

FÜTÖTT KÖRHENGER KÖRÜLI ÁRAMLÁS VIZSGÁLATA

FLOW AROUND A HEATED CIRCULAR CYLINDER

Bolló Betti*

ABSTRACT

Numerical investigation were carried out to study the effect of cylinder heating on the characteristics of the flow and heat transfer in a two-dimensional laminar flow of air past a heated circular cylinder for Reynolds numbers of 150. The effect of dynamic viscosity, density, thermal conductivity and specific heat variations on the fluid dynamics occurring with the cylinder heating was analyzed separately.

1. BEVEZETÉS

Az áramlásba helyezett testek körül kialakuló örvények mind mechanikai, mind hőtechnikai szempontból való elemzése kihívást jelent a mérnökök számára. Elegendő, ha a rúdszerkezetek illetve kábelek áramlás keltette rezgéseit vagy más nézőpontból a fűtőpatronokkal megoldott hevítés tervezési kérdéseit említjük.

A gyakorlati fontosság miatt sok kutató foglalkozik az álló és mozgó henger körül kialakuló áramlások elméleti, numerikus és kísérleti vizsgálatával. A párhuzamos áramlásba helyezett álló henger körüli áramlásnak igen kiterjedt szakirodalma van [1-3].

A folyadékáramlásba helyezett fűtött körhenger vizsgálatánál legtöbb kutató [4, 5] az áramló közeg viszkozitásának és sűrűségének hőmérséklettől való függését elhanyagolható a hatása, de nagyobb különbség esetén figyelembe kell venni, hogy a közeg tulajdonságai a hőmérséklet hatására megváltoznak, vagyis az alapegyenletek rendszerében a termodinamikai tulajdonságok a hőmérséklettől függővé válnak. Ez jelentős hatással van a közeg jellemzőire és az áramlás jelensége sokkal bonyolultabbá válik, mint izotermikus esetben. Mérésekkel bizonyították [6-8], hogy a henger hőmérsékletének növelésével a folyadék kinematikai viszkozitása megváltozik, ez jelentősen befolyásolja a helyi Reynolds-szám értékét az áramlási térben, különösen a fűtött henger közelében.

Fűtött henger esetén fontos kérdés az áramló közeg állapotjelzőinek hőmérsékletfüggése, ezért a numerikus számításaink során megvizsgáljuk, hogy a közeg tulajdonságainak hőmérsékletfüggése hogyan befolyásolja az egyenletes áramlásba helyezett fűtött hengernél kialakuló áramlási jellemzőket. Megállapítjuk, hogy a

henger és a közeg közötti nagy hőmérsékletkülönbség esetén a közeg tulajdonságainak hőmérsékletfüggése általában nem elhanyagolható, valamint a hőmérsékletkülönbség nagyságának is jelentős hatása van az örvényleválás áramlási jellemzőire.

2. MATEMATIKAI MODELL

Avonatközö alapegyenleteket a kereskedelmi forgalomban kapható Ansys Fluent programcsomaggal végeztük el, ami a véges térfogatok módszerét alkalmazza. Kétdimenziós lamináris áramlásra időfüggő számítást végeztünk másodrendű implicit formulációval. A mozgás- és energiaegyenletek számításához másodrendű eljárást alkalmaztunk.

A numerikus vizsgálatokhoz alkalmazott számítási tartomány két koncentrikus körből áll, a belső kör a henger felületét képezi (d), a külső pedig a távoli teret (d_∞). A koordináta-rendszer origója a kör középpontjában van, a leáramlás az x irányában történik.

A számítási tartomány méret, háló és időlépés függetlenségét korábbi tanulmányainkban részletesen vizsgáltuk [9,10], ezek alapján a számítási tartományt $d_\infty/d=220$ nagyságúnak választottuk, ahol 360×310 (kerületi irány \times sugárirány) hálófelbontást alkalmaztunk, valamint a dimenziótlan időlépés nagyságát $\Delta t=0,001$ értékre írtuk elő. A henger közelében sűrűbb a hálózás, mint a hengtől távol.

A külső peremen konstans abszolút hőmérsékletű (T_∞), egyenletes sebességű (u_∞) közegáramot írtunk elő. A hengerfelület abszolút hőmérséklete T_w , itt a sebességkomponensek eltűnnek. Számításainkat többféle

$$T^* = T_w / T_\infty \quad (1)$$

hőmérsékletarányánál végeztük el ($T^*=1; 1,1; 1,5$ és $1,8$).

2.1. Dimenzió nélküli mennyiségek

A numerikus számításból nyert sebesség- és nyomáseloszlás ismeretében kiszámítható az egységnyi hosszúságú hengerre vonatkozó felhajtóerő- (C_L) és ellenállás-tényező (C_D) a következő definíció alapján:

$$C_L = \frac{2 F_L}{\rho u_\infty^2 d}, \quad C_D = \frac{2 F_D}{\rho u_\infty^2 d}, \quad (2)$$

* egyetemi tanársegéd, Miskolci Egyetem, Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Tanszéke
e-mail: aramzb@uni-miskolc.hu

ahol az F_D és az F_L a d átmérőjű körhenger egységnyi hosszúságú felületére ható erő x irányú, illetve arra merőleges komponense, a ρ pedig a közeg sűrűsége. A henger hátsó pontjában lévő nyomástényezőt (C_{pb}) a következő egyenlet alapján számítjuk ki:

$$C_{pb} = \frac{2(p - p_\infty)}{\rho u_\infty^2}, \quad (3)$$

ahol p a nyomás a henger hátsó pontjában.

A henger mögött keletkezett teret a dimenzió nélküli örvényleválási frekvenciával, az ún. Strouhal számmal szokták jellemezni

$$St = f d / u_\infty, \quad (4)$$

ahol f az örvényleválás frekvenciája. A hőmérsékletmező jellemzése a henger és a közeg közötti fajlagos hőátadási tényezővel, az ún. Nusselt számmal történik:

$$Nu = \alpha d / \lambda, \quad (5)$$

ahol α a hőátadási tényező, λ a közeg hővezetési tényezője. A szakirodalomban egy tetszőleges periodikus függvény (C) időátlagát és effektív középértékét (továbbiakban az angol rövidítést alkalmazva *rms*: root-mean-square) értékét szokták összehasonlítani, amit a következő numerikus integrálással számolunk ki:

$$C_{\text{át}} = \frac{1}{n P} \int_{t_1}^{t_1+nP} C(t) dt, \quad (6)$$

$$C_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{n P} \int_{t_1}^{t_1+nP} [C(t) - C_{\text{át}}]^2 dt},$$

ahol a t_1 az integrálás alsó határa, P egy örvény leválási periódusa, n a számításához alapul vett periódusok száma. A C értéke C_L , C_D , C_{pb} és Nu értékeit veheti fel.

2.2. A közeg tulajdonságai

Mérésekkel bizonyították [6, 10], hogy a hőmérséklet hatása miatt a folyadék kinematikai viszkozitása megváltozik, amely jelentősen befolyásolja a helyi Reynolds-szám értékét az áramlási térben, különösen a fűtött henger közelében. (A helyi Reynolds szám: $Re = u_\infty d / \nu_\infty$, ahol ν_∞ a közeg kinematikai viszkozitása a zavartalan áramlás hőmérsékletével számolva.) A közeg kiválasztása fontos kérdés, mert fűtött henger hőmérsékletnövekedését csökkenti vagy teljesen elfojtja a levegőáramlás [8, 12], ugyanakkor vízbe helyezett henger körüli áramlás pontosan ellenkező tendenciát mutat, mivel a hőmérséklet növekedésével a víz kinematikai viszkozitása csökken [6, 7, 11]. Számításainkat levegő áramlását feltételezve végeztük el.

A közeget [13] összenyomhatónak tekintette, míg más szerzők [5,14] azt feltételezték, hogy az áramlási közeg összenyomhatatlan, vagyis a közeg sűrűsége nem függ a nyomástól, és elhanyagolta a helyi sűrűségválto-

zást is a kontinuitási egyenletben ($\partial\rho/\partial t$), miközben a számításaiban a folyadék többi tulajdonsága a hőmérséklettől függ. Az általunk vizsgált levegőáramlásnál kicsi a Mach-szám ($Ma = u_\infty/a < 0,015$, ahol a a hangsebesség levegőben), ebből következik, hogy a nyomásból származó összenyomhatóság elhanyagolható. A kapott eredmények [5,14] jó egyezést mutattak a kísérleti adatokkal, ezért a továbbiakban a számításainknál a kis Mach szám miatt a közeget összenyomhatatlannak tekinthetjük.

A fűtött körhengernél, ahol a környezet és a henger közötti hőmérsékletkülönbség kicsi ($T^* \approx 1$) a közeg állapotjelzőinek hőmérsékletfüggése elhanyagolható [4, 5], azonban nagyobb különbség esetén figyelembe kell venni, hogy a közeg tulajdonságai a hőmérséklet hatására megváltoznak. A hőhatás fizikai összefüggéseire különböző magyarázatok vannak. Számos kutató [11, 14] arra a következtetésre jutott, hogy a sűrűség változása a fűtött henger körüli áramlásnál fontos szerepet játszik az örvényleválás jelenségénél. Más kísérleti tanulmányok [8, 12] azonban úgy találták, hogy a folyadék kinematikai viszkozitásának változása a legfontosabb befolyásoló tényező.

A kutatók [13, 14] többnyire a fűtött hengert körülvevő közeg viszkozitásának és sűrűségének hőmérsékletfüggését vizsgálták meg. Jelen cikkben a dinamikai viszkozitás (μ) és a sűrűség (ρ) mellett a közeg hővezetési tényezőjének (λ) és fajhőjének (c_p) hőmérsékletfüggését is megvizsgáljuk. Az állapotjelzők hőmérsékletfüggését irodalmi adatok alapján vettük fel [15].

3. SZÁMÍTÁSI EREDMÉNYEK

A számítási eredmények kiértékelésénél összehasonlítjuk a dimenziótlan örvényleválási frekvenciát (St), felhajtóerő tényező rms értékét ($C_{L,rms}$), az ellenállástényező időátlagát (C_D) és a Nusselt szám (Nu) értékeit $Re=150$ Reynolds számnál és $T^*=1,5$ hőmérsékletaránynál. Korábbi vizsgálatainknál fűtetlen henger esetében a dimenzió nélküli mennyiségek jó egyezést mutattak a szakirodalomban található értékekkel [9, 10].

3.1. Közeg tulajdonságainak hőmérsékletfüggése

A közeg tulajdonságainak hőmérsékletfüggését vizsgálva hat esetet különböztetünk meg:

- **I. eset** μ konstans,
- **II. eset**: ρ konstans,
- **III. eset**: μ és ρ konstans,
- **IV. eset**: λ konstans,
- **V. eset**: c_p konstans,
- **VI. eset**: a közeg minden tulajdonsága függ a hőmérséklettől.

Az egyszerűség kedvéért a megadott (I – VI) jelöléseket használjuk a továbbiakban. A 1. táblázatban összefoglaltuk a hat különböző esetre vonatkozó Strouhal számot, felhajtóerő-, ellenállás- és nyomástényezőt, illetve a Nusselt számot $Re=150$ és $T^*=1,5$ esetében.

1. Táblázat

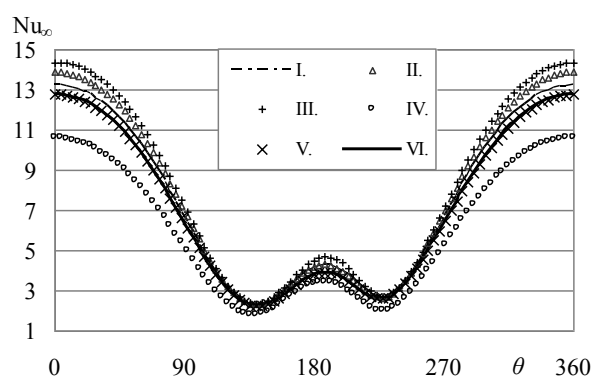
	St	[%]	C_{Lrms}	[%]	C_D	[%]	$-C_{pb}$	[%]	Nu_∞	[%]
I. μ =konst.	0,1808	4,32	0,2939	17,64	1,3173	-1,49	0,8158	5,63	6,729	3,52
II. ρ =konst.	0,1768	2,01	0,3078	23,21	1,3292	-0,57	0,7918	2,53	7,0473	8,41
III. μ =konst. és ρ =konst.	0,1833	5,76	0,3613	44,62	1,3119	-1,87	0,8418	9,00	7,3063	12,40
IV. λ =konst.	0,1745	0,69	0,2658	6,40	1,342	0,38	0,7864	1,83	5,8532	-9,96
V. c_p =konst.	0,1737	0,23	0,251	0,47	1,3387	0,14	0,7747	0,31	6,4958	-0,07
VI. Teljes hőmérséklet-függés	0,1733		0,2498		1,3369		0,7723		6,5027	

Az 1. táblázat tartalmazza a teljes hőmérsékletfüggéstől való százalékos eltérést. A ρ konstans esetben megfigyelhető, hogy a C_{Lrms} 23,21% eltérést mutat a VI. esethez képest, míg a Nusselt szám több mint 8,41%-kal változott meg. Konstans viszkozitás esetén jelentősen változik az örvényleválás frekvenciája és a nyomástényező értéke is. Ebből következik, hogy a III. esetben, ahol a μ és ρ is konstans, a legnagyobb az eltérés a VI. eset dimenziótlan mennyiségeihez képest. A legnagyobb eltérés a C_{Lrms} értékében mutatkozik, ahol 44,64% a különbség. Az is megfigyelhető, hogy konstans fajhőnél szinte ugyanazt az értéket kaptuk, mint a VI. esetben, vagyis a fajhő hőmérsékletváltozása nem befolyásolja a dimenzió nélküli mennyiségek értékeit. Ebből következik, hogy a levegő tulajdonságai közül csak a fajhőt tekinthetjük konstansnak, a közeg többi tulajdonságánál figyelembe kell venni a hőmérsékletfüggést.

3.2. Nusselt szám eloszlása a henger felületén

A henger és a közeg közötti hőátadás jellemzése az adott Reynolds számnál a Nusselt számmal történik. Ezért megvizsgáltuk a henger felületén a helyi Nusselt szám eloszlását (Nu_∞). Az 1. ábra a helyi Nu_∞ eloszlást mutatja az előzőekben felsorolt hat esetben $Re=150$ Reynolds számnál és $T^*=1.5$ hőmérsékletarányánál ugyanabban az időpillanatban. A Nusselt számot leginkább a hővezető képesség befolyásolja, ami a Nusselt szám hengerfelületi eloszlásából még jobban szembetűnik (IV. eset). Ezen kívül a viszkozitásnak és kisebb mértékben a sűrűségnek is hatása van a henger felületén kialakuló hőátadásra. A fajhő nem befolyásolja a kialakuló eloszlást, az V. és a VI. eset értékei egybeesnek. Az ábrán megfigyelhető, hogy a leválási pontban

($\theta \approx 140^\circ$) minden esetben azonos a Nu_∞ értéke, kivéve a konstans hővezető képesség esetét.



1. ábra Nusselt szám eloszlás a henger felületén

3.3. Hőmérséklet növekedésének hatása

A közeg tulajdonságainak hőmérsékletfüggését figyelembe véve (kivéve a fajhőt, aminek értékét konstansnak választottuk) megvizsgáltuk a henger körül kialakuló áramlást $Re=150$ Reynolds számnál és különböző hőmérsékletarányánál $T^*=1; 1,1; 1,5$ és $1,8$ (2. táblázat). A 2. táblázatban jól látszik, hogy a hőmérsékletarány növekedésével a Strouhal szám csökken hasonlóan, mint a szakirodalomban található mérési [6, 8] és számítási [13, 14] eredményekkel. A felhajtóerő- és ellenállás-tényező rms értéke, valamint a henger hátsó pontjában a nyomástényező időátlaga szintén csökken, míg a Nusselt szám és az ellenállás-tényező időátlaga növekszik a hőmérséklet növekedésével.

2. Táblázat

T^*	St	C_{Lrms}	C_D	C_{Drms}	$-C_{pb}$	Nu_∞
1	0,1827	0,3553	1,3083	0,0175	0,837	
1,1	0,1811	0,3342	1,317	0,0158	0,8254	6,3708
1,5	0,1733	0,2498	1,3368	0,00957	0,7723	6,5004
1,8	0,1673	0,1978	1,347	0,006159	0,7358	6,6015

A vizsgálataink során megfigyeltük, hogy a hengerfal közelében egy határréteg alakul ki, amely a hőmérséklet növekedésével egyre vastagabbá válik. A határrétegben a közeg viszkozitása növekszik, a sűrűsége pedig lecsökken, és ez a kisebb sűrűségű közeg az áramlási irányban továbbterjed.

4. KÖVETKEZTETÉS

Fűtött henger körüli áramlás esetén megvizsgáltuk az áramló levegő állapotjelzőinek hőmérsékletfüggését. A numerikus szimulációval jól kimutatható az állapotjelzőként eltérő hatás az örvényleválás áramlási jellemzőire. Egy jól megalapozott elhanyagolás lehetősége sok-sok óra számítógép futtatás megtakarítását eredményezheti. A számításaink alapján megállapítottuk, hogy a közeg tulajdonságainak hőmérsékletfüggése jelentős mértékben befolyásolja az egyenletes áramlásba helyezett fűtött hengernél kialakuló áramlási jellemzőket. A henger és a folyadék közötti nagy hőmérsékletkülönbség esetén a közeg tulajdonságainak hőmérsékletfüggése csak a fajhőnél hanyagolható el, a sűrűségénél, viszkozitásánál és a hővezetési tényezőnél figyelembe kell venni.

A hőmérsékletarány nagyságának is jelentős hatása van az örvényleválás áramlási jellemzőire. A hengerről leváló örvények érzékenyek a hőmérséklet növekedésére. A hőmérsékletarány növekedésével a Strouhal szám, a felhajtóerő- és ellenállás-tényező *rms* értéke, valamint a henger hátsó pontjában a nyomástényező időátlaga csökken, míg a Nusselt szám és az ellenállás-tényező időátlaga növekszik.

A közölt eredmények egy hosszú távú kutatási projekt alapjai. A későbbiek során szeretnénk megvizsgálni, hogy nem egyenletes, hanem rezgő folyadékáramlás esetén hogyan változik a hőmérsékletmező a henger környezetében. A további számításokat különböző Reynolds számoknál és hőmérsékletarányánál szeretnénk elvégezni.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerző köszönetét fejezik ki az OTKA (76085), NKTH-OTKA (68207) és a Magyar-Német együttműködési program P-MÖB/386-nak a kutatás támogatásért. A tanulmány/kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként - az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében - az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

6. IRODALOM

[1] ZDRAVKOVICH M.M.: Flow around circular cylinders. Vol.1: Fundamentals. Oxford University Press, Oxford, New York, 1997.
 [2] WILLIAMSON C.H.K.: Defining a universal and continuous Strouhal-Reynolds number relationship

for the laminar vortex shedding of a circular cylinder. Physics of Fluids, 1988, vol. 31, no. 10, pp. 2742-2744.

- [3] NORBERG C.: Flow around a circular cylinder: aspects of fluctuating lift. Journal of Fluids and Structures, 2001, vol. 15, pp. 459-469.
 [4] BARANYI L.: Computation of unsteady momentum and heat transfer from a fixed circular cylinder in laminar flow. Journal of Computational and Applied Mechanics, 2003 vol. 4, no. 1, pp. 13-25.
 [5] LANGE C.F., DURST F., BREUER M.: Momentum and heat transfer from cylinders in laminar crossflow at $10^4 \leq Re \leq 200$. Int. Journal of Heat Mass Transfer, 1998, vol. 41, pp. 3409-3430.
 [6] VÍT T., REN M., TRÁVNÍČEK Z., MARŠÍK F., RINDT C.C.M.: The influence of temperature gradient on the Strouhal-Reynolds number relationship for water and air. Experimental Thermal and Fluid Science, 2007, vol. 31, pp. 751-760.
 [7] LECORDIER J.C., BROWNE L.W.B., LE MASSON S., DUMOUCHEL F., PARANTHOËN P.: Control of vortex shedding by thermal effect at low Reynolds numbers. Experimental Thermal and Fluid Science, 2000, vol. 21 no.4, pp. 227-237.
 [8] WANG A.B., TRÁVNÍČEK Z., CHIA K.C.: On the relationship of effective Reynolds number and Strouhal number for the laminar vortex shedding of a heated circular cylinder. Phys. Fluids, 2000 vol. 12, no. 6, pp. 1401-1410.
 [9] BOLLÓ B.: Grid independence study for flow around a stationary circular cylinder. MicroCAD 2010, International Computer Science Conference, Miskolc, Hungary, Section F, 2010, pp.1-6.
 [10] BOLLÓ B., BARANYI L.: Computation of low-Reynolds number flow around a stationary circular cylinder. Proc. 7th Int. Conf. on Mechanical Engineering Budapest, Hungary 2010, pp. 891-896.
 [11] LECORDIER J.C., DUMOUCHEL F., PARANTHOËN P.: Heat transfer in a Bénard-Kármán vortex street in air and in water. Int. Journal of Heat Mass Transfer, 1999, vol. 42, pp. 3131-3136.
 [12] DUMOUCHEL F., LECORDIER J.C., PARANTHOËN P.: The effective Reynolds number of a heated cylinder. Int. Journal of Heat Mass Transfer, 1998, vol. 41 no.12, pp. 1787-1794.
 [13] SABANCA M., DURST F.: Flows past a tiny circular cylinder at high temperature ratios and slight compressible effects on the vortex shedding. Physics of Fluids, 2003 vol. 15, no. 7, pp. 1821-1829.
 [14] SHI J.M., GERLACH D., BEUER M., BISWAS G., DURST F.: Heating effect on steady and unsteady horizontal laminar flow of air past a circular cylinder. Physics of Fluids, 2004 vol. 16, no. 12, pp. 4331-4345.
 [15] VDI-WÄRMEATLAS, 9th ed., Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, ISBN 3-540-41200-X, 2002.