

# ÁRAMLÁSI PARAMÉTEREK HATÁSA REZGŐ HENGER ÉS FOLYADÉK KÖZTI ENERGIAÁTADÁSRA

## FLOW PARAMETER EFFECTS ON ENERGY TRANSFER BETWEEN AN OSCILLATING CYLINDER AND FLUID

dr. Baranyi László<sup>1</sup>, Daróczy László<sup>2</sup>

### ABSTRACT

*This paper concentrates on the investigation of mechanical energy transfer  $E$  between the fluid and a transversely oscillating cylinder placed in a two-dimensional low-Reynolds number flow. The analysis is carried out using a finite difference in-house code. When  $E$  is negative the fluid works to dampen the cylinder oscillation, while with positive  $E$  work is done on the cylinder, which can be a source of vortex-induced vibration (VIV) for free vibration cases. The object of this paper is to identify subdomains in the parameter domain of Reynolds number, oscillation amplitude and frequency ratio ( $Re$ ,  $A_y$ ,  $f/St_0$ ) where the mechanical energy transfer is positive. Since it is computationally expensive to carry out the computation for even one point of the three-dimensional domain of ( $Re$ ,  $A_y$ ,  $f/St_0$ ), the analysed space is limited to  $Re = 100-180$ ,  $A_y = 0.1-1.0$  and  $f/St_0 = 0.6-1.2$  under lock-in.*

### 1. BEVEZETÉS

A párhuzamos áramlásba helyezett, rezgőmozgást végző henger körüli áramlást a kutatók gyakorlati jelentősége miatt széles körben vizsgálták és vizsgálják ma is. A szélnek vagy víz alatti áramlásoknak kitett szerkezetek az áramlás hatására rezgésbe jöhetnek, amely a szerkezetek meghibásodásához vezethet.

Amennyiben egy körhengert mechanikusan rezgetünk, akkor a kialakuló áramlást valamint a folyadék és henger közti kölcsönhatást az  $Re$  Reynolds szám ( $Re=Ud/v$ , ahol  $U$  a megfúvási sebesség,  $d$  a hengerátmérő,  $v$  a folyadék kinematikai viszkozitási tényezője) mellett a rezgés  $f$  frekvenciája és  $A$  amplitúdója is befolyásolja. A keletkező periodikus felhajtóerő nagy rezgési amplitúdót eredményezhet, különösen akkor, ha az örvényleválás frekvenciája közel

esik a test sajátfrekvenciájához és a csillapítás kicsi. Amint azt az [1] dolgozat is említi, az áramlás keltette rezgések területén sok jelenségre a Reynolds számnak csupán csekély hatása van. Ezért, még a viszonylag kis  $Re$  értékek mellett is pontosan vizsgálható a jelenség, így a jelen tanulmányban is.

A főáramlásra merőlegesen, keresztirányban rezgő körhenger mögött kialakuló áramlást nagyon sokan vizsgálták. Williamson és Roshko [2] kis Reynolds számú, mechanikusan rezgetett hengerre vonatkozó kísérleteik alapján feltérképezték a lehetséges örvényleválási módokat. Blackburn és Henderson [3]  $Re=500$ , Kaiktsis és szerzőtársai [4]  $Re=400$ , míg Lu és Dalton [5]  $Re=185$  esetén hirtelen változást talált örvényszerkezetben, miközben kissé változtatták a szuperharmonikus rezgetési frekvenciát. A véges differenciák módszerén alapuló numerikus tanulmányok (pl. [6]), nem találtak ilyen jelenséget.

Az jelen tanulmányban a homogén párhuzamos áramlásba helyezett, arra keresztirányban rezgő henger mögött kialakuló áramlás és a henger közötti  $E$  mechanikai energiaátadás változását vizsgáltuk szisztematikusan az ( $Re$ ,  $A_y$ ,  $f/St_0$ ) paraméterek alkotta széles tartományban (továbbiakban fázistér). Itt  $A_y$  a dimenziótlan rezgési amplitúdó,  $St_0$  pedig az álló hengerre vonatkozó dimenziótlan örvényleválási frekvencia (Strouhal szám) az adott  $Re$  számnál. A vizsgálatunkat azokra az esetekre korlátoztuk, amikor az örvényleválás frekvenciája szinkronizálódik az  $f$  hengerrezgési frekvenciával. Az angol szakirodalomban ezt a jelenséget „lock-in”-nek nevezik. A vizsgálat különösen a pozitív mechanikai energiaátadás tartományára koncentrált. A szerzők legjobb tudomása szerint a szakirodalomban még nem található meg az ( $Re$ ,  $A_y$ ,  $f/St_0$ ) fázistér ilyen átfogó vizsgálata.

### 2. SZÁMÍTÁSOK

A számítási eljárás részletes ismertetése és tesztelése a [7] cikkben található, így itt most csak a számítási paraméterek ismertetésére szorítokozunk.

Ahhoz, hogy egy megfelelő felbontású képet kaphassunk az ( $Re$ ,  $A_y$ ,  $f/St_0$ ) három-dimenziós (3D) fázisterről,

<sup>1</sup>egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Áramlás és Hőtechnikai Gépek Tanszéke

<sup>2</sup>gépészmérnök MSc, Miskolci Egyetem

nagy mennyiségű számítást kellett elvégeznünk. A számításokat az  $Re=100, 120, 140, 160$  és  $180$ ;  $A_y=0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 0,5, 0,6, 0,7, 0,8, 0,9, 1,0$ ; és az  $f/St_0=0,6, 0,7, 0,8, 0,9, 1,0, 1,1, 1,2$  paraméterek minden lehetséges kombinációjára elvégeztük. Az egyszerűség kedvéért a továbbiakban bevezetjük az  $FR=f/St_0$  jelölést, amelyet frekvencia-aránynak fogunk nevezni. Az  $Re=100, 120, 140, 160, 180$  értékekhez tartozó  $St_0$  értékek [8] alapján rendre  $St_0=0,1644, 0,1735, 0,1806, 0,1864, 0,1913$ . Az előbbi esetek mellett további 36 pontban is végeztünk számításokat a vizsgált térbeli felületek pontosításához, így összesen a fázistér 386 pontját vizsgáltuk meg.

A fenti paramétereken túl minden egyéb adat meg-egyzett az egyes számításoknál. Az általunk használt háló  $361 \times 292$  (kerületi  $\times$  radiális) felbontású, a tartomány méretét a  $R_2/R_1=160$  arány jellemezte, és  $\Delta t=0,0005$  dimenziótlán időlépcsőt alkalmaztunk, hogy az elsőrendű időbeli diszkretizáció elég pontos legyen. A másodrendű Runge-Kutta időléptetéssel végzett [9] vizsgálataink azt mutatták, hogy ilyen időlépcső esetén a két eljárás eredményei jó egyezést mutatnak. A szimulációkat minden esetben  $t=600-1000$  dimenziótlán időig végeztük el.

Az első szerző által kifejlesztett FORTRAN program eredményeit utólagosan fel kellett dolgoznunk. Azon esetekben, mikor kialakult a periodikus megoldás, azaz a „lock-in” bekövetkezett, kiszámítottuk az  $E$  mechanikai energiaátadást, majd az adatokat Matlab által is importálható formában lementettük. A Matlab szoftveren belül az eredeti pontokból álló halmazt egy nagyfelbontású, finom hálóra interpoláltuk át a GRIDDATAN parancs segítségével, majd az ISOSURFACE parancssal megjelenítettük az izofelületeket (konstans értékhez tartozó felület).

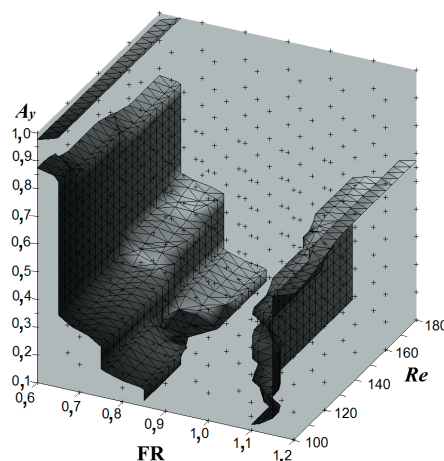
### 3. EREDMÉNYEK

A számítási eredményeket a fázistér „lock-in” tartományában, a folyadék és a henger között megvalósuló mechanikai energiaátadásra koncentrálni fogjuk bemutatni.

#### 3.1. „Lock-in” tartomány

Az általunk megvizsgált 386 esetből összesen 252 esetben következett be a „lock-in”, amelyek alapján az 1. ábrán látható a „lock-in”/”nincs „lock-in” tartományok becsült határa 3D-ben [10]. Az ábrán a 0,5-nek megfelelő izofelületet ábrázoltuk, ahol 1 jelentette azon eseteket, ahol bekövetkezett a „lock-in”, míg 0 azon eseteket, ahol nem.

Természetesen számítástechnikai korlátok miatt az izofelület felbontása nem pontos, hanem csupán egy közelítést ad. A kutatás folytatásának egy lehetséges iránya a felület még pontosabb meghatározása.



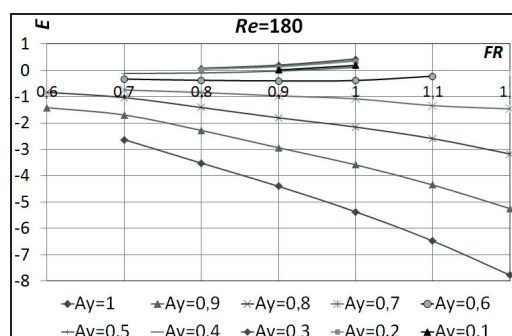
1. ábra. „Lock-in” tartomány 3D-ben

#### 3.2. Mechanikai energiaátadás

A folyadék és a keresztirányban rezgő henger közötti  $E$  mechanikai energiaátadás a már periodikus áramlás esetén az alábbi képlet alapján számítható [3] alapján:

$$E = \int_0^T C_L(t) v_{0y}(t) dt, \quad (1)$$

ahol  $v_{0y}$  a henger sebessége,  $t$  és  $T$  a dimenziótlán idő és periódusidő.  $E$  pozitív, amennyiben a folyadék munkát végez a hengeren, és negatív, ha a rezgő henger végez munkát a folyadékon.

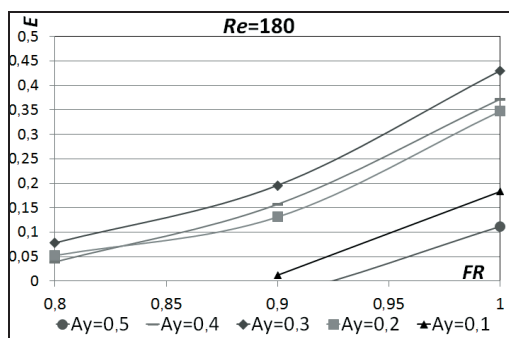


2. ábra. Mechanikai energiaátadás;  $Re=180$

A 2. ábrán az  $E$  látható a „lock-in” tartományon belül az  $FR$  frekvencia-arány függvényében különböző  $A_y$  amplitúdók esetén a vizsgált legnagyobb Reynolds szám, azaz  $Re=180$  esetén. Az ábrán látható, hogy nagy amplitúdók esetén  $E$  negatív, és abszolút értékben növekszik  $FR$  növekedésével. Kismértékű pozitív energiaátadást csak 0,8 és 1,0 közötti frekvencia-arányoknál és 0,6 alatti amplitúdóknál tapasztalhatunk. A kisebb  $Re$  számokhoz tartozó görbék is hasonlóak.

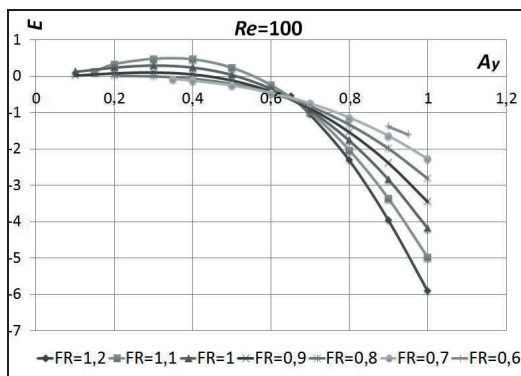
A 3. ábra ugyancsak az  $E$ -t mutatja, de a pozitív energiaátadás tartományára fókuszál. Az  $E$  értéke  $FR$  növekedésével nő, de meglepő módon a rezgési amplitúdónál nem tudunk egyértelmű tendenciát megállítani: a legkisebb energiaátadás 0,1 és 0,5 amplitúdókhöz tartozik.

Minden vizsgált  $Re$  esetén ugyanezt a változási jelleget tapasztaltuk.



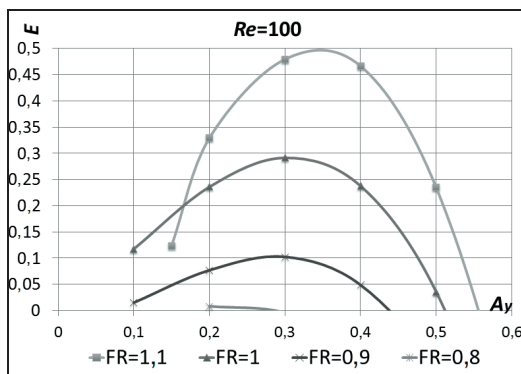
3. ábra. Pozitív mechanikai energiaátadás;  $Re=180$

A 4. ábra az energiaátadást a legkisebb vizsgált Reynolds szám, azaz  $Re=100$  esetén mutatja az  $A_y$  amplitúdó függvényében különböző  $FR$  értékek esetén a „lock-



4. ábra. Mechanikai energiaátadás;  $Re=100$

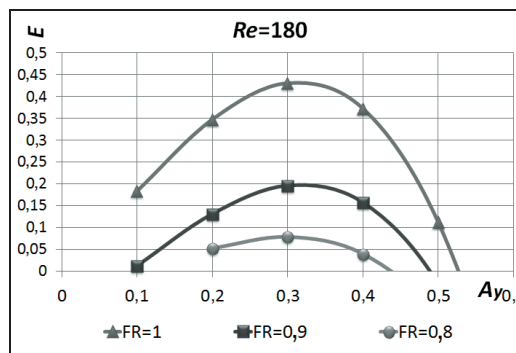
in” tartományon belül. Itt is látható, hogy a fázistér nagyobbik részében  $E$  negatív. Nagy amplitúdók esetén  $E$  negatív, és az abszolút értéke növekszik  $FR$  növekedésével. Kicsi, de pozitív értékeket csak 0,6 alatti amplitúdóknál találunk. A görbék jellege nagyobb Reynolds számok esetén is hasonló. Érdekes módon van az ábrán egy pont, amelyen minden görbe áthalad ( $A_y \approx 0,65$  és  $E \approx -0,6$ ).



5. ábra. Pozitív mechanikai energiaátadás;  $Re=100$

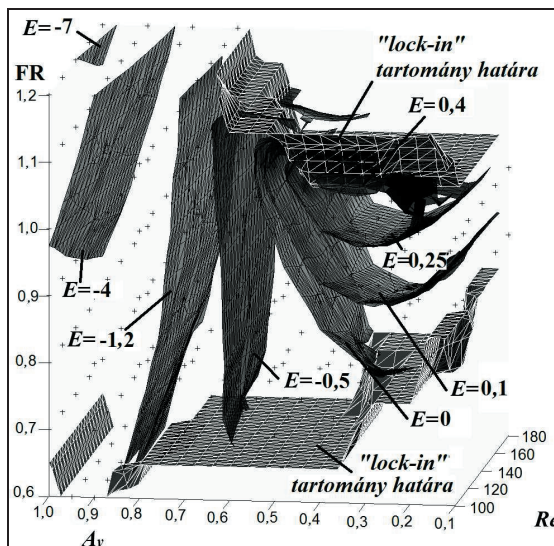
Az 5. ábrán felnagyítva látható a 4. ábra azon tartománya, ahol az energiaátadás pozitív. Láthatjuk, hogy  $E$  maximuma minden görbénél  $A_y = 0,3$  körül adódik, és hogy a nagysága  $FR$  növekedésével nő. Az összes vizsgált eset közül a legnagyobb mértékű energiaátadást  $Re=100$ ,  $FR=1,1$  és  $A_y=0,3$  esetén tapasztaltuk, amelynek nagysága 0,4794.

Összehasonlításként,  $Re=180$  esetén (6. ábra) is mutassuk meg a pozitív energiaátadást az  $A_y$  függvényében különböző  $FR$  értékek esetén! Az 5. és 6. ábrákat összehasonlítva látható, hogy azonos frekvencia-arányhoz tartozó  $E$  görbék az  $Re$  növekedésével kis mértékben a pozitív irányban tolnak el, azaz egyértelmű irányzatot figyelhetünk meg, ellentétben az  $A_y$ -nál tapasztaltakkal.



6. ábra. Pozitív mechanikai energiaátadás;  $Re=180$

Az  $Re=120$ , 140 és 160 esetén is hasonlóak a görbék, és a vizsgált tartományban a Reynolds szám hatása nem jelentős, megerősítve ezzel [1] állítását.



7. ábra. Mechanikai energiaátadás izofelületei

A 2-6. ábrákon bemutatott mechanikai energiaátadásokat a 7. ábrán összegezzük 3D-ben. Ezen az ábrán az  $E = -7, -4, -1,2, -0,5, 0, 0,1, 0,25$  és  $0,4$  izofelületeket jelentettük meg a „lock-in” tartomány határának feltüntetésével. Pozitív energiaátadás csak a fázistér „lock-in” határhoz viszonylag közeli tartományában történt.

Egyértelműen láthatjuk az ábrák alapján, hogy nagyobb amplitúdókhoz általában nagyobb, a henger által a folyadéknak átadott mechanikai energia tartozik. Kisebbsé amplitúdók esetén azonban nem fogalmazhatunk meg ilyen egyértelmű szabályt, és egy olyan tartományt is azonosíthattunk, ahol pozitív energia átadás történik.

#### 4. ÖSSZEFOGLALÁS

A  $(Re, A_y, f/St_0)$  paraméterek által meghatározott három-dimenziós fázistér „lock-in” tartományán belül vizsgáltuk a folyadék, és a párhuzamos áramlás irányára keresztirányban rezgő henger közötti  $E$  mechanikai energiaátadást.

A fázistér legnagyobb részében  $E$  negatív volt, azaz a folyadék mechanikai energiát nyelt el. Nagy negatív értékek a nagyobb  $A_y$  amplitúdókhoz tartoztak. Azonban  $A_y < 0,6$  és  $f/St_0 = 0,8-1,1$  esetén minden vizsgált Reynolds szám ( $Re=100-180$ ) mellett pozitív energiaátadást tapasztaltunk a „lock-in” tartomány széléhez közel. A fázistérben az  $Re$  energiaátadásra gyakorolt hatása nem jelentős.

Terveink szerint a tanulmány következő szakasza a „lock-in” tartomány határának pontos meghatározására, valamint a tartomány határa közelében fellépő pozitív energiaátadás jelenségére fog koncentrálni.

#### 5. SUMMARY

The mechanical energy transfer  $E$  between the fluid and a cylinder mechanically oscillated transverse to the free stream was investigated in the three-dimensional phase space  $(Re, A_y, f/St_0)$  under lock-in condition. In the largest part of the phase space,  $E$  was found to be negative, meaning that energy is extracted from the cylinder. Large-magnitude negative values were found at large oscillation amplitude  $A_y$  values. However, at  $A_y < 0.6$ , and at  $f/St_0 = 0.8-1.1$ , positive  $E$  values were found at all Reynolds numbers investigated ( $Re=100-180$ ), this is near the upper boundary of the lock-in region. The effect of Reynolds number was found to be weak across most of the phase space.

Further investigation could include the more accurate determination of lock-in boundaries and a more detailed investigation of positive mechanical energy transfer near the boundary of lock-in.

#### 6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők köszönetüket fejezik ki a K 76085 sz. OTKA projekt keretében megvalósult támogatásért. A 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.

#### 7. IRODALOM

- [1] NEWMAN, D.J., KARNIADAKIS, G.E.: Direct numerical simulation of flow over a flexible cable, *Proc. 6th Int. Conference on Flow-Induced Vibration*, London, pp. 193-203, 1995.
- [2] WILLIAMSON, C.H.K., ROSHKO, A.: Vortex formation in the wake of an oscillating cylinder, *Journal of Fluids and Structures* 2, 355-381, 1988.
- [3] BLACKBURN, H.M., HENDERSON, R.D.: A study of two-dimensional flow past an oscillating cylinder, *Journal of Fluid Mechanics* 385, 255-286, 1999.
- [4] KAIKTSIS, L., TRANTAFYLLOU, G.S., ÖZBAS, N.: Excitation, inertia, and drag forces on a cylinder vibrating transversely to a steady flow, *Journal of Fluids and Structures* 23, 1-21, 2007.
- [5] LU, X.Y., DALTON, C.: Calculation of the timing of vortex formation from an oscillating cylinder, *Journal of Fluids and Structures* 10, 527-541, 1996.
- [6] BARANYI, L.: Effect of frequency ratio on the force coefficients of a cylinder oscillated in a uniform stream, *Proc. 7th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference*, Sapporo, Japan, Paper No. L132, 2008.
- [7] BARANYI, L.: Numerical simulation of flow around an orbiting cylinder at different ellipticity values. *Journal of Fluids and Structures* 24, 883-906, 2008.
- [8] POSDZIECH, O., GRUNDMANN, R.: A systematic approach to the numerical calculation of fundamental quantities of the two-dimensional flow over a circular cylinder, *Journal of Fluids and Structures* 23, 479-499, 2007.
- [9] DARÓCZY, L., BARANYI, L.: Euler and second-order Runge-Kutta methods for computation of flow around a cylinder, *Proc. 26th MicroCAD, International Scientific Conference*, Section N, Miskolc, Hungary, pp. 1-6. Paper No. N10, 2012.
- [10] BARANYI, L., DARÓCZY, L.: Numerical investigation of mechanical energy transfer between the fluid and a cylinder oscillating transverse to the main stream, *Conference on Modelling Fluid Flow* (accepted for publication), Hungary, 2012.