu, Șt.N., ș.a., *Cercetări matematice în teoria modernă a stratului limită*, Editura Academiei RSR, București, 1981.

[5] Ștefan, S., *Ecuațiile mecanicii fluidelor*, Editura Academiei Tehnice Militare, București, 1996.

[6] Ștefan, S., *Mecanica fluidelor*, Editura Academiei Tehnice Militare, București, 1992.

Lector Univ. Dr.Ing. Constantin AVĂDANEI

membru AGIR

E-mail: costi\_av\_2003@yahoo.com