



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Gépészmérnöki Kar

Hidrodinamikai Rendszerek Tanszék

Gömbszimmetrikus buborék dinamikus viselkedése és kavitációs örvény leválás

Doktori disszertáció alapján készült tézisfüzet

Written by: Hegedűs Ferenc
okleveles gépészmérnök

Supervisor: Dr. Kullmann László
egyetemi docens

2012. június 29., Budapest

1. fejezet

Gömbszimmetrikus buborék dinamikus viselkedése.

1.1. Bevezetés

Az általános műszaki alkalmazásokban, például örvénygépekben és hidraulikus rendszerekben kavitáció léphet fel réteg kavitáció formájában. Ez korlátozza az alkalmazhatóságát azoknak a kutatási eredményeknek, amiket egyetlen gömb alakú buborék esetén kapunk. Sokáig a gömbszimmetrikus buboréokra kapott numerikus eredményeket csak a kavitációs roncsolódás mechanizmusának megértésére és a maximális hőmérséklet és nyomás becslésére használták. Vannak azonban különböző speciális alkalmazások, ahol a gömbszimmetrikus feltevés jó közelítéssel érvényes.

A legtöbb eredmény ebben a disszertációban a rohamosan fejlődő ultrahangos technológiát hivatott segíteni. A fő célja ezeknek az alkalmazásoknak, hogy növeljék a tömeg-, impulzus- és hőátvitelt különböző fázisok között kihasználva a buborék összeroppanásakor keletkező extrém körülményeket, konkrétan a keletkező nagy nyomást és hőmérsékletet és az összeroppanáskor generált lökéshullámot. Tehát a kavitáció okozta roncsolódás nem feltétlenül kerülendő jelenség. A mérnöki alkalmazások legfőképpen az élelmiszeriparhoz és az anyagtudományhoz kapcsolódnak. Néhány alkalmazás ezek közül az a következő.

A kavitációs buborék összeroppanása során keletkező lökéshullám használható két egymással nem oldódó folyadék keveréséhez. Canselier et al. 2002 és Freitas et al. 2006 számolt be stabil jó minőségű emulzió gyártásáról.

Az ultrahangos technológiát sok élelmiszernél a viszkozitás megváltoztatására is lehet használni, ugyanis a kavitáció okozta csúsztató feszültség csökkenti a viszkozitást tixotróp anyagoknál. Elég magas besugárzási energia szinten a változás tartós lesz, lásd Seshadri et al. 2003.

A technológia egyik ígéretes alkalmazása az ultrahangos pasztörizálás. Már közepes (50°C -os) hőmérsékleten is a baktériumok membránszerkezete eléggé meggyengül ahhoz,

hogy kevésbé legyen ellenálló a kavitációs roncsolódás hatásának. Ezzel az új innovatív módszerrel Knorr et al. 2004 sikeresen csökkentette az *E. coli* baktériumok számát tojásban.

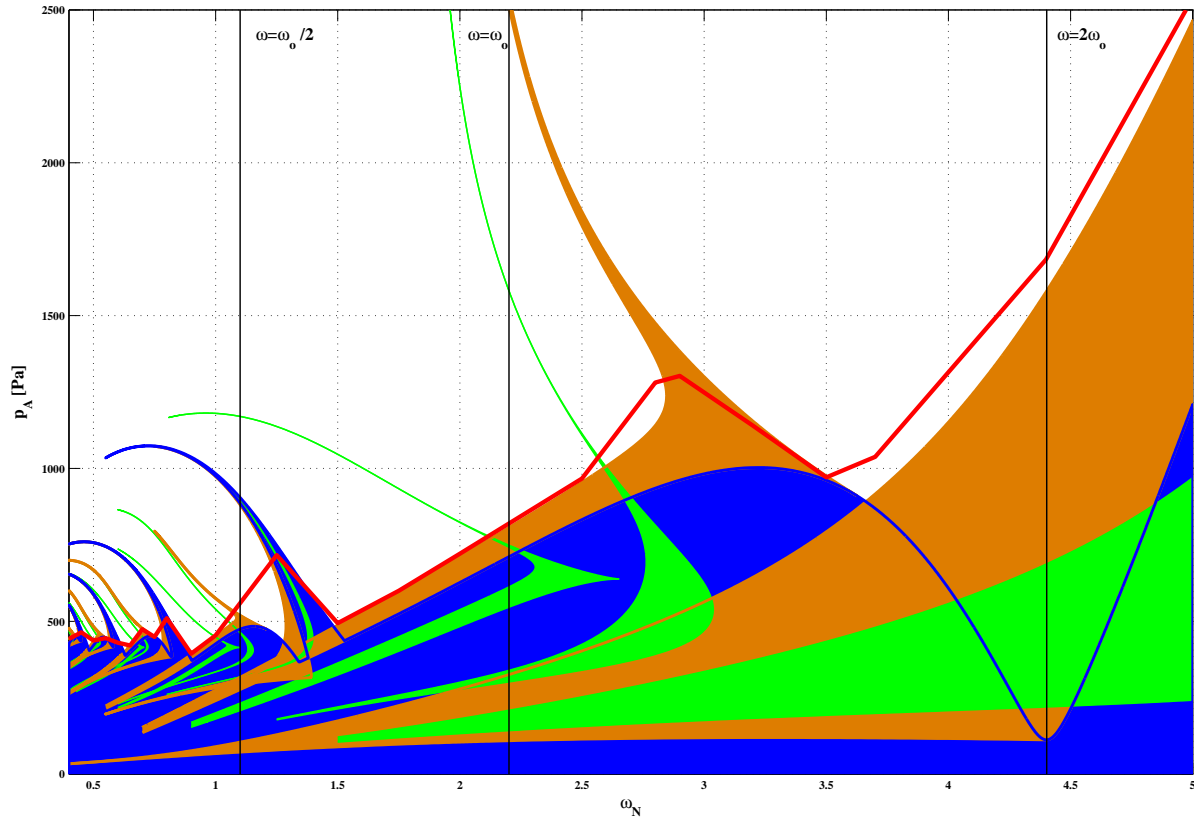
A buborék összeroppanásakor keletkező extrém körülmények (nagy nyomás és hőmérséklet) kémiai reakciókhoz vezethetnek számos szerves/szervetlen oldatban. Az ipar nagy érdeklődést mutat új polimerek kutatásában és fejlesztésében. Számos tanulmány megerősítette, hogy a nagy intenzitású ultrahang csökkenti a különböző polimerek molekulatömegét a polimer láncok széttöredezésével. Ezt, a keletkező lökéshullámokkal érik el, lásd Konaganti and Madras 2010. Két különböző típusú polimert használva egy közös oldatban, a töredezés által keletkezett szabad gyökök hatására új típusú polimerek keletkezhetnek.

Heterogén katalitikus folyamatokban gyakran ritka és drága fémekre van szükség. Ha kevésbé aktív, de sokkal olcsóbb fémek hatásosságát növelni tudnánk, az jelentősen csökkentené a folyamatok költségét. Újabb vizsgálatok kimutatták, hogy az ultrahangos besugárzás a hatásos érintkező felületet növelésével növelheti a katalitikus folyamatok hatékonyságát. Ez a jelenség szintén a kavitáció generálta lökéshullámoknak köszönhető. Disselkamp et al. 2004 vizsgálta a hagyományos és az ultrahangos katalizációs folyamatokat.

1.2. A Rayleigh–Plesset egyenlet periodikus megoldásai

A rohamosan terjedő ultrahangos technológia arra ösztönzött, hogy megvizsgáljam egy gömbszimmetrikus buborék viselkedését harmonikus nyomásgerjesztés hatására. Annak ellenére, hogy a számításaimat vízre és adott környezeti nyomásra és hőmérsékletre végeztem el a Rayleigh–Plesset egyenletet használva, az eredmények a strukturális stabilitás miatt minőségileg megegyeznének más paraméterek és anyag alkalmazásakor is. A buborék belseje tartalmaz gőzt és nem kondenzálódó gázt egyaránt. A modell nemlineáris tulajdonságai miatt számos, különböző típusú stabil megoldások léteznek egyszerre. Ezeknek a megoldásoknak a tulajdonságai eltérőek lehetnek, ezért fontos tudnunk, hogy a megoldások a gerjesztési amplitúdó p_A és körfrekvencia ω függvényében hogyan változnak. Ezért kiszámoltam az 1, 2 és 3 periódusú stabil megoldásokat (a megoldások periódus ideje a gerjesztés periódusidejének 1, 2 vagy 3 szorososa) a nyomás amplitúdó p_A és a relatív körfrekvencia ω_N függvényében, hasznos információval szolgálva a gyakorlatnak. Az 1.1 ábrán az eredmények összefoglalása látható. A kék, barna és zöld területek az 1, 2 és 3 periódusú megoldások létezésének tartományát jelölik. A buborék saját körfrekvenciáját ω_o jelöli.

Az erős nemlineáris jelenségek hatására a különböző típusú megoldások általában szimultán léteznek. A vonzásterületek vizsgálatával $\omega = 2\omega_o$ frekvenciánál kiderült, hogy a



1.1. ábra. Összefoglaló ábra a stabil 1, 2 és 3 periódusú megoldások létezésének tartományáról a $p_A - \omega_N$ paraméter síkon. A kék, barna és zöld területek az 1, 2 és 3 periódusú megoldásokat jelölik.

3 periódusú megoldások valószínűsége nagyon kicsi. A vonzásterületük a globális vonzásterületnek csak 4%-a. Ez azt jelenti, hogy 100-ból csak 4 buborék mutat összeroppanás szerű mozgást.

A globális vonzásterületet csak a $p_A = 450$ Pa-os nyomás amplitúdóig tudtam kiszámolni. E fölött az érték fölött a területet meghatározó invariáns sokaságok metszik egymást, ami azt eredményezi, hogy a vonzásterület határa fraktál lesz. A sokaságok érintésének megjelenését a Melnikov-féle kis paraméteres perturbációs módszerrel vizsgáltam. Habár a módszer nagyságrendileg helyes eredményt adott, a mérnöki szempontból releváns paraméterértékeknél meglehetősen pontatlan eredményt ad (450 Pa helyett $p_A = 840$ Pa).

Tézis #1:

A harmonikusan gerjesztett Rayleigh–Plesset egyenlet stabil 1, 2 és 3 periódusú megoldásait vizsgáltam a nyomás amplitúdó - relatív frekvencia ($p_A - \omega_N$) paramétersíkon, izotermikus állapotváltozást feltételezve a gáz tartalomra.

- A stabil megoldások létezésének tartománya lineárisan növekszik a frekvenciával ha $\omega > 2\omega_o$, ahol ω_o buborék természetes körfrekvenciája.
- $\omega = 2\omega_o$ frekvenciánál a 3 periódusú megoldás vonzástartománya kevesebb, mint 4%-a globális vonzástartománynak.
- A globális vonzásterület határa $p_A = 450$ Pa nyomás amplitúdónál fraktál lesz egy nyeregszerű megoldás invariáns sokaságai homoklinikus érintésének köszönhetően. Ez a nyereg típusú megoldás a gerjesztetlen rendszer instabil egyensúlyi helyzetéből bifurkálódik.
- A homoklinikus érintés kritikus nyomás amplitúdó értéknek becslésére a Melnikov-féle kis paraméteres perturbációs módszert használtam. A mérnöki szempontból érdekes paraméterértékeknél (viszkozitás és nyomás amplitúdó) a módszer csak mérsékelten pontos eredményt szolgáltat ($p_A = 840$ Pa az exact 450 Pa helyett).

A tézishoz kapcsolódó publikációk: Hegedűs et al. 2012a, Hegedűs and Kullmann 2012c, Hegedűs et al. 2011, 2009c.

1.3. Hővezetés hatása a buborékdinamikára

Ha a buborék gőzt is tartalmaz, akkor a buborék lengése közben kondenzációs és párolgási folyamatok játszódhatnak le. A szükséges, illetve felszabaduló hő a folyadéktérből vezetéssel érkezik, illetve távozik. A Rayleigh–Plesset (RP) egyenlet ezt a jelenséget nem modellezi, a hőmérséklet mezőt a folyadékban homogénnek tételezi fel, ami egyenértékű a végtelen gyorsan lejátszódó hő transzporttal a két fázis között. Azért, hogy ezt a hatást megvizsgáljam, a Rayleigh–Plesset egyenlethez csatoltam a hővezetés differenciál egyenletét (RPH modell).

Numerikus szempontból a legfőbb célom az volt, hogy az új parciális differenciálegyenletet valamilyen szemi diszkretizációs módszerrel közönséges differenciálegyenlet rendszerre bontsam. Ennek a megközelítésnek számos előnye van. Egyrészt könnyen használható egy adaptív magasabb rendű időbeni diszkretizációs módszer, mint például egy Runge–Kutta megoldó. Másrészt a bifurkációs vizsgálatok során használt hatékony vizsgálati módszerek használhatóak. Az egyik alapvető módszer az egyszerű véges differencia módszer. Habár sok egyenlet szükséges, hogy nagy pontosságot érjünk el, stabilitási tulajdonságai miatt referenciaszámításokhoz jól alkalmazható. Az a tény, hogy periodikus

megoldások kiszámítása nagyon erőforrás igényes lehet, motivált arra, hogy magasabb rendű közelítő módszert használjak az egyenlet térbeli felbontására is (Galerkin és spektrál kollokációs módszert) azért, hogy a keletkező egyenletek számát, azaz szabadság fokát a lehető legkisebbre csökkentsem.

Átfogó numerikus vizsgálatnál azt találtam, hogy közepes térbeli felbontás esetén (a szabadságfok kisebb mint 30) a Galerkin módszer kalapfüggvényekkel adja a legpontosabb megoldást. Ha ennél pontosabb megoldás szükséges, akkor a Galerkin vagy a spektrál módszert kell használni polinomiális bázisfüggvény rendszerrel.

Összehasonlítva a RP egyenletet az RPH modellel az adódott, hogy a hővezetésnek két mechanizmuson keresztül van jelentős hatása. Először, ha a környezeti paraméterek (hőmérséklet és nyomás) közel vannak a tenzió görbéhez. Ebben az esetben a gőz koncentrációja összemérhetővé válik a nem kondenzálódó gázzal. Másodsorban van egy közvetlen hőmérsékletfüggés is, ami azon alapszik, hogy a buborék falára felírt peremfeltételben található $\lambda/(\rho_V L)$ együttható a hőmérséklettel rohamosan csökken. Értéke 100%-ról 17%-ra esik vissza, ahogy a hőmérséklet 30°C -ról 70°C -ra növekszik, mindez környezeti nyomástól függetlenül.

Tézis #2:

Vizsgáltam a hővezetés hatását kiegészítve a Rayleigh–Plesset egyenletet a folyadék-térre felírt hővezetési differenciálegyenlettel. Különböző szemi-diszkretizációs eljárásokat alkalmazva az energia egyenletre azt találtam, hogy:

- Közepes diszkretizációs szintig (a szabadságfokok száma kisebb, mint 30) a Galerkin módszer kalap bázisfüggvényekkel adja a legpontosabb eredményt.
- Ha finomabb felbontás szükséges, akkor a spektrál kollokációs módszert vagy a Galerkin módszert polinomiális bázis függvényekkel kell használni.

A tézishez kapcsolódó publikációk: Hegedűs et al. 2010a, 2009b, 2008.

Tézis #3:

A hővezetésnek két mechanizmuson keresztül van jelentős hatása a buborék viselkedésére:

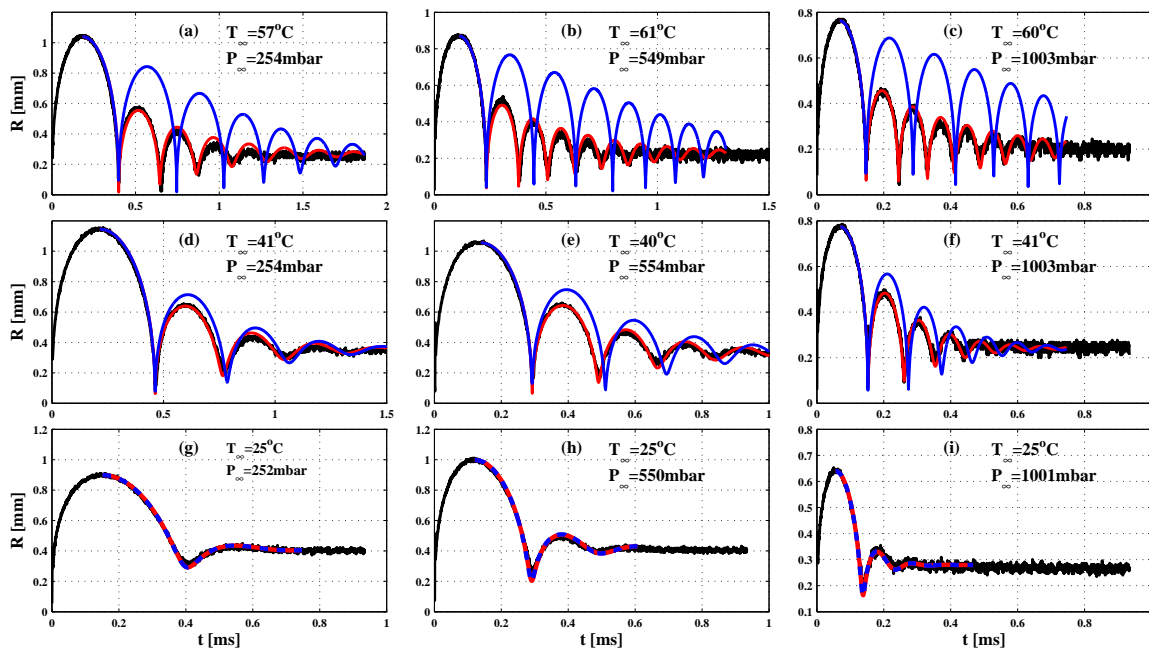
- Elsősorban, ha a környezeti nyomás és hőmérséklet paraméter pár közel van a tenzió görbéhez. Ebben az esetben a nem kondenzálódó gáz parciális nyomása egyre kevésbé lesz meghatározó. A nagy koncentrációjú gőz fokozza a hő transzport hatását mivel a kondenzáció és elgőzölgés folyamataiban jelentős szerepet játszik.

- Másodsorban, magas hőmérséklet esetén. A két fázis határára felírt peremfeltételben szereplő $\lambda/(\rho_V L)$ együttható a hőmérséklettel közel exponenciálisan csökken jelentősen csökkentve a buborék fal sebességét \dot{R} .

A tézishoz kapcsolódó publikációk: Hegedűs et al. 2010a.

1.4. Szabad lengést végző buborék sugarának mérése

A Rayleigh–Plesset egyenlet kiegészítése a hővezetési egyenlettel azt vonja maga után, hogy legalább két új paraméter jelenik meg az új modellben, nevezetesen a hőmérséklet-vezetési tényező és a párolgáshő. Ezek közül egyik sem küszöbölhető ki dimenziótlanítással. A különböző számú paraméterek jelentősen megnehezítik a különböző modellek összehasonlítását, ezért olyan módszert dolgoztam ki, amivel a modellek összehasonlítása pontosan elvégezhető. Az ötlet azon a tényen alapszik, hogy az összes anyagjellemző csak a hőmérséklet és nyomás függvénye. Ezt a két mennyiséget tekintve fő változóknak a paraméterek száma jelentősen csökkenthető. Továbbá az összes buborékdinamikai modellben a paraméterek száma meg fog egyezni. Ezek az előbb említett hőmérséklet, nyomás és egy a buborék nagyságára jellemző egyensúlyi sugár.



1.2. ábra. Mérések és számítási eredmények összehasonlítása különböző hőmérséklet és nyomás értékeknél. A fekete, piros és kék görbék a mérés, Keller–Miksis és a Rayleigh–Plesset egyenlet eredményeit jelölik.

Következésképpen a buborék sugár időgörbéjének mérése mellett egy olyan mérési módszert dolgoztam ki, ami alkalmas különböző buborék modellek validálására, figyelembe véve, hogy a két fő paraméter a hőmérséklet T_∞ és a nyomás P_∞ . Ehhez egy alkalmas eszközt (vákuum kamra) kellett tervezni, amiben a környezeti paraméterek tetszőlegesen beállíthatók. A kamra részletei, a hőmérsékletszabályozás és a gyártási folyamatok a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Hidrodinamikai Rendszerek Tanszékén készültek el.

A vákuum kamrát használva egy gömbszimmetrikus buborék szabadlengését vizsgáltam glicerinben különböző hőmérséklet ($25^\circ\text{C} - 60^\circ\text{C}$) és nyomás (250 mbar – 1000 mbar) értékeknél. A buborékot Nd:Yag lézer segítségével generáltam. A buborék sugár időfüggő változását új 'árnyékoló' eljárással mértem, amit az emdeni Hochschule Emden/Leer, University of Applied Sciences Egyetemen fejlesztettek ki. Ez a módszer alkalmas a buboréklengés több nagyságrendben különböző időskáláit felbontani. A módszert alkalmazva a Rayleigh–Plesset és a Keller–Miksis egyenletet validáltam a $T_\infty - P_\infty$ paramétersíkon. A buborék egyensúlyi sugara R_E tized milliméter nagyságrendben volt.

Az 1.2 ábra egy eredményssorozatot mutat, ahol a fekete, piros és kék görbék a mérés, Keller–Miksis és a Rayleigh–Plesset egyenlet eredményei. Tisztán látható, hogy a Keller–Miksis egyenlet minden esetben nagyon jó egyezést mutat a mérésekkel. Ezzel szemben a Rayleigh–Plesset egyenlet nagyon rossz eredményeket tud produkálni, különösen magas hőmérsékleteken.

Tézis #4:

A különböző buborékmodellek összehasonlítására alkalmas módszert dolgoztam ki, ami azon a tényen alapszik, hogy egy tiszta anyag összes anyagjellemzője csak a hőmérséklet és a nyomás függvénye.

Tetszőleges nyomás és hőmérséklet beállítására, vákuum kamrát terveztem, amit a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Hidrodinamikai Rendszerek Tanszékén gyártottak le.

Alkalmazva azt az új buboréksugár mérési módszert, amit a Hochschule Emden/Leer, University of Applied Sciences Egyetemen fejlesztettek ki, a Rayleigh–Plesset és a Keller–Miksis egyenletet validálni tudtam.

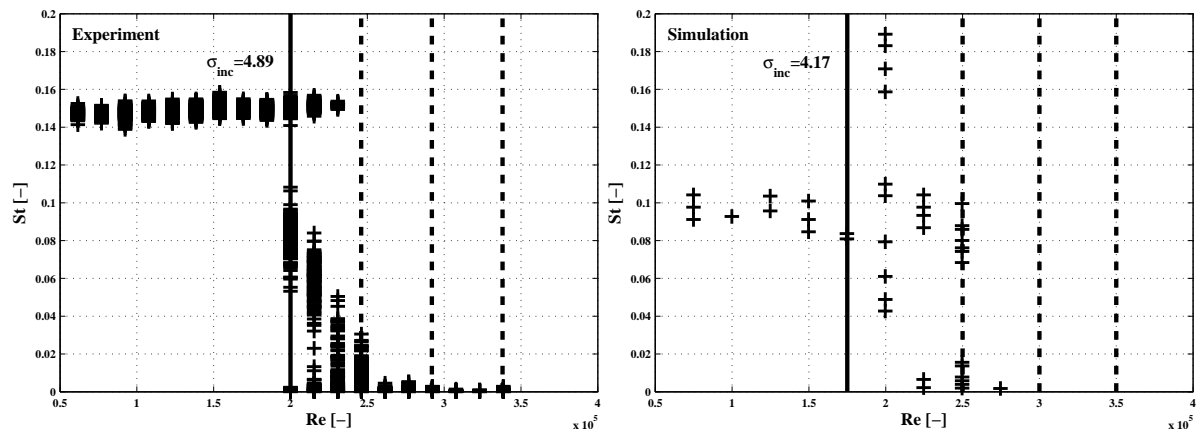
A tézishoz kapcsolódó publikációk: Hegedűs et al. 2010a and Koch et al. 2012b.

2. fejezet

Kavitációs örvény leválás

2.1. Mérések a kavitációs csatornán

Ebben a fejezetben a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Hidrodinamikai Rendszerek Tanszékén lévő kavitációs csatornán végzett kísérleti eredményeimet mutatom be. A csatorna 200 mm magas és 50 mm széles mérőterébe két négyzet alapú hasáb próbatestet helyeztem, 50 mm és 25 mm oldalhosszúsággal. A Reynolds szám tartománya



2.1. ábra. Reynolds szám - Strouhal szám összefüggés a $H = 25$ mm oldalhosszúságú modell és a numerikus szimuláció esetén.

$2.5 \cdot 10^4$ és $4.7 \cdot 10^5$ között volt, ami az irodalomban található legnagyobb Reynolds szám értékének kiterjesztése.

Annak ellenére, hogy különböző alakú modelleket lehet a mérőtérbe helyezni, a négyzet alapú hasáb mellett azért döntöttem, hogy a numerikus szimulációkkal jobban össze lehessen hasonlítani az eredményeket (egyszerű hálózás, adott leválási pont). A mérések során kapott adatokat összehasonlítottam Rákos Roland numerikus eredményeivel amit

ANYSY CFX v10.0 kereskedelmi szoftverrel végzett el. Az ő modellje 20 mm magas volt.

A vizsgálat fő folyamánya a Reynolds szám - Strouhal szám kapcsolata. Az eredmények jó egyezést mutatnak az irodalommal, azaz, a domináns Strouhal szám állandó a Reynolds szám széles tartományában, lásd 2.1. ábrát. A kavitáció megjelenése után a Strouhal szám értéke továbbra sem változik. Mivel a közepesen 'erős' kavitációs áramlásnak nincs hatása a leválási örvény frekvenciájára, ezért az ezen az elven működő térfogatáram mérő eszközök megbízható adattal szolgálhatnak még kavitációs üzemben is.

Tézis #5:

Különböző oldalhosszúságú négyzet alapú hasábok mögötti örvényleválás frekvenciáját tapasztalati úton vizsgáltam a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Hidrodinamikai Rendszerek Tanszékén lévő kavitációs csatornán

- Az irodalomban használt Reynolds szám tartományt kiterjesztettem 10^5 -ről $4.7 \cdot 10^5$ -ig. A mérési eredmények (Strouhal szám) a $Re < 10^5$ tartományban jól egyeznek az irodalommal.
- A kavitációs áramlásnak nincs hatása a Strouhal szám értékére, az konstans marad egészen a szuperkavitáció megjelenéséig.

A tézishez kapcsolódó publikációk: Hegedűs et al. 2010b,c, Hegedűs and Kullmann 2009a.

Saját publikációk

- Hegedűs, F., Hős, Cs., Kullmann, L., 2012. Stable period 1,2 and 3 structures of the harmonically excited Rayleigh–Plesset equation low ambient pressure. *IMA J. Appl. Math.*, in press, DOI:10.1093/imamat/hxs016. (IF:0.653)
- Koch, S., Garen, W., Hegedűs, F., Neu, W., Teubner, U., 2012. Time-resolved measurements of shock-induced cavitation bubbles in liquids. *Appl. Phys. B - Lasers O.*, in press, DOI:10.1007/s00340-012-5070-1. (IF:2.239)
- Hegedűs, F., Kullmann, L., 2012. Basins of attraction in a harmonically excited spherical bubble model. *Per. Pol. Mech. Eng.*, accepted.
- Hegedűs, F., Hős, Cs., Kullmann, L., 2011. An analysis of the periodic solutions of an acoustically excited cavitation bubble. In: 19th International Conference in Mechanical Engineering (OGÉT 2011), Sumuleu-Ciuc, Romania, 160–163.
- Hegedűs, F., Hős, Cs., Kullmann, L., 2010. Influence of heat transfer on the dynamic response of a spherical gas/vapour bubble. *Int. J. Heat Fluid Fl.*, 31(6), 1040–1049. (IF:1.802)
- Hegedűs, F., Hős, Cs., Pandula, Z., Kullmann, L., 2010. Measurement on the cavitating vortex shedding behind rectangular obstacles. In: 25th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Timisoara, Romania; IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 12(1), Paper: 012066.
- Hegedűs, F., Mészáros, B., Kullmann, L., 2010. Measurement on cavitating vortex shedding behind a square shaped obstacle. In: Proceedings of the Seventh Conference on Mechanical Engineering (Gépészet 2010), Budapest, Hungary, Paper: 122.
- Hegedűs, F., Roland, R., Kullmann, L., 2009. Experimental and numerical study on cavitating vortex shedding behind a square cylinder. *Per. Pol. Mech. Eng.*, 53(2), 55–60.
- Hegedűs, F., Hős, Cs., Kullmann, L., 2009. Influence of heat transfer on the dynamic response of a spherical gas/vapour bubble. In: Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'09), Budapest, Hungary, 173-180.

Hegedűs, F., Hős, Cs., Kullmann, L., 2009. Detection of chaotic motions of a harmonically excited cavitation bubble with gas content. In: 17th International Conference in Mechanical Engineering (OGÉT 2009), Gheorgheni, Romania, 156–160.

Hegedűs, F., Kullmann, L., 2008. Rayleigh–Plesset equation stability analysis. In: Proceedings of the Sixth Conference on Mechanical Engineering (Gépészet 2008), Budapest, Hungary, Paper: G-2008-E-02.

Hegedűs, F., Koch, S., Garen, W., Pandula, Z., Paál, Gy., Kullmann, L., Teubner, U., 2012. The effect of high viscosity on compressible and incompressible Rayleigh–Plesset-type bubble models. *Int. J. Heat Fluid Fl.*, need major revision. (IF:1.802)

Irodalomjegyzék

- Canselier, J.P., Delmas, H., Wilhelm, A.M., Abismail, B., 2002. Ultrasound emulsification - An overview. *J. Disper. Sci. Technol.*, 23(1-3), 333–349.
- Disselkamp, R.S., Judd, K.M., Hart, T.R., Peden, C.H.F., Posakony, G.J., Bond, L.J., 2004. A comparison between conventional and ultrasound-mediated heterogeneous catalysis: hydrogenation of 3-buten-1-ol aqueous solutions. *J. Catal.*, 221(2), 347–353.
- Freitas, S., Hielscher, G., Merkle, H.P., Gander, B., 2006. Continuous contact- and contamination free ultrasonic emulsification - A useful tool for pharmaceutical development and production. *Ultrason. Sonochem.* 13(1), 76–85.
- Knorr, D., 2003, Impact of non-thermal processing on plant metabolites. *J. Food Eng.* 56(2-3), 131–134.
- Knorr, D., Zenker, M., Heinz, V., Lee, D-U., 2004, Applications and potential of ultrasonics in food processing. *Trends Food Sci. Tech.* 15(5), 261–266.
- Konaganti, V.K., Madras, G., 2010. Ultrasonic degradation of poly(methyl methacrylate-co-alkyl acrylate) copolymers. *Ultrason. Sonochem.* 17(2), 403–408.
- Li, H., Pordesimo, L., Weiss, J., 2004. High intensity ultrasound-assisted extraction of oil from soybeans. *Food. Res. Int.* 37(7), 731–738.
- Seshadri, R., Weiss, J., Hulbert, G.J., Mount, J., 2003. Ultrasonic processing influences rheological and optical properties of high methoxyl pectin dispersions. *Food Hydrocolloid.*, 17(2), 191–197.
- Vinatoru, M., 2001, An overview of the ultrasonically assisted extraction of bioactive principles from herbs. *Ultrason. Sonochem.* 8(3), 303–313.