

DIRIJAREA TRANSFERULUI DE CALDURĂ ȘI A CURGERII ÎN JURUL UNUI TANDEM DE CILINDRI ÎN CURENT LIMITAT

Cerc. st. Tudor CUCIUC*, Acad. Mircea BOLOGA*, Ing. Ion TIRDEA**

*Institutul de Fizică Aplicată al Academiei de Științe a Moldovei Chișinău

**Institutul Național Cercetare – Dezvoltare Turbomotare COMOTI București

Abstract. Results of experimental investigation of the effect of the flow constraint and flow regime in the boundary layer of the cylinder, placed in the upstream, on the local characteristics of the flow and heat transfer to the second cylinder are presented. It is found that there is a critical value of the flow constraint at which the hydrodynamic characteristics change by a jump. A classification of flow regimes about a tandem of cylinders is given.

1. INTRODUCERE

Procesul de transfer de căldură la curgerea peste un fascicul de cilindri este direct legat de natura curgerii fluidului. La aşezarea paralelă în fascicul, cilindrii din rândul al doilea și următoarele sunt plasati în regiunea de formare a vârtejuri după cilindrii din amonte, ceea ce provoacă o dependență majoră a caracteristicilor atât locale, cât și integrale de transfer de căldură și a pierderilor de presiune de dinamica acestor vârtejuri.

Unele particularități ale curgerii în porțiunea amonte a fasciculului s-au evidențiat prin cercetarea curgerii transversale peste un tandem de cilindri [2, 5, 7, 8]. Cea mai semnificativă este modificarea în salt a caracteristicilor hidrodinamice ale cilindrilor la atingerea unei valori critice al pasului longitudinal $L_{cr}=L=l/d$ (l distanța dintre axele cilindrilor). Acest pas corespunde distanței dintre cilindri la care curgerea în formă de două vârtejuri închise în spațiul dintre ei se transformă în cale de vârtejuri Karman [5]. În [8] se arată că fenomenul de transformare în salt a curgerii peste un tandem de cilindri este influențat de numărul Re , iar dirijarea curgerii sau modificarea valorii pasului longitudinal critic se poate efectua prin generarea artificială a turbulentei în stratul limită al cilindrului plasat în amonte [4], sau în fluxul în amonte de tandemul de cilindri [7].

Totodată, analiza lucrărilor de specialitate arată că din cauza diferitor condiții de efectuare a cercetărilor experimentale rezultatele obținute sunt deseori contradictorii [1, 6]. Unele abateri de la clasificarea regimurilor de curgere, prezentate în [5, 8], pot fi explicate prin influența pereților asupra curgerii în spațiul dintre cilindri [3]. Însă aceste rezultate se referă doar la mișcarea fluidului peste un tandem cu regim laminar de curgere în stratul limită al cilindrului, plasat în amonte.

În lucrare sunt prezentate rezultatele cercetărilor influenței regimului de curgere în stratul limită pe suprafața cilindrului plasat în amonte asupra caracteristicilor hidrodinamice și de transfer de căldură la mișcarea fluidului peste un tandem de cilindri în curent limitat.

2. INSTALAȚIA ȘI METODICA CERCETĂRILOR

Cercetările experimentale au fost efectuate în camere cu dimensiunile $150 \times 70 \text{ mm}^2$ și $50 \times 12 \text{ mm}^2$ a două tuneluri hidrodinamice cu circuit închis. Tandemul de cilindri cu diametri egali a fost instalat perpendicular pe direcția curentului de fluid. Limitarea curentului de fluid $S=d/H$ în plaja $0,05-0,40$ s-a efectuat atât prin modificarea înălțimii camerei de lucru H , cât și prin utilizarea cilindrilor de diferite diametre. Pasul longitudinal $L=l/d$ s-a modificat folosind un dispozitiv special, descris în [2], în intervalul $L=l/d=1-6$. Criteriul Reynolds are valori în intervalul $4 \cdot 10^4 \dots 2 \cdot 10^5$. Plasarea tandemului în cameră este prezentată în fig. 1.

Modificarea regimului de curgere în stratul limită s-a efectuat prin injectarea microbulelor electrolitice pe suprafața cilindrului, plasat în amonte (primul cilindru) [2, 4]. Metodica cercetărilor este descrisă în [2].

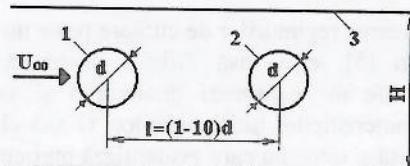


Fig.1. Plasarea geometrică a tandemului de cilindri în camera de lucru.

3. CERCETĂRILE EXPERIMENTALE ȘI ANALIZA REZULTATELOR

Curgerea peste un cilindru singular poate fi dirijată prin modificarea regimului de curgere în stratul limită sau influențând direct asupra procesului de formare și desprindere a vârtejuri din spatele lui. În această situație, fiecare din cilindrii, plasati tandem, poate fi analizat ca un element de dirijare a proceselor de transfer de căldură și de curgere peste un cilindru singular. Pe de altă parte curgerea peste un tandem de cilindri este una cu particularități deosebite. Astfel, în [5] se propune o clasificare largă a regimurilor de

curgere în jurul tandemului de cilindri în funcție de valoarea pasului longitudinal L și al criteriului Re . Evidențierea diferitor regimuri, specifică doar curgerii peste un tandem de cilindri, reprezintă un pas important în aprecierea influenței unor metode de dirijare a caracteristicilor proceselor de transfer de căldură și curgerii.

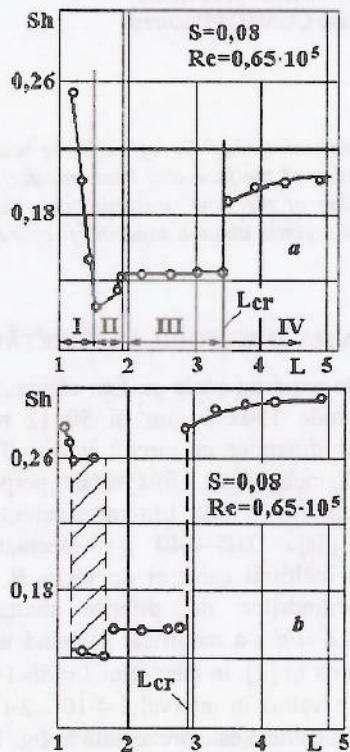


Fig. 2. Variația criteriului Sh în funcție de pasul longitudinal L pentru $S < S_{cr}$:
a-regim laminar, b-turbulent.

Clasificarea regimurilor de curgere peste un tandem, propusă în [5], este însă dificilă pentru a analiza influența diferitor parametri geometrici și de regim asupra caracteristicilor hidrodinamice. O altă clasificare mai adevarată și totodată care evidențiază particularitățile de bază a curgerii peste un tandem de cilindri poate fi obținută din analiza variației criteriului Strouhal Sh , în funcție de pasul longitudinal L , prezentată în fig. 2,a.

Clasificarea regimurilor de curgere în funcție de pasul longitudinal cuprinde următoarele tipuri de modificare a frecvenței de desprindere a vârtejuri: zona I – $L = 1,00-1,40$, frecvența Sh crește cu creșterea L ; II – $L = 1,40-1,95$, frecvența Sh crește cu creșterea L ; III – $L = 1,95-3,45$, frecvența Sh nu depinde de modificarea L ; IV – $L = 3,45$ – infinit, se apropiă de cea pentru un cilindru singular.

În zonele I-III curgerea în spațiul dintre cilindri apare în formă de două vârtejuri cu circulație diferită care, deși oscilează cu frecvența de desprindere a vârtejuri din spatele cilindrului secund, însă nu părăsesc acest spațiu. Vizualizarea curgerii efectuată prin metoda injectării microbulelor în porțiunea din

spatele primului cilindru arată că în zona III cu creșterea pasului L vârtejurile se deplasează în aval, iar dimensiunile lor practic nu sunt influențate de modificarea pasului L , și corespund cazului când acest pas este minim. În apropierea nemijlocită de primul cilindru se dezvoltă o nouă structură a curgerii cu o mișcare turbulentă și haotică a fluidului.

Din cele expuse reiese că în zona III straturile limită libere desprinse de pe suprafața primului cilindru se închid complet în două vârtejuri cvazistacionare în partea din față a cilindrului secund și practic nu afectează calea de vârtejuri după tandem. În zona I, doar o parte a straturilor limită libere sunt antrenate la formarea vârtejuri din spațiul dintre cilindri. Altă parte, care descrește odată cu creșterea pasului L , influențează direct asupra procesului de desprindere a vârtejuri din spatele cilindrului secund. Zona II poate fi menționată ca o tranziție de la zona I la III.

În zona IV curgerea din spatele primului cilindru este asemănătoare curgerii după un cilindru singular. Tranziția de la configurația curgerii cu vârtejuri închise în spațiul dintre cilindri (zonele I-III) la cea în formă de cale de vârtejuri Karman (zona IV) se petrece în salt. Acest fenomen prezintă particularitatea de bază a curgerii peste un tandem de cilindri și apare la atingerea pasului longitudinal critic cu valoarea $L_{cr} = 3,45$ (fig. 2). Această valoare L_{cr} este caracteristică curgerii cu strat limită laminar pe suprafața primului cilindru.

Tranziția în stratul limită al primului cilindru de la curgere laminară la turbulentă provoacă o modificare a curgerii în zonele I și II. Din analiza variației Sh în funcție de L , prezentată în fig. 2,b se evidențiază un interval $1,20 < L < 1,60$ în care frecvența de desprindere a vârtejuri este cuprinsă între două valori extreme. În intervalul $L < 1,60$ curentul de fluid din spațiul dintre cilindri se abate de la axa de simetrie. Abaterea poate fi stabilă ($L < 1,20$) sau instabilă, basculantă de la o poziție extremă la alta în ambele părți de la axa de simetrie ($1,20 < L < 1,60$). Prin modificarea regimului de curgere în stratul limită al primului cilindru se obține o reducere a valorii pasului longitudinal critic $L_{cr} = 2,95$.

Limitarea curentului de fluid nu influențează esențial curgerea în jurul tandemului de cilindri în intervalul de modificare a coeficientului de strangulare $S = d/H < 0,20$, ceea ce reiese și din analiza fig. 3 în care este prezentată variația Sh în funcție de S în zona III. Cu creșterea lui S , influența pereților canalului devine din ce în ce mai importantă și se manifestă printr-o creștere lentă a frecvenței de desprindere a vârtejuri în toate zonele de modificare a pasului L . Totodată plaja zonelor practic este independentă de S . În intervalul $0,20 < S < 0,22$ curgerea în spațiul dintre cilindri este instabilă și se caracterizează printr-o apariție haotică a căii de vârtejuri Karman în zona III de modificare a pasului L .

Sub influența puternică a pereților asupra curgerii peste tandemul de cilindri ($S > 0,22$) se restabilește curgerea stabilă în jurul cilindrilor. În apropierea valorii $S = 0,21$ frecvența Sh se modifică brusc. Din această cauză $S = 0,21$ este numit critic (S_{cr}).

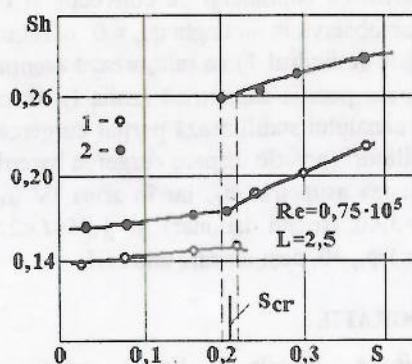


Fig. 3. Influența coeficientului S asupra criteriului Strouhal:
1-regim laminar, 2-turbulent.

În fig. 4 se prezintă variația Sh în funcție de L pentru $S = 0,24$ și diferite regimuri de curgere în stratul limită al primului cilindru. Este evidentă dispariția zonei III pentru ambele regimuri de curgere în stratul limită, iar zona IV se extinde până la valoarea $L = 2,00$ (regim laminar) sau $L = 1,75$ (regim turbulent). Aceste valori ale pasului longitudinal pot fi enunțate critice, deoarece, la fel ca și la plasarea tandemului de cilindri într-un curent nelimitat, tranziția de la zona I la IV este însoțită de un salt al frecvenței de desprindere a vârtejurilor (fig. 4). Este de menționat că pereții canalului stabilizează parțial curgerea în spațiul dintre cilindri în zona I (regim turbulent), iar la valori ridicate ale S în întreaga plajă de modificare a lui L , cu excepția pasului critic, se observă o desprindere, practic, periodică a vârtejurilor în partea din spate a tandemului.

Mai afectat de configurația curgerii din spațiul dintre cilindri este cilindrul secund. Unele particularități ale distribuției coeficienților de convecție α și de presiune \bar{P} pe circumferința cilindrului secund sunt prezентate în lucrările [2, 4] ale autorilor. Dispariția zonei III, cauzată de influența pereților asupra curgerii peste un tandem la valori ridicate ale $S > S_{cr}$, cât și micșorarea esențială a pasului critic influențează puternic poziția punctelor de pe suprafața cilindrului secund, care caracterizează evoluția stratului limită sau corespund valorilor maxime și minime ale coeficientului de convecție.

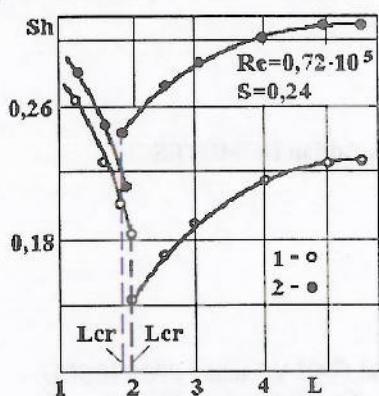


Fig. 4. Variația criteriului Sh în funcție de pasul longitudinal L pentru $S > S_{cr}$:
1-regim laminar, 2-turbulent.

Caracteristicile proceselor de transfer de căldură și de curgere peste porțiunea din față a cilindrului se deosebesc de cele de curgere peste un cilindru singular. Coeficientul de convecție atinge un maxim într-un punct diferit de cel de stagnare a fluidului ($\phi = 0$) la un unghi φ_m (fig. 9, [2]). În acest punct are loc impactul straturilor limite libere, desprinse de primul cilindru pe suprafața cilindrului secund. În ambele părți de la punctul φ_m se dezvoltă straturi limită, iar coeficientul de convecție descrește pe măsură ce grosimea stratului limită crește. În fig. 5 se prezintă variația poziției punctului φ_m cu coeficienți de convecție și presiune maximi, la două valori ale coeficientului $S = 0,08; 0,24$ și diferite regimuri de curgere în stratul limită al primului cilindru, în funcție de pasul L .

În regiunea $S < S_{cr}$ (fig. 5,a), indiferent de regimul de curgere în stratul limită pe suprafața primului cilindru, în zona I și III se observă o descreștere a unghiului φ_m cu coeficient de convecție maxim. În apropierea pasului critic L_{cr} acest punct se deplasează în salt spre punctul de stagnare din partea din față a cilindrului. În zona IV variația coeficienților de convecție și de presiune, deși este analogică curgerii peste un cilindru singular cu strat limită turbulent, însă α are valori mai ridicate pe întreaga suprafață a cilindrului. Prin inițierea regimului turbulent de curgere în stratul limită a primului cilindru se obține o descreștere bruscă a unghiului φ_m . Totodată pe suprafața din față a cilindrului secund în zona I se observă două valori ale acestui unghi. Prezența diferitor valori ale φ_m se explică prin abaterea currentului de fluid în spațiul dintre cilindri de la axa de simetrie. Valoarea mai mare a unghiului φ_m corespunde părții suprafeței cilindrului spre care se abate currentul de fluid.

La valori ridicate ale $S > S_{cr}$ (fig. 5,b) influența pasului L asupra unghiului φ_m este mai pronunțată. În comparație cu $S < S_{cr}$, unghiul $\varphi_m \neq 0$ se păstrează și la pași $L > L_{cr}$ (zona IV). El este o consecință a defectului mare de viteză a fluidului din partea amonte a cilindrului. Pentru regimul turbulent de curgere în stratul limită a primului cilindru este caracteristică aceeași poziție asimetrică a unghiului φ_m față de punctul de stagnare ($\phi = 0$) în zona I, însă influența pereților canalului asupra diferenței φ_m este mai slabă. Totodată practic dispare fenomenul de modificare basculantă a unghiului φ_m observat la $S < S_{cr}$. Astfel, limitarea currentului de fluid are un efect de stabilizare a curgerii peste un tandem de cilindri.

5. CONCLUZII

Se propune, în baza analizei variației frecvenței de desprindere a vârtejurilor Sh în funcție de pasul longitudinal L , o clasificare nouă a regimurilor de curgere peste un tandem de cilindri. Se arată că la o valoare critică a coeficientului de strangulare a curgerii $S_{cr} = 0,21$ curgerea se modifică brusc și se explică prin dispariția zonei III, în care Sh este constant. Ca și pentru $S < S_{cr}$ în cazul influenței puternice a pereților ($S > S_{cr}$) apare fenomenul de modificare în salt a caracteristicilor hidrodinamice la atingerea unei distanțe critice L_{cr} .

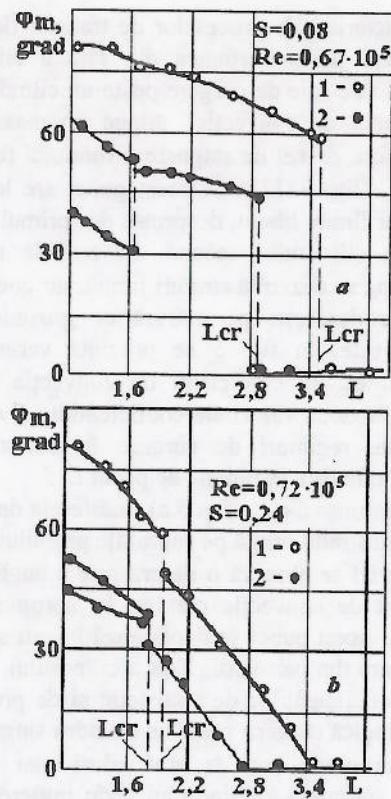


Fig.5. Variatia unghiului φ_m în funcție de pasul L :
 a – $S=0,08$, b – $S=0,24$, 1 – regim laminar, 2 – turbulent.

Realizarea regimului turbulent de curgere în stratul limită al cilindrului plasat în amonte prin utilizarea metodei de generare a turbulenței cu microbule are ca efect reducerea valorii pasului critic de la 3,45 la 2,95 ($S < S_{cr}$) și de la 2,00 la 1,85 ($S < S_{cr}$). În zona I curentul de fluid din spațiul dintre cilindri se abate de la axa de simetrie. Frecvența Sh în intervalul $1,20 < L < 1,60$ este cuprinsă între două valori extreme, datorită abaterii basculante a curentului de fluid.

Punctul cu coeficienți de convecție și de presiune maxim se observă la un unghi $\varphi_m \neq 0$. În regim turbulent de curgere (cilindrul 1) se micșorează esențial valoarea φ_m și apare poziția asimetrică (zona I). În cazul $S > S_{cr}$ pereții canalului stabilizează parțial curgerea în spațiul dintre cilindri (practic dispără curgerea basculantă), însă se păstrează asimetria φ_m , iar în zona IV în intervalul $2,00 < L < 3,40$ (regim laminar) și $1,85 < L < 2,90$ (regim turbulent) $\varphi_m \neq 0$, deși dispără zona III.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Bokain A., Geoola F. *Vortex shedding from two interfering circular cylinders*, J.of Engineering Mechanics, 1984, V.110, N.4, pp. 623-628.
- [2] Bologa M., Cuciuc T., Paucov Yu. *Ghidrodinamica i teplootdacea tandemă cilindrov pri turbulizații pogranicinogo sloia na cilindre, ustanovlenom vâse po potoku*, Energetica(Lituania), 1992, N.3, pp. 44-56.
- [3] Cuciuc T., Bologa M., Paucov Yu. *Influența strangulării asupra curgerii în jurul unui tandem de cilindri*, Analele conferinței internaționale Turbo'98, București, 1998, V.1, pp. 517-524.
- [4] Cuciuc T., Paucov Yu., Bologa M., Tirdea I. *Vlijanie electroliznogo gazovadelenia na poperecinoe obtecanie cilindra*, Electronnaia obrabotca materialov, 1998, N.5-6, pp. 70-76.
- [5] Igarashi T. *Characteristics of the flow around two circular cylinders arranged in tandem*, 1st Report, Bulletin of the JSME, 1981, B24.323-331.
- [6] King R., Johns D.J.W. *Wake interaction experiments with two flexible circular cylinders in flowing water*, J. Sound and Vibration, 1976, V.45259-283
- [7] Ljungkrona L., Norberg Ch., Sundén B. *Free-stream turbulence and tube spacing effects on surface pressure fluctuations for two tubes in line arrangement*, Journal of Fluids and Structures, 1991, N.5, pp. 701-727.
- [8] Zdravcovich M.M. *The effects of interference between circular cylinders in cross flow*, Journal of Fluids and Structures, 1987, N.1, 239-261.

NOI APARIȚII

Emil JUGUREANU
 Procese în mașini și instalații frigorifice
 Vol. I și Vol II. Ed. CERMI, Iași, 728 p, 2001

Vlad Mario HOMUTESCU, Condrat Adrian HOMUTESCU, Adrian HOMUTESCU
 Mașini și instalații termice și hidraulice
 Ed. CERMI, Iași, 270 p, 2001.

L. ȚURCANU
 Dinamica gazelor în mașini termice și pneumatice
 Editura ACADEMICA, Galați, 310 p, 2001.

Gheorghe DUCA, Alexandru CRĂCIUN, Tudor SAJIN, Aurel GABA, Lucian PĂUNESCU
 Tehnologii moderne de ardere și de reducere a emisiilor poluante în atmosferă
 Editura Universității de Stat din Moldova, Chișinău, 220 p, 2002.