

HOSSZIRÁNYBAN REZGŐ FOLYADÉKBA HELYEZETT FÜTÖTT KÖRHENGER KÖRÜLI ÁRAMLÁS VIZSGÁLATA

IN-LINE OSCILLATORY FLOW AROUND A HEATED CIRCULAR CYLINDER

Bolló Betti¹

ABSTRACT

Heat transfer characteristics of a circular cylinder placed in a uniform free stream with a superimposed in-line oscillatory flow are investigated numerically using the commercial software package Ansys Fluent based on the finite volume method. For in-line oscillation the influence of oscillation amplitude and cylinder surface temperature are analyzed at Reynolds number 120 and for frequency ratio 0.8 in the lock-in domain. Force coefficients, mechanical energy transfer and heat transfer are investigated and compared with results from a finite difference study [1].

1. BEVEZETÉS

Számos kutató foglalkozik levegő- vagy folyadék-áramlásba helyezett hosszirányban rezgő körhengerről leváló örvények vizsgálatával [1-3]. A rezgetett körhengerről leváló örvények egy periodikus gerjesztést jelentenek a hengerre nézve, ilyenkor egy nemlineáris kölcsönhatás lép fel a folyadék és a henger között, amelynek eredményeként egy bizonyos sebességtartományban az örvényleválás szinkronizálódik a henger rezgésével. Ezt a jelenséget a szakirodalomban *lock-in*-nek (szinkronizálódásnak) nevezik.

Jelen dolgozatban oszcilláló áramlással foglalkozunk, amikor a henger rögzített és a folyadék végez rezgő mozgást olyan módon, hogy a hengerhez kötött koordináta rendszerben a mozgások kinematikailag azonosak legyenek a párhuzamos áramlásba helyezett rezgő henger esetével [4]. Ennek alapján, a két rendszer közötti dinamikai kapcsolat ismeretében, a nyert számítási eredmények összehasonlíthatók egymással.

A fűtött henger körüli áramlásnál figyelembe kell venni a közeg állapotjelzőinek megváltozását a hőmérséklet függvényében [5, 6]. Ez jelentős hatással van a közeg jellemzőire és az áramlás jelensége sokkal bonyolultabbá válik, mint izotermikus esetben. Az egyenletes áramlásba helyezett rezgő és fűtött körhenger körül kialakuló áramlással viszonylag kevesebben foglalkoztak [7].

Jelen dolgozatban a főáramlással párhuzamos irányban rezgetett levegőbe helyezett fűtlen és fűtött henger esetét vizsgáljuk $Re=120$ Reynolds számnál és $f/St_0=0,8$ frekvenciahányadosnál. A hengerre ható felhajtóerő és ellenálláserő dimenziótlan tényezőit, valamint a henger és a folyadék közti energiaátadás tényezőjét összehasonlítjuk a szakirodalomban található eredményekkel. Ezenkívül megvizsgáljuk a hőmérsékletváltozás milyen hatással van az áramlási jellemzőkre.

2. MATEMATIKAI MODELL

A numerikus számításokat a kereskedelmi forgalomban kapható Ansys Fluent programcsomaggal végeztük el, ami a véges térfogatok módszerét alkalmazza. Két-dimenziós 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 [8], ezek alapján a számítási tartományt $d_\infty/d=180$ nagyságúnak választottuk, ahol 360×298 (kerületi irány \times sugárirány) hálófelbontást alkalmaztunk. A henger közelében sűrűbb a hálózás, mint a hengertől távol. A dimenzió nélküli időlépés nagyságát $\Delta t=0,001$ értékre írtuk elő.

A számítási tartomány méret, háló és időlépés függetlenségét korábbi tanulmányainkban részletesen vizsgáltuk [8], ezek alapján a számítási tartományt $d_\infty/d=180$ nagyságúnak választottuk, ahol 360×298 (kerületi irány \times sugárirány) hálófelbontást alkalmaztunk. A henger közelében sűrűbb a hálózás, mint a hengertől távol. A dimenzió nélküli időlépés nagyságát $\Delta t=0,001$ értékre írtuk elő.

Rezgés esetén az időfüggő sebesség egy állandó nagyságú áramlási sebességéből és egy oszcilláló áramlásból tevődik össze. A könnyebbség miatt áttérünk a

¹egyetemi tanársegéd, Miskolci Egyetem, Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Tanszéke
email: ¹aramzb@uni-miskolc.hu,

dimenzió nélküli mennyiségekre. A henger előtti zavar-
talan konstans u_∞ áramlási sebességet sebességléptéknek
választjuk, hosszléptékül pedig a d hengerátmérőt hasz-
náljuk. Ezek felhasználásával definiálhatjuk a dimenzió
nélküli sebességvektort hosszirányban

$$\vec{v}(t) = \vec{i} + 2\pi f A_x \sin(2\pi f t) \vec{i}, \quad (1)$$

ahol az f a dimenzió nélküli rezgési frekvencia (u_∞/d -vel
dimenziótlanítva), az A_x a dimenzió nélküli rezgés amp-
litúdója x irányban (d -vel dimenziótlanítva), a t a di-
menzió nélküli idő (d/u_∞ -vel dimenziótlanítva) és \vec{i} az
egységvektor x irányban.

Számításainkat az $f/St_0=0,8$ frekvenciahányadosnál
végeztük el, ahol St_0 a dimenziótlan örvényleválási
frekvencia álló körhenger esetében adott Reynolds
számmal. A számításokat arra az amplitúdó tartományra
korlátoztuk, ahol az örvényleválás frekvenciája szinkro-
nizálódik a henger rezgési frekvenciájával.

A külső peremen konstans abszolút hőmérsékletű (T_∞)
közegáramot írtunk elő, míg a hengerfelület abszolút
hőmérséklete T_w , itt a sebességkomponensek eltűnnek.
Számításainkat két

$$T^* = T_w / T_\infty = 1 \text{ és } 1,5 \quad (2)$$

hőmérsékletaránynál végeztük el.

2.1. Dimenzió nélküli mennyiségek

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

$$C_L = \frac{2F_L}{\rho u_\infty^2 d}, \quad C_D = \frac{2F_D}{\rho u_\infty^2 d}, \quad (3)$$

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. Az
inercia- és a gyorsuló rendszerben értelmezett felhajtó-
erő- és ellenállás-tényezők között a következő össze-
függés érvényes [4]:

$$C_L = C_{Lfb} + \frac{\pi}{2} a_{0y}, \quad C_D = C_{Dfb} + \frac{\pi}{2} a_{0x}, \quad (4)$$

ahol fb (fixed body) index jelenti az álló hengerhez
kötött inercia rendszert. Az a_{0x} és a_{0y} az x és y irányban
gyorsuló hengert jelöli. Az egyenletekből kitűnik, hogy
ha a henger gyorsulása hosszirányú, akkor a két felhaj-
tóerő-tényező azonos ($C_L = C_{Lfb}$), csak az ellenállás-
tényezők különböznek egymástól.

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 ténye-
zője. A szakirodalomban egy tetszőlegesen oszcilláló
függvény (C) időátlagát és effektív középértékét (továb-

biakban az angol rövidítést alkalmazva rms : root-mean-
square) értékét szokták összehasonlítani, amit a követ-
kező numerikus integrálással számolunk ki:

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

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

ahol a t_1 az integrálás alsó határa, P egy örvényleválási
periódus, n a számításához alapul vett periódusok száma.
A C a C_L , C_D és Nu függvények akármelyike lehet.

Az áramló folyadékba helyezett test és a folyadék kö-
zötti erőhatások mellett gyakorlati szempontból az ener-
giacsere is fontos kérdés, amely meghatározza a mozga-
táshoz szükséges teljesítményt. Az energiaátadást pozí-
tívnak tekintjük, ha a hengeren történik a munkavégzés,
azaz ha a folyadék energiát ad át a hengernek, és nega-
tív, ha a henger ad át energiát a folyadéknak. A
henger és a folyadék közti energiaátadási tényező hossz-
irányú rezgő henger esetén [9]

$$E = \int_0^P C_D(t) \dot{x}_0(t) dt \quad (7)$$

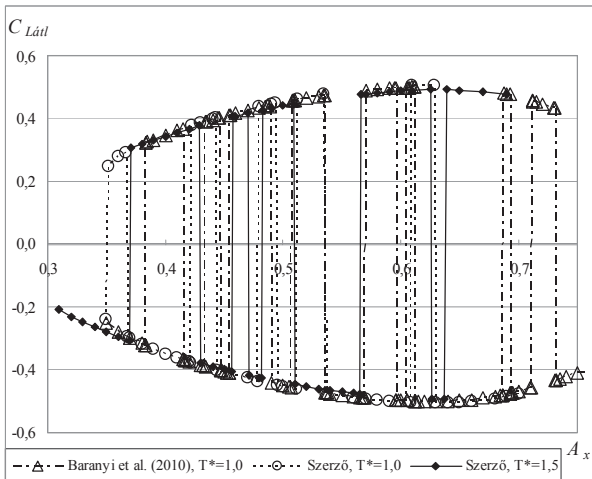
ahol \dot{x}_0 a dimenziótlan x irányú elmozdulás deriváltja.

3. SZÁMÍTÁSI EREDELMÉNYEK

A számítási eredmények kiértékelésénél összehason-
lítjuk a felhajtóerő- és ellenállás-tényező időátlagát
($C_{L\text{át}}$ és $C_{D\text{át}}$), az ellenállás-tényező effektív középér-
tékét ($C_{D\text{rms}}$), a Nusselt szám (Nu) értékét és a henger és
a folyadék közötti mechanikai energiacsere (E) $Re=120$
Reynolds számmal, $f/St_0=0,8$ frekvenciahányadosnál és
két, $T^*=1$ és $1,5$ hőmérsékletaránynál.

Az 1. ábra a felhajtóerő-tényező időátlagát mutatja a
rezgési amplitúdó függvényében fűtetlen és fűtött hen-
ger esetén. Az ábrán megfigyelhető, hogy fűtetlen hen-
ger esetén jó egyezést mutatnak Baranyi és szerzőtársai
[1] számítási adataival, de az állapotgörbén az ugrások
helye és száma különbözik. Az ábrán látható, hogy az
állapotgörbék egymás tükörképei [1], és ha a felhaj-
tóerő-tényező abszolút értékét ábrázolnánk, akkor egy
görbére esnének az értékek.

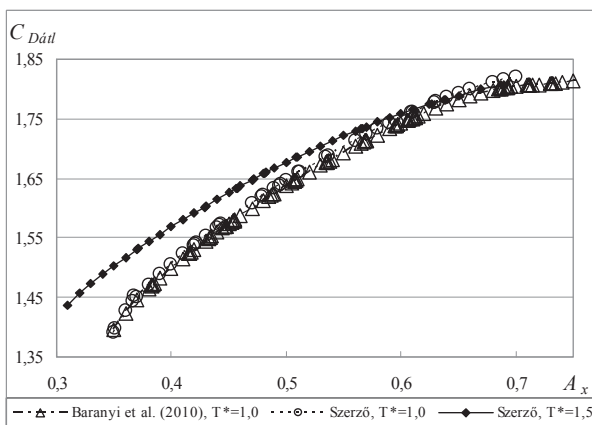
Az állapotgörbék fűtetlen ($T^*=1$) és fűtött ($T^*=1,5$)
esetben közel azonosak, de a henger fűtésével a szink-
ronizálódási tartomány kezdete eltolódik a kisebb rezgési
amplitúdó felé. A szinkronizálódási tartomány fűtött
esetben $A_x=0,35$ amplitúdónál kezdődik, míg fűtött
hengernél $A_x=0,305$ értéknél. Korábbi vizsgálatoknál
fűtetlen henger esetében [10] a Reynolds szám növeke-
désével a felhajtóerő-tényező állapotgörbének az alakja,
nagysága megváltozik, illetve a szinkronizálódási tar-
tomány kezdete eltolódik a kisebb rezgési amplitúdó
felé. A melegítés hatására a $C_{L\text{át}}$ állapotgörbe alakja és
nagysága nem változik meg, ugyanarra a görbére esik,
csak eltolódik a kisebb rezgési amplitúdó felé.



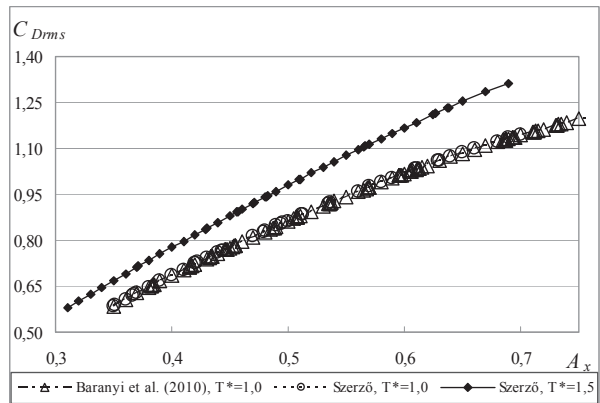
1. ábra C_L időátlaga a rezgési amplitúdó függvényében

Az ellenállás-tényező, a mechanikai energiacsere és a Nusselt szám állapotgörbéinek vizsgálatakor nem találtunk ugrásokat. A 2. ábrán az ellenállás-tényező időátlaga látható a dimenziótlan rezgési amplitúdó függvényében $T^*=1$ és $1,5$ hőmérsékletarányoknál. A $C_{Dát}$ állapotgörbe fűtetlen állapotban jó egyezést mutatnak [1] értékeivel. Az ellenállás-tényező értéke az amplitúdó függvényében növekszik. Az ábrán megfigyelhető, hogy a hőmérsékletarány növekedésével egy adott amplitúdónál növekszik a $C_{Dát}$ értéke, de csak kis amplitúdóknál. Nagy amplitúdók esetén, körülbelül $A_x > 0,6$ felett az ellenállás-tényező értéke közel azonos fűtetlen és fűtött esetben, vagyis a henger ellenállására a rezgési amplitúdó hatása nagyobb a hőmérséklet hatásánál.

A 3. ábra az ellenállás-tényező *rms* értékét mutatja a rezgési amplitúdó függvényében fűtetlen és fűtött henger esetén. Fűtetlen henger esetén a számítási értékek jó egyezést mutatnak Baranyi és szerzőtársai [1] adataival. Egyenes áramlásba helyezett álló henger esetén a fűtés hatására a C_{Drms} értéke csökkent egy adott Reynolds számnál [6], míg rezgő folyadéknál a hőmérséklet növekedésével a C_{Drms} értéke növekszik egy adott amplitúdónál.

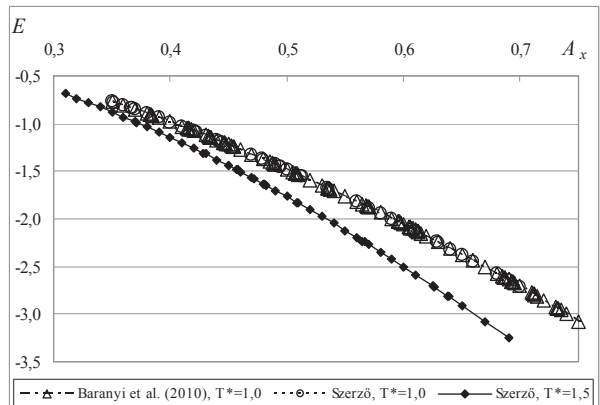


2. ábra C_D időátlaga az amplitúdó függvényében



3. ábra C_{Drms} a rezgési amplitúdó függvényében

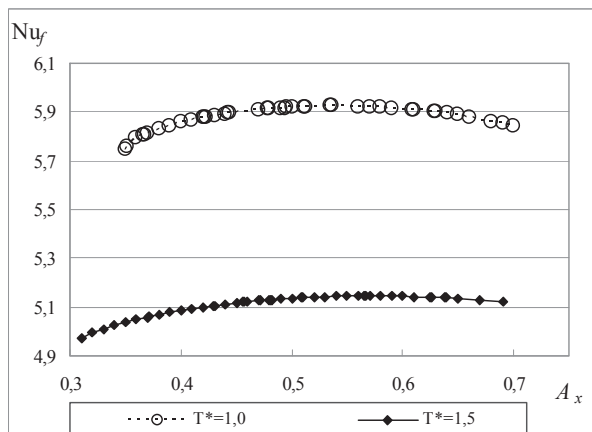
A henger és a folyadék közti mechanikai energiaátadási tényezőt is megvizsgáltuk fűtetlen és fűtött henger esetén. A 4. ábra mutatja a mechanikai energiacsere a rezgési amplitúdó függvényében. Az ábrán megfigyelhetjük, hogy az E értéke negatív a szinkronizálódási tartományon, vagyis hosszirányú rezgés esetén a henger ad át energiát a folyadéknak [1]. A mechanikai energiacsere abszolút értéke növekszik az amplitúdó függvényében, de csökken a hőmérsékletarány növekedésével. A számítás a fűtetlen henger esetében jó egyezést mutat a szakirodalomban található [1] értékekkel.



4. ábra E mechanikai energiacsere a rezgési amplitúdó függvényében

A henger és a közeg közötti hőmérsékletmező jellemzése az adott Reynolds számnál a Nusselt számmal történik, amit jelen esetben a filmhőmérséklettel, vagyis a környezeti és a hengerfal hőmérsékletének középértékével számolunk ki: $T_f = (T_w + T_\infty)/2$. Ezért megvizsgáltuk a Nusselt számot ($Nu(T_f) = Nu_f$) az amplitúdó függvényében, ami az 5. ábrán látható. A korábbi számításainknál, ahol az egyenes áramlásba helyezett fűtött henger esetét vizsgáltuk, azt tapasztaltuk, hogy a Nusselt szám értéke nő a Reynolds szám növekedésével, illetve csökken a hőmérsékletarány növekedésével egy adott Reynolds számnál [11]. Hosszirányú rezgés esetén hasonló tendencia figyelhető meg, a Nu_f értéke csökken egy adott amplitúdónál a hőmérséklet növekedésével. A Nusselt szám értéke először növekszik a rezgési amplitúdó növekedésével, majd elérve egy maximum értéket ($A_x \approx 0,55$) elkezdi kissé csökkenni, ami azt jelenti, hogy a nagyobb amplitúdó elnyomja a hőmérséklet hatását. Ez

látszólag ellentmond Karanth és szerzőtársai [7] numerikus eredményeinek, akik azt tapasztalták, hogy az amplitúdó növekedésével a Nusselt szám növekszik. A tanulmányukban azonban, melyben a hosszirányban rezgetett és fűtött hengert vizsgálták $Re=200$ esetén, csak három amplitúdó értéket ($A_x=0; 0,25$ és $0,5$) vizsgáltak, amelyek valószínűleg a növekedési tartományba esnek.



5. ábra A_x Nu_f a rezgési amplitúdó függvényében

4. KÖVETKEZTETÉS

A hőmérsékletarány és a rezgési amplitúdó hatását vizsgáltuk hosszirányban rezgő folyadékba helyezett fűtetlen és fűtött henger esetén a szinkronizálódási tartományban egy adott $Re=120$ Reynolds számnál. A fűtetlen henger esetét összehasonlítottuk a szakirodalomban található véges differenciák módszerével számolt értékekkel [1] és jó egyezést találtunk.

Fűtött és fűtetlen henger esetén ugyanazt az állapotgörbét találtuk a felhajtóerő-tényező időátlagánál, de a magasabb hőmérsékletarányhoz tartozó görbe eltolódott a kisebb rezgési amplitúdó értékek felé.

A mechanikai energiaátadás hosszirányú rezgés esetén mindig negatív, még a hőmérséklet változásával is. A hőmérsékletarány növekedésével az energiaátadási tényező értéke csökken.

Az ellenállás-tényező időátlagánál és a Nusselt számnál azt tapasztaltuk, hogy kis amplitúdó esetén növekednek, viszont a nagy rezgési amplitúdó elnyomja a hőmérséklet hatását, még hozzá a következőképpen:

- a C_D időátlaga tovább növekszik az amplitúdó függvényében, de értékei közel egybeesnek fűtött és fűtetlen hengernél,
- a Nusselt számnál csökkenés figyelhető meg az amplitúdó függvényében.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerző köszönetét fejezik ki az OTKA (K 76085) 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] BARANYI, L., HUYNH, K., MUREITHI, N.W.: Dynamics of flow behind a cylinder oscillating in-line for low Reynolds numbers. Proc. 7th International Symposium on Fluid-Structure Interactions, Flow-Sound Interactions, and Flow-Induced Vibration and Noise, Montreal, Québec, (Canada), 2010, pp. 1-10.
- [2] AL-MDALLAL, Q.M., LAWRENCE, K.P., KOCABIYIK, S.: Forced streamwise oscillations of a circular cylinder: Locked-on modes and resulting fluid forces. Journal of Fluids and Structures, 2007, vol. 23, pp. 681-701.
- [3] KONSTANTINIDIS, E., BALABANI, S.: Symmetric vortex shedding in the near wake of a circular cylinder due to streamwise perturbations. Journal of Fluids and Structures, 2007, vol. 23, pp. 1047-1063.
- [4] BARANYI, L.: Lift and drag evaluation in translating and rotating non-inertial systems. Journal of Fluids and Structures, 2005, vol. 20 (1), pp. 25-34.
- [5] 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.
- [6] BOLLÓ, B.: Fűtött körhenger körüli áramlás vizsgálata, GÉP, 2012/1, pp. 31-34.
- [7] KARANTH, D., RANKIN, G.W., SRIDHAR, K.: A finite difference calculation of forced convective heat transfer from an oscillating cylinder. Int. J. Heat Mass Transfer, 1994, vol. 37, pp. 1619-1630.
- [8] 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.
- [9] BARANYI, L.: Numerical simulation of flow around an orbiting cylinder at different ellipticity values. Journal of Fluids and Structures, 2008, vol. 24, pp. 883-906.
- [10] BARANYI, L., BOLLÓ, B. AND DARÓCZY, L.: Simulation of low-Reynolds number flow around an oscillated cylinder using two computational methods. Proc. ASME 2011 Pressure Vessels and Piping Division Conference PVP2011, Baltimore, Maryland, USA, 2011, pp. 1-9, Paper No. PVP2011-57554.
- [11] BOLLÓ, B.: Low Reynolds number flow around and heat transfer from a heated circular cylinder. International Review of Applied Sciences and Engineering, 2010, vol. 1, no. 1-2, pp.15-20.