

MISKOLCI EGYETEM



GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR

**FŰTÖTT KÖRHENGER KÖRÜLI ÁRAMLÁS ÉS HŐÁTVITEL
NUMERIKUS VIZSGÁLATA**

Ph.D. értekezés tézisei

Készítette:

BOLLÓ BETTI

okl. mérnök-informatikus

SÁLYI ISTVÁN GÉPÉSZETI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA
GÉPÉSZETI ALAPTUDOMÁNYOK TÉMATERÜLET
TRANSPORT FOLYAMATOK ÉS GÉPEK TÉMACSOPORT

A doktori iskola vezetője:

DR. TISZA MIKLÓS

egyetemi tanár

Témacsoport vezetője:

DR. CZIBERE TIBOR

Az MTA rendes tagja

Témavezető:

DR. BARANYI LÁSZLÓ

egyetemi tanár

Miskolc

2013

Bolló Betti

FŰTÖTT KÖRHENGER KÖRÜLI ÁRAMLÁS ÉS HŐÁTVITEL
NUMERIKUS VIZSGÁLATA

Ph.D. értekezés tézisei

Miskolc
2013

BÍRÁLÓ BIZOTTSÁG

Elnök:

Dr. Bertóti Edgár az MTA doktora, egyetemi tanár (ME)

Titkár:

Dr. Siménfalvi Zoltán PhD, egyetemi docens (ME)

Tagok:

Dr. Lajos Tamás az MTA doktora, egyetemi tanár (BME)

Dr. Tóth Tibor az MTA doktora, egyetemi tanár (ME)

Vadászné Dr. Bognár Gabriella PhD, egyetemi docens (ME)

Hivatalos Bírálók:

Dr. Palotás Árpád Bence PhD, egyetemi tanár (ME)

Dr. Kristóf Gergely PhD, egyetemi docens (BME)

1. BEVEZETÉS

A levegő- vagy folyadékáramlásba helyezett testek körül kialakuló örvények hatásának vizsgálata mind mechanikai, mind hőtechnikai szempontból kihívást jelent a mérnökök számára. Az egyik fő technikai problémacsoportot a szélnek kitett magas karcsú épületek, gyárkémenyek, oszlopok, kábelek áramlás keltette rezgései jelentik. A másik vizsgálandó műszaki feladat a hőátadási folyamat leírása áramlásba helyezett, fűtött hengeres testek (fűtőpatronok, hőcserélők, stb.) esetén. A két problémakör fontosságát felismerve a Miskolci Egyetem Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Tanszékén már mintegy két évtizede folyik az a nemzetközi elismertségű kutatómunka, amely a hengeres testek körül kialakuló áramlások elméleti, numerikus és kísérleti vizsgálatával foglalkozik. Kezdetben Baranyi László kutatási feladata volt a körhenger körüli kis Reynolds számú áramlás numerikus vizsgálata 1995-1997 között a japán Nagaokai Műszaki Egyetemen. A nemzetközi szinten elismert kutatómunkáját követően és a tanszéki laboratórium mérés-technikai eszközeinek fejlődésével jelentős mérési tevékenység bontakozott ki a szélcsatornába helyezett fűtött hengeres testek jellemzőinek vizsgálata terén. A számítástechnikai háttér fejlődésével lehetővé vált a kísérleti módszereken túl a fűtött rudak, fűtőpatronok, hődrótok, stb. körüli áramlás- és hőtechnikai jelenségek numerikus vizsgálata is.

Az egyszerű geometria ellenére a körhenger körül kialakuló jelenség modellezése összetett feladat, mert a test mögötti térben igen bonyolult áramlási tér alakul ki. Az áramlási tér meghatározása még nehezebb, ha a körhengert fűtjük, illetve ha a henger a róla leváló örvények hatására a főáramláshoz képest kereszt- vagy hosszirányban még mozgást is végez. Általunk megoldott gyakorlati problémákra példaként említhetjük a pirolízis kazán hőcserélőjének modellezését (Mertinger et al.^{*}, 2011), valamint szélturbina tartóoszlopa körüli áramlás vizsgálatát nagy Reynolds-számoknál (Bolló és Lakatos, 2009).

1.1. A szakirodalom áttekintése

A körhenger körüli áramlás vizsgálatával számos kutató foglalkozik, ezen belül is – gyakorlati fontossága miatt – az álló és mozgó körhenger körüli különböző áramlások elméleti, kísérleti és numerikus elemzésével. A párhuzamos áramlásba helyezett álló henger körüli áramlás területén elért kísérleti és számítási eredményeket jól összefoglalja Zdravkovich (1997) könyve.

A kutatók kísérleti vizsgálataik során különféle átmérőjű körhengereket használnak, ugyanakkor a szél- illetve vízcsatornában az áramlási sebesség is széles tartományban változtatható. Az eredmények összehasonlítása céljából emiatt dimenziótlan mennyiségeket használnak, így például a Reynolds számot (Re), a dimenzió nélküli örvényleválási frekvenciát, az ún. Strouhal számot (St), a felhajtóerő- (C_L) és ellenállás-tényezőt (C_D), a hátsó nyomástényezőt (C_{pb}) és a hőmérsékletmező jellemzése a henger és a közeg közötti fajlagos hőátadási tényezőt, az ún. Nusselt számot (Nu). A párhuzamos áramlásba helyezett álló körhenger körüli áramlás kísérleti vizsgálatával sok kutató foglalkozott, ezek közül a legkiemelkedőbb és legelismertebb Williamson (1988), valamint Williamson és Brown (1998) munkássága, akik a mérési értékeikre illesztett görbe alapján különféle egyenleteket adtak meg. A felhajtóerő-tényező részletes vizsgálatával Norberg (2003) foglalkozott, aki

^{*} az **et al.** latin kifejezést használjuk rövidítési célból az „és szerzőtársai” helyett

széles Reynolds szám tartományban ($Re=47 - 2 \cdot 10^5$) adott meg közelítő összefüggéseket a felhajtóerő-tényező effektív középértékére és a dimenziótlan örvényleválási frekvenciára a Reynolds szám függvényében.

A henger körül kialakuló áramlásra vonatkozó kísérleti eredmények jól felhasználhatóak a számítások ellenőrzéséhez. A számítógép kapacitás növekedése lehetővé tette az áramlási problémák numerikus számítással történő megoldását, így egyre több tanulmány készült e témakörben is (Baranyi és Lewis, 2006; Posdziech és Grundmann, 2007).

A rezgőmozgás a természetben az egyik leggyakoribb mozgásforma. A párhuzamos áramlásba helyezett körhengerről leváló örvények egy periodikus gerjesztést jelentenek a hengerre nézve. A periodikus erők által okozott rezgés amplitúdója annál nagyobb, minél közelebb esik a rugalmas megtámasztású/felfüggesztésű henger sajátfrekvenciája az örvényleválás frekvenciájához, illetve minél kisebb a csillapítás. A nagy amplitúdójú rezgések a szerkezet károsodásához vagy teljes tönkremeneteléhez vezethetnek, mint például a Tacoma Narrows függőhídnak vagy a skóciai Edinburgh közelében a Tay folyó hídjának az összeomlása. A rezgőmozgás legegyszerűbb fajtája a harmonikus rezgés, ahol a kitérés nagysága az idő szinusz függvénye szerint változik. Egy henger keresztirányú- vagy hosszirányú mozgása a főáramláshoz képest egy egy-szabadságfokú rezgés. A gyakorlatban előfordul az egyidejűleg két irányban rezgő henger, amikor a henger egy ellipszis pályán mozog (Blevins, 1990; Baranyi, 2004; Didier és Borges, 2007). Leontini et al. (2006) rugalmasan felfüggesztett és mechanikusan mozgatott henger körüli áramlás numerikus vizsgálata során igazolta, hogy a mechanikusan mozgatott henger, mint a valóság egyszerűsített modellje, jó közelítést jelent az áramlás valamint a folyadék és szerkezet kölcsönhatásának leírásához. Ezért a jelen dolgozatban az egy-szabadságfokú kényszer rezgőmozgással foglalkozom. Ekkor a henger pályája időben adott. Rezgő henger esetén vizsgálataim azokra az esetekre korlátozom, amikor az áramlás és a hengermozgás egy nemlineáris kölcsönhatás révén szinkronizálódik egymással (az örvényleválás frekvenciája megegyezik a henger rezgési frekvenciájával). Ezt a jelenséget az angol nyelvű szakirodalomban: *lock-in*-nek nevezik.

A keresztirányban rezgő henger körüli áramlás a valóságban gyakran előfordul. Keresztirányú mozgással sok kutató foglalkozott; így például Williamson és Roshko (1988), Lu és Dalton (1996), Blackburn és Henderson (1999), Baranyi (2007). A főáramlással párhuzamos irányban, vagyis hosszirányban rezgő henger körül kialakuló áramlás vizsgálatával azonban már kevesebben foglalkoznak (Mittal és Kumar, 1999; Al-Mdallal et al., 2007; Baranyi et al., 2010), pedig a hosszirányú rezgés is okozhat problémákat. 1995-ben a Japánban található Monju atomerőmű hőmérsékletkijáratjának repedését is a hosszirányú rezgés okozta, melynek következtében primer hűtőfolyadék jutott ki a rendszerből. Az atomerőművet akkor leállították és azóta sem indították újra (Nishihara et al., 2005).

A mérnöki gyakorlatban fontos szerepe van a fűtött rudak, fűtőpatronok, hődrótok, stb. körüli áramlási és hőtechnikai jelenségek vizsgálatának. A párhuzamos áramlásba helyezett fűtött álló körhenger körül kialakuló hőmérséklet- és áramlási mező elemzésével szintén sok kutató foglalkozik: például Dumouchel et al. (1998), Wang et al. (2000) és Shi et al. (2004), Bencs et al. (2012). A henger fűtésének hatására az áramlás meghatározása sokkal bonyolultabbá válik, mint a fűtetlen henger esetén, mert a fűtés miatt a henger közelében a folyadék hőmérséklete és, ezzel együtt, tulajdonságai is megváltoznak. A fűtés fizikai hatásait a szakirodalomban nem teljesen egységesen kezelik. Egyes közlemények – pl. Lecordier et al. (1999), Shi et al. (2004) – arra a következtetésre jutnak, hogy a fűtött henger körüli áramlásnál a legfontosabb befolyásoló tényező a sűrűség változása. Más kísérleti tanulmányok – mint pl. Dumouchel et al. (1998) és Wang et al. (2000) – azonban úgy találták, hogy a folyadék kinematikai viszkozitásának hőmérséklet okozta változása

sokkal nagyobb hatással van az áramlásra és a hőátadásra. A numerikus számítások során a legtöbb kutató a közeg tulajdonságait állandónak tekinti, amely kis hőmérsékletkülönbségnél elfogadható közelítés, azonban nagyobb hőmérsékletkülönbségnél már nem hanyagolható el a közeg tulajdonságainak hőmérsékletfüggése. Ezért először meg kell vizsgálni, hogy a közeg tulajdonságainak hőmérsékletfüggése hogyan befolyásolja a párhuzamos áramlásba helyezett álló fűtött henger körül kialakuló áramlási jellemzőket. A termodinamikai jellemzők ilyen vizsgálata nyomán meghatározható, hogy mely tényezők hőmérsékletfüggése hanyagolható el. Egy jól megalapozott elhanyagolás sok-sok óra számítógép futtatás megtakarítását eredményezheti.

A párhuzamos áramlásba helyezett rugalmasan felfüggesztett fűtött rúd, fűtőpatron stb. a periodikusan leváló örvények hatására rezgésbe jöhet. Így a homogén párhuzamos áramlásba helyezett fűtött rezgő körhenger körül kialakuló áramlás leírásánál a hőátadás mellett a henger rezgőmozgását is figyelembe kell venni. A fűtött rezgő körhenger körül kialakuló áramlással eddig viszonylag kevesen foglalkoztak. A kutatók vizsgálataik során általában elhanyagolják a közeg tulajdonságainak hőmérsékletfüggését (Karanth et al., 1994; Fu és Tong, 2002). Jelen vizsgálataim során a közeg tulajdonságainak hőmérséklettől való függését nem hanyagolom el, miközben azt vizsgálom, hogy a hőmérséklet milyen hatással van a rezgő körhenger körüli áramlásra, valamint a henger és a közeg közötti hőátadásra.

1.2. Célkitűzések

Az előzőekben megfogalmazott problémák ismeretében a célkitűzéseim az alábbiak voltak:

Első lépésként egy olyan modell kifejlesztését végeztem el, amely alkalmas összenyomhatatlan newtoni folyadék lamináris áramlásába helyezett álló, fűtetlen körhenger körül kialakuló áramlás vizsgálatára. A modell legyen olyan, hogy pontos eredményeket szolgáltatson és legyen kiterjeszhető rezgőmozgást végző és fűtött henger körüli áramlási és hőátadási viszonyok pontos meghatározására. Emiatt célul tűztem ki a numerikus szimuláció megbízhatóságának alapos vizsgálatát; ezen belül egy olyan modell meghatározását, amelyre elvégzett számítások eredményei gyakorlatilag függetlenek a számítási tartomány méretétől, a számítási háló kialakításától valamint az időlépés megválasztásától. Ugyanakkor célul tűztem ki a kifejlesztett modellel elvégzett számítási eredményeknek a validálását, vagyis a szakirodalomban megtalálható, párhuzamos áramlásba helyezett álló fűtetlen hengerre vonatkozó mérési és számítási eredményekkel történő összehasonlítást.

Második lépésként annak feltárásával foglalkoztam, hogy a közeg tulajdonságainak hőmérsékletfüggése hogyan befolyásolja a párhuzamos áramlásba helyezett álló fűtött henger körül kialakuló áramlási és hőátadási jellemzőket. Mint ismeretes, az alapegyenletekben szereplő anyagjellemzők (mint például a sűrűség, viszkozitás, fajhő, hővezetési tényező) függnak a közeg hőmérsékletétől. Az anyagjellemzők hőmérsékletfüggésének az áramlásra, valamint a közeg és a henger közti hőátadásra gyakorolt hatásának tisztázása érdekében, célul tűztem ki az alapegyenletekben az anyagjellemzők egzakt hőmérsékletfüggésének figyelembe vételét, melyek során megvizsgáltam, hogy mely anyagjellemzők hőmérséklettől való függésétől lehet eltekinteni. Mivel a kutatók eddig nem foglalkoztak fűtött henger esetén a felhajtóerő- és az ellenállás-tényező, illetve a hátsó nyomástényező vizsgálatával, ezért elvégeztem azok különféle hőmérsékletarányokra (a hengerfelület és a zavartalan áramlás hőmérsékleteinek hányadosa) vonatkozó vizsgálatát is.

Harmadik lépésként célul tűztem ki annak vizsgálatát, hogy milyen hatással van a hőmérséklet a fűtött álló és rezgő körhenger körül kialakuló áramlási és hőátadási jelenségekre. Ezen belül számításaimat rezgő henger esetén arra az amplitúdó tartományra kívántam elvégezni, ahol az örvényleválás frekvenciája szinkronizálódik a henger rezgési frekvenciájával (lock-in). Kereszt- és hosszirányú rezgés esetén szisztematikusan megvizsgáltam a Reynolds szám és a rezgési amplitúdó hatását. Fontosnak véltem a számítási eredményeim összehasonlítását a szakirodalomban található adatokkal, nagy hangsúlyt fektetve a fűtött henger és az áramló közeg közötti hőátadásra.

2. A FELADAT MEGOLDÁSÁNAK MÓDSZERE

A kutatómunka bevezető része egyrészt a vonatkozó szakirodalom részletes áttekintését, másrészt – ezzel szoros összefüggésben – a széleskörű számítástechnikai alapok kialakítását tűzte ki célul. Ez utóbbi vizsgálatok feltétlenül szükségesek a következő lépések eredményeinek megbízhatósága érdekében.

A számítások elvégzéséhez az Ansys Fluent kereskedelmi programcsomagot alkalmaztam. A számításokhoz az egyszerűbb és kisebb számítási munkát igénylő két-dimenziós modellt használtam, mert a Reynolds számnak nincs nagy hatása az örvényleválással keltett rezgésekre (Newman és Karniadakis, 1995). Így sok esetben a viszonylag kis Reynolds számú modellel is elfogadható módon tudom közelíteni a nagyobb Reynolds számú, gyakorlatban előforduló jelenségeket. A körhenger és környezetének modellezését két koncentrikus körrel oldottam meg, ahol a belső kör a henger felületét, míg a külső a távoli zavartalan áramlási teret jellemzi. Fűtetlen henger esetén a kis áramlási sebesség miatt a folyadékot összenyomhatatlannak tekintettem. A számítógépes modellezés során ellenőrizni kellett a számítási eredmények numerikus helyességét, meg kellett határozni és kiküszöbölni a numerikus módszerekből eredő, nem fizikai természetű, de az eredményeket jelentősen befolyásoló hibákat. Ezért vizsgálatokat végeztem a hálókialakítás, az időlépés és a számítási tartomány méret nagyságának meghatározásához. A kapott eredményeket összehasonlítottam a szakirodalomban található mérési és számítási értékekkel, melyekkel jó egyezést találtam, így az összehasonlítás kellően igazolja a kidolgozott számítási modellt és a program alkalmazhatóságát.

Ezt követően a programot kiterjesztettem a fűtött álló henger esetére és teszteltem a szakirodalomban rendelkezésre álló adatokkal, melyekkel jó egyezést mutatott. Következő lépésként a kereszt- és hosszirányú rezgés esetére fejlesztettem tovább a numerikus eljárásomat. A párhuzamos áramlásba helyezett rezgő körhengert a numerikus szimuláció során úgy modellezem, hogy a henger rögzített és a folyadék végez rezgő mozgást olyan módon, hogy a hengerhez kötött koordináta rendszerben a mozgás kinematikailag azonos legyen azzal az esettel, amikor a henger végez rezgő mozgást párhuzamos áramlásban. Ennek alapján, a két rendszer közötti dinamikai kapcsolat ismeretében a nyert számítási eredmények összehasonlíthatók egymással (Baranyi, 2005). Miután meggyőződtem róla, hogy a kidolgozott modellem mind a fűtetlen, mind a fűtött álló hengerre, valamint a fűtetlen rezgő hengerre is alkalmazható, áttértem a fűtött rezgő henger körüli áramlási és hőátadási jelenségek elemzésére.

3. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

- I. Egy CFD szoftvert alkalmassá tettem a homogén párhuzamos áramlásba helyezett fűtetlen álló körhenger körüli kis Reynolds-számú ($49 < Re < 200$) kétdimenziós áramlás számítására azért, hogy meghatároztam, hogy a nyert eredmények függetlenek a számítási tartomány nagyságától, amennyiben az nagyobb, mint $220d$, valamint a dimenziótlan időlépéstől, ha az $0,001$ -nél kisebb, továbbá a hálósűrűségtől, ha az 360×310 nagyság feletti. Ezekben az esetekben a szakirodalomban található mérési és számítási értékekkel kiváló egyezést találtam (az egyes vizsgált mennyiségek esetén az átlagos eltérés kisebb, mint $0,7\%$). Sikeresen kiterjesztettem az alkalmazási tartományt az állandó felületi hőmérsékletű fűtött álló henger körüli áramlás esetére is. A modellt továbbfejlesztéseként a jelenséget leíró egyenletrendszert átalakítottam, hogy az alkalmas legyen a rezgő henger körüli áramlás vizsgálatára mind fűtetlen, mind fűtött esetben.

Bolló (2010a), Bolló (2010b), Bolló és Baranyi (2010), Baranyi et al. (2011)

- II. Bizonyítottam, hogy az álló fűtött henger vizsgálatokor már viszonylag nem túl jelentős henger hőmérsékleteknél ($< 300^\circ\text{C}$) sem hanyagolható el a körüláramló levegő hőmérsékletfüggése. A levegő anyagjellemzői (ν , ρ , λ , c_p) különböző (többnyire jelentős) mértékben függenek a hőmérséklettől (4.1 fejezet), ezért példaként $T^*=1,5$ esetén részletesen elemeztem, hogy ezek külön-külön mennyire változtatják meg az áramlás és hőátadás jellemzőit (mint pl. St , C_{Lrms} , $C_{Dát}$, $-C_{pbát}$, $Nu_{\inftyát}$). Megállapítottam, hogy a fajhő hőmérsékletfüggése a vizsgált tartományon elhanyagolható, és így hatása a vizsgált jellemzőkre jelentéktelen (kisebb, mint $0,5\%$). A legerősebb (növelő) hatása a kinematikai viszkozitás hőmérsékletfüggésének van, különösen a C_{Lrms} változására ($\sim 45\%$). A többi anyagjellemző hatása az egyéb dimenziótlan tényezőkre is számottevő, ezek mértékét és irányát is számszerűsítettem (4.2 ábra).
A hőmérsékletfüggés meghatározó hatásának további igazolását jelentik a $T^*=1-2$ tartományra elvégzett részletes elemzéseim is (4.1 táblázat, 4.9 ábra).

Bolló (2012a)

- III. Az áramló közeg számítására a szakirodalomban bevezetett effektív hőmérséklet ($T_{eff} = T_\infty + c(T_w - T_\infty)$, lásd 4. fejezet) segítségével, a c konstans alkalmas megválasztásával sikeresen kiküszöbölték ki a hőmérséklet hatását különböző dimenziótlan jellemzők esetén. Az általam áttekintett szakirodalomban nem foglalkoztak a $C_{Lrms}-Re_{eff}$ és a $C_{pbát}-Re_{eff}$ függvénykapcsolatokkal. Ezért meghatároztam a Reynolds-szám függvényében ($60 < Re_{eff} < 200$) az $1 \leq T^* < 2$ hőmérsékletarány tartományban a C_{Lrms} -nél a $c=0,446$, $C_{pbát}$ -nál pedig a $c=0,24$ értékeket, amelyek alkalmazásával az adott függvénykapcsolatok esetén a hőmérsékletfüggés kiküszöbölhető.

Baranyi et al. (2009), Bolló (2010b), Bolló (2010c)

- IV. Kereszt- és hosszirányú rezgés esetén megvizsgáltam a Reynolds-szám és a rezgési amplitúdó hatását az erőtényezőkre, a mechanikai energiaátadásra és a hőátadásra különböző Re és T^* kombinációkra ($Re=100-180$; $f/St_0=0,8$ és $0,9$; $T^*=0,9-1,5$ tartományokon).
- a) Kimutattam, hogy mindkét irányú rezgés esetén a hőmérsékletarány növelésével a szinkronizálódási tartomány egyértelműen eltolódik a kisebb rezgési amplitúdók felé

(lásd 5.6 és 5.26 ábrák). Az eltolódás mértékét a hőmérsékletarány és a frekvenciahányados nagysága határozza meg.

- b) Megállapítottam, hogy fűtetlen és fűtött henger keresztirányú rezgése esetén az effektív Nusselt szám (Nu_{eff}) a rezgési amplitúdó függvényében jó közelítéssel lineárisan növekszik és a görbék meredeksége független a T^* -tól. A hosszirányú rezgés esetén azonban az Nu_{eff} az csak egy bizonyos amplitúdó értékig növekszik, majd a maximum elérése után kis mértékben csökken. A jellegbeli különbségek abból adódhatnak, hogy keresztirányú rezgésnél a henger a mozgása során rendszeresen hideg levegővel találkozik, a hosszirányú rezgésnél pedig – a fűtés és/vagy a sűrűlási hő miatt – nem.
- c) Aerodinamikai szempontból a henger és a folyadék közötti pozitív mechanikai energiaátadás (E) a veszélyesebb (lásd 5.2.3. fejezet). Kimutattam, hogy a fűtött henger keresztirányú rezgése esetén az E a rezgési amplitúdó függvényében először egy maximális értékig növekszik, majd utána meredeken csökken és végül negatívvá válik. Megállapítottam, hogy a hőmérsékletarány növekedésével az energiaátadás maximális értéke egyre kisebb lesz és azt egyre kisebb amplitúdóknál éri el (lásd 5.17 ábra).

Bolló és Baranyi (2011a); Bolló és Baranyi (2011b); Bolló és Baranyi (2011c); Baranyi et al. (2011), Bolló (2012b), Bolló és Baranyi (2012)

4. TOVÁBBFEJLESZTÉSI IRÁNYOK, LEHETŐSÉGEK

A disszertációban megfogalmazott kutatómunka számos irányban továbbfejleszthető:

- A disszertációban vizsgált lamináris áramlás esete kiterjeszhető turbulens áramlásra is. A feladatot bonyolítja, hogy turbulens áramlás esetén három-dimenziós modell szükséges a számítások elvégzéséhez.
- A probléma kiterjesztése más áramló közegek (pl. víz, többfázisú vagy nem-newtoni közeg) esetére.
- A geometriát tekintve foglalkozni lehet a véges hosszúságú illetve lépcsős hengerek (bordás csövek) eseteivel.
- A szerkezeti elemekről leváló örvények zajt kelthetnek, ezért ez a jelenség akusztikai, környezetvédelmi kérdés szempontjából is megvizsgálható. A henger felületi érdessége is hatással van az áramlási jelenségre illetve a zaj kialakulására. Erre jó példa lehet annak vizsgálata, hogy egy távvezeték milyen felületi érdessége esetén lesz minimális a leváló örvények által keltette zaj. A feladatot tovább bonyolítja a környezet és a kábel közötti hőmérsékletkülönbség figyelembevétele.
- A természet erőinek kitett műtárgyak esetén a későbbi vizsgálatok nem kerülhetik meg a jegesedés és leolvadás jelenségének leírását az áramlási- és hőtani viszonyok függvényében.
- Nagy kihívást jelent a hőcserélők komplex vizsgálata, ahol a csőkötegekről leváló örvények a hőcserélő rezgéséhez és zajos üzeméhez vezethetnek és szerepet játszanak a hőátadási folyamatok is.

5. PUBLIKÁCIÓK AZ ÉRTEKEZÉS TÉMÁJÁBAN

- Baranyi, L., Szabó, Sz., Bolló, B., Bordás, R., 2009. Analysis of low Reynolds number flow around a heated circular cylinder. *Journal of Mechanical Science and Technology* **23**, 1829-1834. (Impact factor: 0,374).
- Bolló, B., 2010a. Grid independence study for flow around a stationary circular cylinder. Proc. *24th MicroCAD, International Scientific Conference*, Section F, Miskolc, Hungary, pp. 1-6.
- Bolló, B., 2010b. Heat effects on unsteady laminar flow past a circular cylinder. Proc. *16th Building Services, Mechanical and Building Industry days International Conference*, Debrecen, Hungary, pp. 102-109.
- Bolló, B., 2010c. Low Reynolds number flow around and heat transfer from a heated circular cylinder. *International Review of Applied Sciences and Engineering* **1**(1-2), 15-20.
- Bolló, B., Baranyi, L., 2010. Computation of low-Reynolds number flow around a stationary circular cylinder. Proc. *7th International Conference on Mechanical Engineering*, Budapest, pp. 891-896.
- Baranyi, L., Bolló, B., Daróczy, L., 2011. 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, Paper No. PVP2011-57554, pp. 1-9.
- Bolló, B., Baranyi, L., 2011a. Numerical simulation of oscillatory flow past and heat transfer from a cylinder. Proc. *Recent Researches in Mechanics: 2nd International Conference on Fluid Mechanics and Heat and Mass Transfer*, Corfu Island, Greece, pp. 130-135.
- Bolló, B., Baranyi, L., 2011b. Computation of low-Reynolds number flow around an oscillated circular cylinder. Proc. *25th MicroCAD, International Scientific Conference, Section D*, Miskolc, Hungary, pp. 19-24.
- Bolló, B., Baranyi, L., 2011c. Flow around an oscillating or orbiting cylinder – Comparative numerical investigation. Proc. *11th Hungarian Conference on Theoretical and Applied Mechanics, HCTAM*, Miskolc, Hungary, pp. 1-7, On CD ROM, Paper Number: 84.
- Bolló, B., 2012a. Fűtött körhenger körüli áramlás vizsgálata. *GÉP LXIII.* (1), 31-34.
- Bolló, B., 2012b. Hosszirányban rezgő folyadékba helyezett fűtött körhenger körüli áramlás vizsgálata. *GÉP LXIII.* (9), 25-28.
- Bolló, B., Baranyi, L., 2012. Heat and energy transfer from a cylinder in an oscillatory low-Reynolds number flow. Proc. *15th International Conference on Fluid Flow Technologies, CMFF'12*, Budapest, Hungary, pp. 261-268.

6. IRODALOMJEGYZÉK

- Al-Mdallal, Q.M., Lawrence, K.P., Kocabiyik, S., 2007. Forced streamwise oscillations of a circular cylinder: Locked-on modes and resulting fluid forces. *Journal of Fluids and Structures* **23**(5), 681-701.
- Baranyi, L., 2004. Numerical simulation of flow past a cylinder in orbital motion. *Journal of Computational and Applied Mechanics* **5**(2), 209-222.
- Baranyi, L., 2005. Lift and drag evaluation in translating and rotating non-inertial systems. *Journal of Fluids and Structures* **20**(1), 25-34.
- Baranyi, L., 2007. Mozgó henger körüli lamináris áramlás vizsgálata. *A Miskolci Egyetem Habilitációs Füzetei. Műszaki-természettudományi Habilitációs Bizottság.*
- Baranyi, L., Huynh, K. and Mureithi, N.W., 2010. 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, (within FEDSM2010-ICNMM2010 ASME Conference 2010)*, Montreal, Québec, Canada, on CD ROM, Paper No. FEDSM-ICNMM2010-31183, pp. 1-10.
- Baranyi, L., Lewis, R.I., 2006. Comparison of a grid-based CFD method and vortex dynamics predictions of low Reynolds number cylinder flows. *The Aeronautical Journal* **110**(1103), 63-71.
- Bencs, P., Szabó, Sz., Oertel, D., 2012. Simultaneous measurement of velocity and temperature field downstream of a heated cylinder. Proc. *International Conference on Innovative Technologies (IN-TECH 2012)*, Rijeka, Croatia, pp. 205-209.
- Blackburn, H.M., Henderson, R.D., 1999. A study of two-dimensional flow past an oscillating cylinder. *Journal of Fluid Mechanics* **385**, 255-286.
- Blevins, R.D., Flow-Induced Vibrations. *Van Nostrand Reinhold, New York*, 1990.
- Bolló, B., Lakatos, K., 2009. Modeling the flow around the poles of wind turbines. Proc. *6th WSEAS International Conference on Fluid Mechanics*, Ningbo, China, pp. 23-25.
- Didier, E., Borges, A.R.J., 2007. Numerical predictions of low Reynolds number flow over an oscillating circular cylinder. *Journal of Computational and Applied Mechanics* **8**(1), 39-55.
- Dumouchel, F., Lecordier, J.C., Paranthoën, P., 1998. The effective Reynolds number of a heated cylinder. *International Journal of Heat Mass Transfer* **41**(12), 1787-1794.
- Fu, W.S., Tong, B.H., 2002. Numerical investigation of heat transfer from a heated oscillating cylinder in a cross flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer* **45**, 3033-3043.
- Karanth, D., Rankin, G.W., Spidhar, K., 1994. A finite difference calculation of forced convective heat transfer from an oscillating cylinder, *International Journal of Heat and Mass Transfer* **37**(11), 1619-1630.
- Lecordier, J.C., Dumouchel, F., Paranthoën, P., 1999. Heat transfer in a Bénard-Kármán vortex street in air and in water. *International Journal of Heat and Mass Transfer* **42**, 3131-3136.
- Leontini, J.S., Stewart, B.E., Thompson, M.C., Hourigan, K., 2006. Wake state and energy transitions of an oscillating cylinder at low Reynolds number. *Physics of Fluids* **18**, 067101, 1-9.
- Lu, X.Y., Dalton, C., 1996. Calculation of the timing of vortex formation from an oscillating cylinder. *Journal of Fluids and Structures* **10**, 527-541.
- Mittal, S., Kumar, V., 1999. Finite element study of vortex-induced cross-flow and in-line oscillations of a circular cylinder at low Reynolds numbers. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* **31**, 1087-1120.

- Mertinger, V., Benke, M., Szabó, Sz., Bánhidi, O., Bolló, B., Kovács, Á., 2011. Examination of a failure detected in the convection zone of a cracking furnace. *Engineering Failure Analysis* **18**, 1675-1682. (Impact factor: 1,086).
- Newman, D.J., Karniadakis, G.E., 1995. Direct numerical simulation of flow over a flexible cable. *Proc. 6th Int. Conference on Flow-Induced Vibration*, London, pp. 193-203.
- Nishihara, T., Kaneko, S., Watanabe, T., 2005. Characteristics of fluid dynamic forces acting on a circular cylinder oscillated in the streamwise direction and its wake patterns. *Journal of Fluids and Structures* **20**, 505-518.
- Norberg, C., 2003. Fluctuating lift on a circular cylinder: review and new measurements. *Journal of Fluids and Structures* **17**, 57-96.
- Posdziech, O., Grundmann, R., 2007. 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.
- Shi, J.M., Gerlach, D., Beuer, M., Biswas, G., Durst, F., 2004. Heating effect on steady and unsteady horizontal laminar flow of air past a circular cylinder. *Physics of Fluids* **16**(12), 4331-4345.
- Wang, A.B., Trávníček, Z., Chia, K.C., 2000. On the relationship of effective Reynolds number and Strouhal number for the laminar vortex shedding of a heated circular cylinder. *Physics of Fluids* **12**(6), 1401-1410.
- Williamson, C.H.K., 1996. Vortex dynamics in the cylinder wake. *Annual Review of Fluid Mechanics* **28**, 477-539.
- Williamson, C.H.K., 1988. Defining a universal and continuous Strouhal-Reynolds number relationship for the laminar vortex shedding of a circular cylinder. *Physics of Fluids* **31**(10), 2742-2744.
- Williamson, C.H.K., Brown, G.L., 1998. A series in $1/\sqrt{\text{Re}}$ to represent the Strouhal-Reynolds number relationship of the cylinder wake. *Journal of Fluids and Structures* **12**(8), 1073-1085.
- Williamson, C.H.K., Roshko, A., 1988. Vortex formation in the wake of an oscillating cylinder. *Journal of Fluids and Structures* **2**, 355-381.
- Zdravkovich, M.M., Flow around circular cylinders. Vol.1: Fundamentals. Oxford University Press, Oxford, 1997.

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.

A SZERZŐ KÖSZÖNETÉT FEJEZIK KI AZ OTKA (K 76085)
ÉS A MAGYAR-NÉMET EGYÜTTMŰKÖDÉSI PROGRAM
P-MÖB/386-NAK A KUTATÁS TÁMOGATÁSÉRT.